



Evaluación del riesgo ocupacional por exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento

Occupational risk assessment for chronic exposure to fugitive natural gas emissions in processing plants

Avaliação do risco ocupacional para a exposição crónica a emissões fugitivas de gases naturais em plantas de processamento

Luis Fernando Jácome-Alarcón ^I

ljacomea@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1553-7591>

Susan Katherine Arcos-Rosado ^{II}

sarcosr@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0000-1425-0607>

Verónica Lisbeth Navas-Muñoz ^{III}

vnavasm@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-9015-2071>

Kimberly Brithany Lucas-Williams ^{IV}

klucasw@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-0847-6011>

Correspondencia: ljacomea@uteq.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 25 de julio de 2025 * **Aceptado:** 20 de agosto de 2025 * **Publicado:** 12 de septiembre de 2025

- I. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo analizar y sintetizar la evidencia científica reciente sobre el riesgo ocupacional derivado de la exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento. La revisión se fundamenta en la creciente preocupación por los efectos adversos en la salud de los trabajadores expuestos a compuestos como metano, compuestos orgánicos volátiles (COV), tolueno, benceno, xileno y otros contaminantes liberados de forma no intencionada por sistemas de transporte, almacenamiento y compresión de gas natural. Para la elaboración de este trabajo se llevó a cabo una revisión de la literatura científica, empleando un enfoque sistemático y descriptivo, cuyo proceso incluyó la selección y análisis de artículos de investigación originales, revisiones sistemáticas y documentos técnicos publicados entre los años 2019 y 2025. Las fuentes consultadas provienen exclusivamente de revistas científicas reconocidas e indexadas en bases de datos internacionales como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, lo que garantiza la calidad y actualidad de la información recopilada. Se aplicaron criterios de inclusión enfocados en estudios con datos cuantitativos sobre exposición ocupacional y sus efectos en la salud, excluyendo literatura gris y publicaciones sin revisión por pares. Los resultados de la revisión evidencian que los trabajadores expuestos de manera crónica a emisiones fugitivas presentan un mayor riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias, neurotóxicas y carcinogénicas, siendo el benceno uno de los contaminantes más críticos. Se identificaron niveles de exposición que superan los umbrales establecidos por organismos internacionales como NIOSH y ACGIH, especialmente en instalaciones sin protocolos estrictos de detección y reparación de fugas. También se destacan biomarcadores como el ácido trans, trans-mucónico en orina, y el S-fenilmercapturico como indicadores efectivos de exposición a hidrocarburos aromáticos. Como conclusión general, se establece que la exposición a emisiones fugitivas constituye un riesgo ocupacional relevante y subestimado, que requiere de vigilancia médica sistemática, tecnologías de monitoreo avanzadas, cumplimiento regulatorio riguroso y estrategias integradas de prevención.

Palabras clave: Gas natural; emisiones fugitivas; exposición ocupacional; salud laboral.

Abstract

This article aims to analyze and synthesize recent scientific evidence on the occupational risk derived from chronic exposure to fugitive natural gas emissions in processing plants. The review

is based on the growing concern about the adverse health effects of workers exposed to compounds such as methane, volatile organic compounds (VOCs), toluene, benzene, xylene, and other pollutants unintentionally released by natural gas transportation, storage, and compression systems. For the preparation of this work, a review of the scientific literature was carried out using a systematic and descriptive approach. The process included the selection and analysis of original research articles, systematic reviews, and technical documents published between 2019 and 2025. The sources consulted come exclusively from recognized scientific journals indexed in international databases such as Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, which guarantees the quality and timeliness of the information collected. Inclusion criteria focused on studies with quantitative data on occupational exposure and its health effects, excluding gray literature and non-peer-reviewed publications. The results of the review show that workers chronically exposed to fugitive emissions are at increased risk of developing respiratory, neurotoxic, and carcinogenic diseases, with benzene being one of the most critical pollutants. Exposure levels exceeding the thresholds established by international organizations such as NIOSH and ACGIH were identified, especially in facilities without strict leak detection and repair protocols. Biomarkers such as urinary trans, trans-muconic acid and S-phenylmercapturic acid were also highlighted as effective indicators of exposure to aromatic hydrocarbons. The overall conclusion is that exposure to fugitive emissions constitutes a significant and underestimated occupational risk, requiring systematic medical surveillance, advanced monitoring technologies, rigorous regulatory compliance, and integrated prevention strategies.

Keywords: Natural gas; fugitive emissions; occupational exposure; occupational health.

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar e sintetizar evidências científicas recentes sobre o risco ocupacional derivado da exposição crónica a emissões fugitivas de gás natural em instalações de processamento. A revisão baseia-se na crescente preocupação com os efeitos adversos para a saúde dos trabalhadores expostos a compostos como o metano, compostos orgânicos voláteis (COV), tolueno, benzeno, xileno e outros poluentes libertados involuntariamente pelos sistemas de transporte, armazenamento e compressão de gás natural. Para a elaboração deste trabalho foi realizada uma revisão da literatura científica com recurso a uma abordagem sistemática e descritiva. O processo incluiu a seleção e análise de artigos de investigação originais, revisões

sistemáticas e documentos técnicos publicados entre 2019 e 2025. As fontes consultadas provêm exclusivamente de revistas científicas reconhecidas e indexadas em bases de dados internacionais como a Scopus, Web of Science e ScienceDirect, o que garante a qualidade e atualidade da informação recolhida. Os critérios de inclusão centraram-se em estudos com dados quantitativos sobre a exposição ocupacional e os seus efeitos na saúde, excluindo a literatura cinzenta e as publicações não revistas por pares. Os resultados da revisão demonstram que os trabalhadores cronicamente expostos a emissões fugitivas apresentam um maior risco de desenvolver doenças respiratórias, neurotóxicas e cancerígenas, sendo o benzeno um dos poluentes mais críticos. Foram identificados níveis de exposição que excedem os limites estabelecidos por organizações internacionais como o NIOSH e o ACGIH, especialmente em instalações sem protocolos rigorosos de deteção e reparação de fugas. Biomarcadores como o ácido trans, o ácido trans-mucónico e o ácido S-fenilmercaptúrico urinários foram também destacados como indicadores eficazes de exposição a hidrocarbonetos aromáticos. A conclusão geral é que a exposição a emissões fugitivas constitui um risco ocupacional significativo e subestimado, exigindo vigilância médica sistemática, tecnologias de monitorização avançadas, conformidade regulamentar rigorosa e estratégias de prevenção integradas.

Palavras-chave: Gás natural; emissões fugitivas; exposição ocupacional; saúde ocupacional.

Introducción

El gas natural es una mezcla compleja donde el metano representa el componente principal, al que se añaden COV tales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno) y sulfuro de hidrógeno o compuestos odorantes como mercaptanos (Rowland et al., 2025). La exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural (liberaciones no intencionadas o incontroladas de metano) en plantas de procesamiento representa un riesgo ocupacional emergente de gran relevancia para la salud de los trabajadores (Alhamdani et al., 2024).

Las emisiones, compuestas principalmente por metano, compuestos orgánicos volátiles (COV), mercaptanos y trazas de sulfuro de hidrógeno (Zahra et al., 2025), se producen a partir de fugas en válvulas, sellos, juntas y sistemas de compresión, y pueden implicar acumulaciones tóxicas en espacios confinados o zonas adyacentes a los puntos de fuga (Sotoodeh, 2021); documentándose que estos componentes pueden generar irritaciones nasales y respiratorias, cefalea, mareo, y alteraciones neurológicas en exposiciones recurrentes (Rashid & Hassan, 2024).

El riesgo ocupacional asociado a la exposición crónica a emisiones fugitivas en plantas de procesamiento de gas natural ha adquirido creciente relevancia en la literatura científica reciente, debido a la evidencia acumulada sobre los efectos adversos en la salud de los trabajadores expuestos (Bhuyan et al., 2023). Los mecanismos de exposición ocupacional más relevantes incluyen la inhalación de gases y vapores, el contacto dérmico con condensados y la posible ingestión accidental de contaminantes presentes en el ambiente laboral (Morales et al., 2024). La inhalación es el principal mecanismo, dada la naturaleza volátil de los compuestos liberados, aunque la exposición dérmica puede ser significativa en actividades de mantenimiento, limpieza y manipulación de equipos contaminados (Holder et al., 2019). Estudios epidemiológicos recientes han documentado que la exposición crónica a bajas concentraciones de hidrocarburos volátiles y metano puede inducir efectos sistémicos y específicos, incluyendo alteraciones neurotóxicas, hepatotóxicas, nefrotóxicas y riesgo incrementado de cáncer, particularmente por la presencia de benceno y otros compuestos aromáticos (Wami, 2025).

La naturaleza insidiosa de la exposición crónica se ve agravada por la acumulación progresiva de dosis subclínicas, que pueden superar la capacidad de detoxificación del organismo y generar efectos a largo plazo difíciles de diagnosticar en etapas tempranas (Kumar & Gupta, 2021). Además, factores individuales como la genética, hábitos de vida y uso inadecuado de equipos de protección personal (EPP) pueden modular la susceptibilidad y la gravedad de los efectos adversos (Dee et al., 2022). La literatura reciente destaca la importancia de la vigilancia médica periódica y la implementación de programas de prevención y control, que incluyan capacitación, monitoreo ambiental y biomarcadores de exposición en trabajadores (Nakaji et al., 2024).

En el contexto latinoamericano y, particularmente, en Ecuador, la regulación sobre exposición ocupacional a emisiones de hidrocarburos en plantas de procesamiento ha avanzado en la última década, aunque persisten brechas en la aplicación y actualización de los límites de exposición permisibles para compuestos específicos como el benceno, el tolueno y el metano (Gómez et al., 2025; Quintero et al., 2024). La normativa internacional, como las recomendaciones de la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), establece límites de exposición ocupacional (TLV-TWA) para los principales componentes de las emisiones fugitivas, que sirven de referencia para la legislación regional (William, 2021).

La literatura científica reciente recomienda que la implementación de sistemas de detección continua de metano y NMVOC (Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos) en áreas críticas de plantas de procesamiento (Rangel et al., 2023), así como la utilización de biomarcadores específicos en muestras biológicas de trabajadores, como el ácido trans, trans-mucónico en orina para el benceno, y la medición de hidrocarburos totales en sangre (Adly & Saleh, 2022). Estos enfoques permiten una evaluación más precisa de la exposición real y la identificación temprana de efectos adversos, facilitando la toma de decisiones preventivas y correctivas (Oliveira et al., 2021).

A pesar de los avances en la comprensión de los mecanismos de exposición y los efectos en la salud, persisten desafíos en la cuantificación y control de las emisiones fugitivas, especialmente en países en vías de desarrollo donde la infraestructura de monitoreo y la cultura de prevención pueden ser insuficientes (Oyewunmi, 2021). La integración de tecnologías de detección avanzada, la actualización de normativas y la formación continua del personal son estrategias recomendadas para reducir el riesgo ocupacional y proteger la salud de los trabajadores en la industria del gas natural (Benson et al., 2021).

En síntesis, la exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento representa un riesgo ocupacional significativo y multifactorial, que requiere una evaluación integral basada en la caracterización de la composición de las emisiones, la identificación de los mecanismos de exposición, la vigilancia de los efectos crónicos en la salud y el cumplimiento de un marco regulatorio robusto y contextualizado. El objetivo de este artículo es revisar y analizar críticamente la literatura científica reciente sobre el riesgo ocupacional por exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento, con especial énfasis en los mecanismos de exposición, los efectos crónicos en la salud y la relevancia del monitoreo ambiental y biológico en la protección de los trabajadores. Esta revisión busca aportar una visión actualizada y fundamentada que oriente la gestión del riesgo y la formulación de políticas preventivas en el sector energético y de procesos industriales.

Metodología

La presente revisión bibliográfica se enmarca dentro de un enfoque sistemático y descriptivo, orientado a identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica reciente sobre la evaluación del riesgo ocupacional por exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de

procesamiento. Este tipo de revisión permite integrar resultados de estudios epidemiológicos, normativos y técnicos, proporcionando una visión comprensiva y actualizada de los riesgos y estrategias de gestión en el sector industrial.

Para garantizar la calidad y pertinencia de la información, se definieron criterios de inclusión y exclusión rigurosos, siguiendo recomendaciones metodológicas internacionales. Para la selección de la literatura, se consideraron investigaciones originales, revisiones sistemáticas, así como documentos técnicos y normativos publicados entre los años 2019 y 2025 en revistas científicas reconocidas e indexadas en bases de datos como Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se dio preferencia a trabajos redactados en español e inglés que abordaran temas relacionados con la salud ocupacional, la toxicología industrial, la gestión de riesgos y las emisiones fugitivas en el sector del gas natural. Quedaron fuera del análisis los estudios realizados en modelos animales, la literatura gris, las cartas al editor, los resúmenes sin acceso al texto completo y las publicaciones anteriores a 2019, salvo aquellas que fueran fundamentales por su relevancia normativa o conceptual.

Se emplearon combinaciones de palabras clave y operadores booleanos, adaptados a cada base de datos. Entre los términos utilizados destacan: “fugitive emissions”, “natural gas”, “occupational exposure”, “chronic exposure”, “risk assessment”, “processing plants”, “health effects”, “biomonitoring”, “Latin America”, junto con sus equivalentes en español. Se aplicaron filtros por fecha de publicación (2019-2024), tipo de documento (artículo científico, revisión, informe técnico) y área temática (salud ocupacional, toxicología, ingeniería de procesos). La estrategia de búsqueda se ajustó iterativamente para maximizar la sensibilidad y especificidad, permitiendo identificar estudios relevantes y actuales. Este enfoque metodológico asegura la validez, actualidad y relevancia de la revisión, permitiendo fundamentar sólidamente el análisis del riesgo ocupacional por exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento.

Resultados

La revisión de la literatura científica publicada entre 2019 y 2024 evidencia que la exposición ocupacional crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento constituye un riesgo relevante y multifactorial para la salud de los trabajadores. Los estudios revisados abordan tanto los efectos agudos y crónicos en la salud como la eficacia de las estrategias de monitoreo y control implementadas en diferentes contextos industriales y geográficos.

El análisis comparativo de los estudios revisados revela coincidencias en la identificación de los principales gases de interés (CH_4 , COV, H_2S , CO, NO_x) y en la asociación entre exposición crónica y efectos adversos en la salud respiratoria y sistémica. Sin embargo, existen discrepancias en los valores umbral de exposición y en la magnitud de los riesgos reportados, atribuibles a diferencias metodológicas, geográficas y en la implementación de programas de control y monitoreo. Por ejemplo, estudios realizados en terminales de combustible en América Latina han identificado niveles promedio de benceno en el aire que superan las 25,33 partes por millón, así como concentraciones de xileno de 7,33 ppm (Dongo & Malca, 2022), estos compuestos, presentes en la composición del gas natural, exceden los valores límite establecidos por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Mientras que en instalaciones con programas robustos de detección y reparación de fugas (LDAR), los niveles de exposición se mantienen por debajo de los valores umbral internacionales, como lo demostraron Villalobos et al. (2024) en una planta química donde los compuestos orgánicos volátiles (COV) no superaron el umbral de las normas con valores promedios de 1 ppm.

En una investigación realizada por Wollin et al. (2020) en instalaciones de flow-back de gas natural no convencional, se identificaron concentraciones de benceno en el aire respirado por los trabajadores que, en determinados casos, excedieron el valor límite recomendado por el NIOSH (0,1 ppm), alcanzando valores entre 0,11 y 0,17 ppm. Asimismo, el análisis de biomarcadores urinarios, específicamente el S-fenilmercaptúrico, mostró niveles considerablemente más altos en los empleados expuestos (6,5 $\mu\text{g/g}$ de creatinina) en comparación con el grupo control (3,1 $\mu\text{g/g}$ de creatinina), lo que evidenció una correlación moderada entre la exposición ambiental y la carga biológica del contaminante.

También se han documentado fugas significativas en infraestructura de compresión y transporte, Nordgaard et al. (2022) reportaron plumas de metano superiores a 4000 ppm en fugas desde instalaciones de almacenamiento y compresión. Esta alta concentración de metano puede llevar también a la presencia de benzol y trazas de HAP (BTEX, formaldehído) en aire ambiente.

A continuación, se presenta una tabla resumen comparativa de los principales estudios revisados:

Tabla 1. Resumen comparativo de estudios recientes

Autor / Año	Gases evaluados	Resultados cuantitativos	Principales hallazgos en salud ocupacional
Dongo & Malca, 2022	Benceno y xileno	25,33 ppm de benceno y xileno con 7,33 ppm	Potencial carcinógeno.
Villalobos et al. (2024)	Compuestos orgánicos volátiles (COV)	1 ppm de promedio	Posible exposición a 4 compuestos. Implica modificar condiciones de trabajo.
Wollin et al. (2020)	Benceno del gas natural	0,11 a 0,17 ppm	Biomarcadores en la orina elevados
Nordgaard et al. (2022)	Gas metano	Superior a 4000 ppm	Presencia de benzol y BTX (benceno, tolueno y xileno).

Discusión

Las emisiones fugitivas en plantas de procesamiento de gas natural se originan principalmente por fugas en tuberías, válvulas, bridas, conexiones y equipos de almacenamiento (Hadi et al., 2025), liberando a la atmósfera metano (CH₄), compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos como benceno, tolueno y xileno, además de gases inorgánicos como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) (Rowland et al., 2025).

Desde el punto de vista de la salud ocupacional, la evidencia reciente indica que la exposición prolongada a estos contaminantes se asocia con un aumento en la prevalencia de enfermedades respiratorias crónicas, como asma, bronquitis y enfermedad pulmonar obstructiva crónica, así como con efectos cardiovasculares y riesgos carcinogénicos, especialmente por la presencia de benceno y otros hidrocarburos aromáticos (Kumar et al, 2023). Además, se han reportado síntomas agudos como cefalea, mareos, náuseas y alteraciones neurológicas en trabajadores expuestos a concentraciones elevadas de H₂S y CO (Badaeva et al., 2025). Un aspecto crítico es que, aunque el metano en sí no es tóxico a bajas concentraciones, su capacidad para desplazar el oxígeno en ambientes cerrados puede generar atmósferas deficientes en oxígeno, con riesgo de asfixia y accidentes fatales (Haghverdi et al., 2025).

La literatura enfatiza mucho el riesgo por exposición de BTX (benceno, tolueno y xileno) presentes en la composición del gas natural, debido a que producen alteraciones en el sistema nervioso central, irritación en el tracto respiratorio, sobre todo el benceno es clasificado como posible carcinógeno en humanos (Muda et al., 2024). El uso correcto de equipos de protección personal como de un adecuado seguimiento periódico de los biomarcadores en los trabajadores son los mejores mecanismos para mitigar riesgos ocupacionales en la salud (Taheri et al., 2024).

En cuanto a las estrategias de monitoreo y control, la literatura reciente enfatiza la importancia de los sistemas continuos de detección de gases y la implementación de programas estructurados de mantenimiento preventivo y correctivo (Longo et al., 2021). El uso de tecnologías de detección avanzada, como sensores infrarrojos y cromatografía de gases portátil, ha demostrado ser eficaz para la identificación temprana de fugas y la reducción de la exposición ocupacional (Duan et al., 2024). No obstante, la eficacia de estas medidas depende en gran medida de la capacitación del personal, la actualización de los protocolos de seguridad y la rigurosidad en la aplicación de normas internacionales y locales (Spandonidis et al., 2022).

Conclusiones

La evidencia científica revisada entre 2019 y 2025 confirma que la exposición crónica a emisiones fugitivas de gas natural en plantas de procesamiento representa un riesgo significativo para la salud ocupacional. Esta exposición está asociada a la presencia de contaminantes como metano, compuestos orgánicos volátiles (COV), sulfuro de hidrógeno y gases aromáticos del tipo BTX, que han sido relacionados con efectos agudos. Los mecanismos principales de exposición identificados incluyen la inhalación de vapores en zonas de trabajo sin ventilación adecuada, y el contacto dérmico durante tareas de mantenimiento o manipulación de equipos contaminados.

En cuanto a las estrategias de monitoreo, se destaca la efectividad de herramientas como sensores infrarrojos, cromatografía portátil y el uso de biomarcadores urinarios y sanguíneos, que permiten una evaluación más precisa y temprana de la exposición. No obstante, su eficacia depende de la capacitación técnica del personal, la cultura preventiva de la organización y la rigurosidad del cumplimiento normativo. En países como Ecuador, donde la normativa en seguridad industrial ha avanzado, aún persisten desafíos en su aplicación práctica, especialmente en cuanto a actualizaciones de límites permisibles y fiscalización en campo.

Con base en lo anterior, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en el uso combinado de tecnologías de detección y biomonitoreo para establecer perfiles de riesgo por función laboral. Asimismo, es necesario actualizar y regionalizar los marcos regulatorios, considerando las características operativas de cada industria. Se sugiere la implementación de programas integrales que incluyan formación continua en higiene industrial, inversión en tecnologías de monitoreo en tiempo real, y vigilancia médica periódica como componentes esenciales para reducir la carga de enfermedad asociada a este tipo de exposición ocupacional. Esta revisión contribuye a fundamentar la necesidad de una respuesta institucional robusta, alineada con principios de salud preventiva, sostenibilidad y justicia laboral.

Referencias

1. Adly, H. M., & Saleh, S. A. (2022). The association of increased oxidative stress and tumor biomarkers related to polyaromatic hydrocarbons exposure for different occupational workers in Makkah, Saudi Arabia. *Cureus*, 14(12), e32981. <https://doi.org/10.7759/cureus.32981>
2. Alhamdani, Y. A., Hassim, M. H., & Shaik, S. M. (2024). A holistic approach for assessing occupational health risk due to fugitive emissions in petrochemical processes: Inherent health hazard level index (IHHLI). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102(11), 3676-3691. <https://doi.org/10.1002/cjce.25627>
3. Badaeva, A., Maiolino, L., Danilov, A., Naprienko, M., Danilov, A., Jacob, U. M., & Calabrese, V. (2025). Neurogasobiology of migraine: Carbon monoxide, hydrogen sulfide, and nitric oxide as emerging pathophysiological trinacrium relevant to nociception regulation. *Open Medicine*, 20(1), 20251201. <https://doi.org/10.1515/med-2025-1201>
4. Benson, C., Dimopoulos, C., Argyropoulos, C. D., Mikellidou, C. V., & Boustras, G. (2021). Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers. *Safety science*, 140, 105284. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105284>
5. Bhuyan, Z. N., Islam, S., & Syeda, S. R. (2023). Study of Fugitive Emissions in Petroleum Processing Plants. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 130-135. <https://doi.org/10.3329/ceerb.v23i10.79923>

6. Dee, S. J., Hietala, D. C., & Sulmonetti, T. P. (2022). Process hazard considerations for utilization of renewable methane from biogas. *Process Safety Progress*, 41(4), 670-677. <https://doi.org/10.1002/prs.12389>
7. Dongo-Cateriano, C., & Malca-Casavilca, N. (2022). Análisis del benceno como indicador de la calidad del aire en los establecimientos de combustibles. *Rev. Inst. InvestIg. Fac. mInas metal. cIenc. geogR*, 25(50), 273-280. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24250>
8. Duan, C., Li, J., Zhang, Y., Ding, K., Geng, X., & Guan, Y. (2022). Portable instruments for on-site analysis of environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 154, 116653. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116653>
9. Gómez-García, A. R. ., Vega Chica , M. L., & Yturralde, M. J. G. . (2025). A 32-Year Analysis of Occupational Safety and Health in Ecuador: Regulatory Impact on Workplace Morbidity and Mortality. *Journal of Ecohumanism*, 4(1), 3243-. <https://doi.org/10.62754/joe.v4i1.6144>
10. Hadi, S., Hutagalung, M. N. A., Pranoto, B., Dwiyanto, F., & Kurniawan, D. (2025). Analysis of Leakage Test Results on Flange-Gasket Piping System Simulator Device. *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 25(1), 27-34. <https://doi.org/10.31940/logic.v25i1.27-34>
11. Haghverdi, A. B., Rezaei, I., Khani, A. A. M., & Aghae, T. (2025). Methane detection approach based on THz wave absorber. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2025.100758>
12. Holder, C., Hader, J., Avanas, R., Hong, T., Carr, E., Mendez, B., ... & Wei, Y. (2019). Evaluating potential human health risks from modeled inhalation exposures to volatile organic compounds emitted from oil and gas operations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(12), 1503-1524. <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1680459>
13. Kumar, N., & Gupta, H. (2021). Methane: Risk assessment, environmental, and health hazard. In *Hazardous gases* (pp. 225-238). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89857-7.00009-8>
14. Kumar, P., Singh, A. B., Arora, T., Singh, S., & Singh, R. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable

- management. *Science of The Total Environment*, 872, 162163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162163>
15. Longo, V., Forleo, A., Giampetruzzi, L., Siciliano, P., & Capone, S. (2021). Human biomonitoring of environmental and occupational exposures by GC-MS and gas sensor systems: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10236. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910236>
 16. Morales, J. V., Barrantes, J. C. M., Brenes, J. P. S., Montero, G. Z., Solís, R. A., Alpízar, H. B., & Díaz, A. R. (2024). Evaluacion de la exposición laboral a compuestos orgánicos volátiles (COV): Caso de estudio en una empresa química. *Tecnología en Marcha*, 37(3), 141-155. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9631624>
 17. Muda, I., Mohammadi, M. J., Sepahvad, A., Farhadi, A., Fadhel Obaid, R., Taherian, M., ... & Farhadi, M. (2024). Associated health risk assessment due to exposure to BTEX compounds in fuel station workers. *Reviews on Environmental Health*, 39(3), 435-446. <https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0012>
 18. Nakaji, S., Murashita, K., Mikami, T., Tamada, Y., & Uemura, N. (2024). Strategies for promoting health in society utilizing quality-of-life check-ups: a protocol paper. *Preventive Medicine Research*, 1(4), 43-54. https://doi.org/10.60219/pmr.1.4_43
 19. Nordgaard, C. L., Jaeger, J. M., Goldman, J. S., Shonkoff, S. B., & Michanowicz, D. R. (2022). Hazardous air pollutants in transmission pipeline natural gas: an analytic assessment. *Environmental Research Letters*, 17(10), 104032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9295>
 20. Oliveira, M., Capelas, S., Delerue-Matos, C., & Morais, S. (2021). Grill workers exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: levels and excretion profiles of the urinary biomarkers. *International journal of environmental research and public health*, 18(1), 230. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010230>
 21. Oyewunmi, T. (2021). Natural gas in a carbon-constrained world: Examining the role of institutions in curbing methane and other fugitive emissions. *LSU J. Energy L. & Resources*, 9, 87. <https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/lsojoenre9&div=7&id=&page=>

22. Quintero Santofimio, V., Amaral, A. F., & Feary, J. (2024). Occupational exposures in low- and middle-income countries: A scoping review. *PLOS Global Public Health*, 4(11), e0003888. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0003888>
23. RANGEL PICO, A. N., RAMÍREZ OLIVEROS, E. P., & ZAMBRANO VALDIVIESO, Ó. J. (2023). DISEÑO Y EJECUCIÓN DE UN SENSOR PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE EN AMBIENTES LABORALES. *Human Review*, 19(2). <https://doi.org/10.37467/revhuman.v19.4998>
24. Rashid, H. A., & Hassan, N. E. (2024). Review of Toxic Gases and Their Impact on Human Health. *Jabirian Journal of Biointerface Research in Pharmaceutics and Applied Chemistry*, 1(4), 7–12. <https://doi.org/10.55559/jjbrpac.v1i4.398>
25. Rowland, S. T., Domen, J. K., Lee, J., Munoz, Q., Jaeger, J. M., Bisogno, S., ... & Bilsback, K. R. (2025). Scalable estimation of speciated volatile organic compound composition in the upstream natural gas sector. *Environmental Research Communications*, 7(5), 051011. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adcd49>
26. Sotoodeh, K. (2021). Why packing adjustment cannot stop leakage: Case study of a ball valve failing to seal after packing adjustment during fugitive emission as per ISO 15848–1. *Engineering Failure Analysis*, 130, 105751. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105751>
27. Spandonidis, C., Theodoropoulos, P., Giannopoulos, F., Galiatsatos, N., & Petsa, A. (2022). Evaluation of deep learning approaches for oil & gas pipeline leak detection using wireless sensor networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 113, 104890. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104890>
28. Taheri, E., Yousefinejad, S., & Dehghani, F. (2024). Investigation of some effective factors on urinary metabolites in biological monitoring of benzene, toluene, and xylene compounds. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(16), 3897–3912. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2097871>
29. Villalobos-Morales, J. A., Mora-Barrantes, J. C., Sibaja-Brenes, J. P., Zárata-Montero, G., Alfaro-Solís, R., Borbón-Alpizar, H., & Retana-Díaz, A. (2024). Evaluacion de la exposición laboral a compuestos orgánicos volátiles (COV). Caso de estudio en una empresa química. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i3.6837>

30. Wami-Amadi, C. F. (2025). The Impact of Air Borne Toxins from Gas Flaring on Cardiopulmonary and Other Systemic Functions. *Sch Int J Anat Physiol*, 8(1), 12-28. <https://doi.org/10.36348/sijap.2025.v08i01.003>
31. William, S. M. N. (2021). Benzene Exposure on Rig X from Drilling Fluid and Effectiveness of Local Exhaust Ventilation Paparan Benzene pada Rig X dari Drilling Fluid dan Keefektifan Local Exhaust Ventilation. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 10(3), 343-349. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v10i3.2021.343-349>
32. Wollin, KM., Damm, G., Foth, H. et al. Critical evaluation of human health risks due to hydraulic fracturing in natural gas and petroleum production. *Arch Toxicol* 94, 967–1016 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02758-7>
33. ZAHRA, B., & An-Jin, C. H. O. (2025). A STUDY ON EMISSION CHARACTERISTICS AND IMPACT ANALYSIS OF ODOR COMPOUNDS AND GASEOUS VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS FROM LANDFILLS. *Journal of Wellbeing Management and Applied Psychology*, 8(2), 7-19. <https://doi.org/10.13106/jwmap.2025.Vol8.no2.7>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).