



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**PROPUESTA DE MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL
RELACIONADA A LAS EMISIONES DE GAS NATURAL EN POZOS
PETROLEROS DEL ORIENTE ECUATORIANO**

AUTOR

Méndez Rodríguez Mauricio Andrés

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN MODALIDAD DE INFORME DE
INVESTIGACIÓN**

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS

TUTOR

Ph.D. Carrión Mero Paúl Cesar

La Libertad, Ecuador

Año 2026



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ph.D. Álvarez Acosta Roxana
COORDINADORA(E) DEL PROGRAMA**

**Ph.D. Carrión Mero Paúl
TUTOR**

**Ph.D. Villegas Salavarría José
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ph.D. González Maya Jaime
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ab. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Mauricio Andrés Méndez Rodríguez**, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en **PETRÓLEOS**

TUTOR

Ph.D. Carrión Mero Paúl Cesar

21 días del mes de febrero del año 2026



UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA

DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

INSTITUTO DE POSTGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Mauricio Andrés Méndez Rodríguez

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, “Propuesta de mitigación del impacto ambiental relacionada a las emisiones de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano” previo a la obtención del título en Magíster en **PETRÓLEOS**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 21 días del mes de febrero del año 2026

EL AUTOR

Mauricio Andrés Méndez Rodríguez



UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado “Propuesta de mitigación del impacto ambiental relacionada a las emisiones de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano”, presentado por el estudiante, **Mauricio Andrés Méndez Rodríguez** fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ph.D. Carrión Mero Paúl Cesar



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, Mauricio Andrés Méndez Rodríguez

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 21 días del mes de febrero del año 2026

EL AUTOR

Mauricio Andrés Méndez Rodríguez

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi soporte en este proceso de aprendizaje. A la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por permitirme ser parte de su alma mater y sus prestigiosos docentes, quienes aportaron el conocimiento necesario para avanzar en este camino.

Agradezco a mi familia, y en especial a mi esposa, Milady Dávila por su apoyo en este proceso de aprendizaje, por ser un apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida y motivarme en cada etapa.

Extiendo un saludo de gratitud a mis amigos y compañeros por el apoyo desde el inicio de este camino, por confiar en mí, ayudarme y apoyarme en todo momento.

Mauricio Andrés, Méndez Rodríguez

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a todas aquellas personas que, día a día, luchan con valentía y perseverancia por salir adelante. A quienes, a pesar de las adversidades, no se rinden ante las dificultades que impone un mundo muchas veces injusto y cruel. A quienes transforman el cansancio en fuerza, el miedo en esperanza y los obstáculos en aprendizajes.

Esta dedicatoria es para quienes trabajan en silencio, para quienes caen y se levantan con más determinación, para quienes creen en sus sueños aun cuando el camino parece incierto. Que este esfuerzo académico represente un reconocimiento a su constancia, a su fe en el futuro y a su incansable deseo de superación.

Mauricio Andrés, Méndez Rodríguez

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del problema de investigación.....	1
1.2 Formulación de la pregunta del problema de investigación	4
1.3 Operacionalización de la hipótesis – variables del estudio.....	5
1.3.1 Operacionalización de la hipótesis	5
1.3.2 Operacionalización de las variables.....	5
1.4 Objetivo General:.....	8
1.5 Objetivos Específicos:	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9

2.1	Gas natural	9
2.2	Tipos de Gas Natural	10
2.2.1	Por su lugar de procedencia	10
2.2.2	Por su composición	11
2.2.3	Por su almacenamiento	12
2.3	Liberación controlada y no controlada de gas	12
2.4	Beneficios y efectos negativos del gas natural	14
2.5	Gas natural en la industria energética	15
2.6	Cuenca Oriente	16
2.7	Gas Natural en el Oriente ecuatoriano	16
2.8	Efectos del gas natural	16
2.8.1	Impacto ambiental en la producción	17
2.9	Emisiones de gas natural durante la producción de petróleo	17
2.10	Impactos ambientales de las emisiones de gas natural en Ecuador	19
2.11	Normativa y Regulación Ambiental en Ecuador	21
2.12	Investigaciones Secundarias	24
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		26
3.1	Fase I: Búsqueda y obtención de datos	27
3.2	Fase II: Revisión sistemática	28
3.3	Fase III: Propuestas de mitigación	29
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		30
4.1	Impactos ambientales.....	30
4.2	Tecnologías y prácticas sostenibles en la gestión del gas natural.....	32

4.2.1.	Reinyección / valorización de gas asociado	32
4.2.2.	Recuperación de líquidos del gas (NGLs) y aumento del GLP	32
4.2.3.	Tecnologías para minimizar/mejorar el flare (mecheros de alta eficiencia y lineamientos).....	32
4.2.4.	Monitoreo de metano con drones y sensores (IoT / remote sensing).....	33
4.2.5.	Mecheros de quema de gas asociado (“mecheros ecológicos”)	33
4.2.6.	Biorremediación.....	34
4.2.7.	Remediación ambiental convencional / cierre de piscinas	34
4.3	Deficiencias en la gestión del gas en la Amazonía Ecuatoriana.....	38
4.3.1	Instalaciones obsoletas / adaptadas.....	38
4.3.2	Falta de aplicación de tecnologías limpias / aprovechamiento de gas (nivel normativo).....	38
4.4	Estrategias de mitigación	39
4.4.1.	Mitigación para el componente aire.....	40
4.4.2.	Sistemas cerrados de venteo y antorchas inteligentes	41
4.4.3.	Estrategias de mitigación social y sanitaria	41
4.4.4.	Aprovechamiento energético del gas asociado.....	42
CONCLUSIONES		42
RECOMENDACIONES		45
BIBLIOGRAFÍA		46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Reservorio de gas asociado	10
Figura 2: Reservorio de gas asociado	11
Figura 3: Diagrama de presión – temperatura para un yacimiento de gas húmedo.....	11
Figura 4: Reducción de emisiones de metano en la industria de petróleo y gas.....	13
Figura 5: Diagrama de la cadena de valor del gas natural y división ilustrativa	14
Figura 6: Pluma de metano detectada por Sentinel-5P	17
Figura 7: Penacho superemisor de metano observado en una explotación petrolífera ..	18
Figura 8: Proceso Metodológico	26
Figura 9: Registros identificados	28
Figura 10: Comparación cualitativa de impacto ambiental según tecnología usadas en la actividad petrolera.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de la hipótesis	7
Tabla 2: Constitución del Gas Natural.....	9
Tabla 3: Impacto ambiental al componente aire	30
Tabla 4: Comparación de propuestas de mitigación de relación con otros países.....	34
Tabla 5: Comparación económica de las propuestas con experiencias internacionales .	36

RESUMEN

Las emisiones de gas natural en los pozos petroleros del Oriente ecuatoriano constituyen una de las principales fuentes de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero ya que concentran aproximadamente el 80,2 % de la producción nacional de hidrocarburos, esto genera cerca de 450 millones de pies cúbicos diarios de gas natural. De este volumen, entre 55 y 70 millones de pies cúbicos diarios no son aprovechados. La limitada aplicación de tecnologías modernas y las deficiencias en los sistemas de monitoreo han incrementado los impactos ambientales y sociales. El siguiente estudio está diseñado para generar estrategias y proponer tecnologías sostenibles, realizando una revisión de normativa ecuatoriana y base documental para la mitigación del impacto ambiental asociado a la quema de gas natural en pozos petroleros. La metodología utilizada abarcó tres fases: i) búsqueda y obtención de información en bases académicas especializadas, ii) revisión sistemática de documentos científicos y técnicos, y iii) formulación de propuestas de mitigación bajo el enfoque de la jerarquía de mitigación ambiental, complementada con criterios de expertos. Los resultados evidencian impactos significativos sobre la calidad del aire, por la presencia de más de 400 mecheros activos y la identificación de 295 puntos de flaring no registrados oficialmente. Además, se evidencian deficiencias asociadas a instalaciones obsoletas y la falta de aplicación de tecnologías limpias. La propuesta estratégica incluye trabajos de mitigación social y sanitaria, recuperación de líquidos del gas lo cual generaría un aumento del 30% en la generación de GLP, sistemas cerrados de venteo y antorchas inteligentes con eficiencias superiores al 99 %, y el aprovechamiento energético del gas con un potencial estimado de 70 MWh, permitirán una reducción sustancial de emisiones y riesgos operativos. Los resultados demuestran que, desde un enfoque de mitigación, alineado con la normativa ambiental ecuatoriana e internacionales, es técnica y ambientalmente viable, y genera una alternativa efectiva para reducir el impacto ambiental de la explotación petrolera y dirigir una gestión más responsable y sostenible del gas en el oriente ecuatoriano.

Palabras claves: Gas natural, Impacto ambiental, Mitigación, Amazonia Ecuatoriana, Industria petrolera, Quema de gas natural.

ABSTRACT

Natural gas emissions from oil wells in the Ecuadorian Amazon constitute one of the main sources of atmospheric and greenhouse gas emissions, as they account for approximately 80.2% of the country's hydrocarbon production, generating around 450 million cubic feet of natural gas per day. Of this volume, between 55 and 70 million cubic feet per day are not utilized. The limited application of modern technologies and deficiencies in monitoring systems have increased the environmental and social impacts. This study is designed to generate strategies and propose sustainable technologies by reviewing Ecuadorian regulations and existing documentation for mitigating the environmental impact associated with natural gas flaring in oil wells. The methodology employed comprised three phases: i) searching for and obtaining information from specialized academic databases, ii) systematically reviewing scientific and technical documents, and iii) formulating mitigation proposals based on the environmental mitigation hierarchy approach, supplemented by expert opinions. The results show significant impacts on air quality, due to the presence of more than 400 active flares and the identification of 295 officially unregistered flaring points. Furthermore, deficiencies associated with outdated facilities and the lack of implementation of clean technologies are evident. The strategic proposal includes social and health mitigation measures, gas liquids recovery (which would generate a 30% increase in LPG production), closed venting systems and smart flares with efficiencies exceeding 99%, and the energy recovery of gas with an estimated potential of 70 MWh. These measures will allow for a substantial reduction in emissions and operational risks. The results demonstrate that, from a mitigation perspective aligned with Ecuadorian and international environmental regulations, the proposal is technically and environmentally viable and provides an effective alternative for reducing the environmental impact of oil exploitation and promoting more responsible and sustainable gas management in eastern Ecuador.

Keywords: Natural gas, Environmental impact, Mitigation, Ecuadorian Amazon, Oil industry, Natural gas flaring.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El sector petrolero desempeña un papel crucial en el desarrollo económico mundial. Las actividades de extracción, refinación y transporte de hidrocarburos generan ingresos fiscales, empleo, inversiones en infraestructura y divisas para muchos países, y actúan como motor para la industrialización, el comercio internacional y la seguridad energética global. Asimismo, el libre flujo de petróleo facilita el transporte, el suministro de energía constante y la estabilidad macroeconómica, lo que lo convierte en un componente esencial del crecimiento económico (Stevens, 2018).

Los impactos ambientales y sociales generados por la explotación petrolera no se pueden dejar en el olvido. En las regiones sensibles como el Oriente ecuatoriano la explotación petrolera causa deforestación, contaminación del suelo, aire y aguas. Un caso puntual que se puede mencionar es en la parte del Oriente ecuatoriano donde más del 60 % de su territorio está dado a concesión petrolera, por esta razón se ha generado un riesgo alto sobre la biodiversidad y las poblaciones cercanas a dichas concesiones. Las comunidades locales suelen sufrir problemas de salud, pérdida de medios de vida tradicionales y fragmentación social (González et al., 2020).

En lo que respecta al gas natural asociado, su mala gestión, como la quema (flaring) y la liberación (venting), constituye un problema grave para la salud humana, los ecosistemas y el clima. La Environmental Defense Fund y otras instituciones han estimado que la quema y liberación de gas en actividades de petróleo y gas generan miles de muertes prematuras, decenas de miles de exacerbaciones de asma infantil y daños que ascienden a miles de millones de dólares en salud pública. Estos procesos también liberan metano, un potente gas de efecto invernadero, además de partículas finas (PM2.5), ozono troposférico y óxidos de nitrógeno, que van deteriorando la calidad del aire y afectando la salud cardiovascular y respiratoria (Tran et al., 2023).

La situación del gas en el oriente ecuatoriano refleja una situación particular puesto que el gas que aflora en la región no corresponde a una producción industrial independiente de gas, sino que es un subproducto de la producción de petróleo. Uno de estos casos es el que se presenta

en la provincia de Orellana, donde pese a tener sentencias judiciales que ordenan su desaparición. los mecheros de gas siguen operando. También varias regiones los pueblos indígenas se han manifestado y denunciado que las explotaciones petroleras han afectado sus derechos, su salud y los ecosistemas (Amazon, 2025).

Para evitar seguir contaminando con la quema del gas natural, se tiene que avanzar generando o implementando tecnologías que nos permitan la captura y aprovechamiento del gas que aún se quema o libera, mediante sistemas de compresión, reinyección o procesamiento. Para poder lograr esto se requieren normativas más estrictas en la legislación ecuatoriana junto a los estándares y regulaciones internacionales para lograr la reducción de quema y venteo de gas, junto con nuevas leyes que exijan el monitoreo y reporte de emisiones, idealmente con datos verificables y trazable(Bedolla et al., 2020).

Ya que en la actualidad hay una demanda de gas natural como recurso energético esto ha generado la producción de hidrocarburos en diversas regiones, incluyendo los pozos petroleros del Oriente Ecuatoriano. Sabiendo que el gas natural es una alternativa más limpia en comparación con otros combustibles fósiles, su producción implica importantes desafíos ambientales como: la emisión de gases de efecto invernadero, la quema ineficiente de gas asociado y la inadecuada gestión de residuos industriales.

Debido a la falta de sistemas avanzados de control, tecnología obsoleta y sistemas de captura ineficientes los pozos del oriente ecuatoriano representan un riesgo ambiental, también afectan directamente la viabilidad operativa y económica a largo plazo.

Para esto se debe optimizar los procesos de producción de gas natural para disminuir el impacto ambiental en esta zona de conservación. Se debe incorporar tecnologías más eficientes y sostenibles que permitan minimizar las emisiones y mejorar la gestión de residuos, permitiendo al mismo tiempo el cumplimiento de normativas ambientales y la sostenibilidad operativa.

Debido a esto, se debe perfeccionar los procesos de producción de gas natural, incorporando tecnología de vanguardia y sostenibles que permitan reducir o eliminar las emisiones de contaminantes y administrar de manera eficaz los residuos del proceso, manteniendo los estándares de producción necesarios.

1.1 Formulación del problema de investigación

La presencia de gas natural en el oriente ecuatoriano no corresponde a una producción industrial independiente, sino que proviene principalmente como subproducto asociado a la extracción de petróleo en campos ubicados dentro de ecosistemas amazónicos de altísima sensibilidad ecológica y en proximidad a poblaciones indígenas y comunidades colonas. La gestión histórica de este gas asociado incluyendo prácticas de venteo y quema en mecheros junto con la generación y manejo de las aguas de producción, ha dejado una huella documentada en la calidad del aire y del agua, así como en la salud pública de las poblaciones locales. Esto también contribuye al calentamiento global mediante emisiones de metano (CH_4), el cual posee un potencial de calentamiento mayor que el del dióxido de carbono (CO_2). Según la información científica disponible para Ecuador y el oriente ecuatoriano, señala riesgos para la biodiversidad y pueblos locales, incluyendo contaminación suelo, aire y fuentes de agua potable en zonas de producción hidrocarburífera (Finer et al., 2008).

Cuando el gas es quemado (flaring), este sistema libera metano (CH_4) no quemado. Mediciones top-down han demostrado que las emisiones de metano en cadenas organización de gas y petróleo (O&G) pueden ser del 60% más elevados que los inventarios oficiales, lo que dificulta la estimación del impacto climático de la quema del gas (Álvarez et al., 2018).

En el oriente ecuatoriana se reportan efectos nocivos vinculados a la actividad petrolera, por ello el revisar, mitigar emisiones y reducir los vertidos disminuye los contaminantes atmosféricos y del agua. Revisiones recientes muestran impactos respiratorios y cardiovasculares asociados a la producción de gas natural (Sebastián & Hurtig, 2004).

Existe el potencial técnico económico para aprovechar el gas asociado en la Amazonía ecuatoriana, lo que alinea objetivos ambientales con beneficios económicos locales (Ortiz et al., 2023). El metano tiene un alto potencial de calentamiento en 20–100 años y una vida media atmosférica de 12 años, reducir rápidamente el metano (CH_4) ofrece beneficios climáticos inmediatos y con beneficios sanitarios (IPCC, 2023).

Gracias a registros históricos se tiene conocimientos de manejos lo cual a provocado aun en la actualidad contaminación persistente, los archivos del ministerio de salud pública local describen los daños y enfatizan los medios necesarios para la (Sebastián & Hurtig, 2004).

En la metodología de reporte no se considera las super emisiones ni las fugas intermitentes de metano, lo que dificulta la identificación de puntos prioritarios para la mitigación y la estimación de costos. (Ochoa & Rivera, 2021). El oriente ecuatoriano se concentra una biodiversidad única y pueblos en alto riesgo frente a impactos ambientales, dejando claro que cualquier falla operacional tiene un alto costos ecológicos y sociales (Finer et al., 2008).

Para la quema y venteo en el oriente ecuatoriano hace falta tecnologías actuales para el manejo adecuado del gas natral, así como la actualización de los sistemas de monitoreo y control de emisiones fugitivas, lo que produce un aumento en el impacto ambiental y social. En 2022 se identificaron mediante mapeo participativo 295 sitios de gas flaring previamente no reportados y observaron que los datos oficiales solo muestran alrededor del 24 al 33 % de los sitios reales, señalando que muchas emisiones no son detectadas por los sistemas existentes (Facchinelli et al., 2022).

A continuación, se muestra tecnologías ausentes o insuficientes y su contribución a la contaminación:

- Sin el Sistema de recuperación de gas de venteo/flare gas recovery (FGRU) se quema o vendea gas asociado generando dióxido de carbono (CO₂), grupo de gases compuestos por óxidos de nitrógeno (Nox) y metano (CH₄) no quemado. La instalación reduce quema rutinaria y captura gas para uso energético.
- Los compresores y líneas de recolección para cero venteos son escasos en los gasoductos de baja presión y compresión local, lo que obliga a venteos intermitentes, con recolección se eliminaría el “choke & vent”.
- Las antorchas cerradas y antorchas de bajo NOx tienen baja eficiencia de destrucción, los combustores cerrados superan el 99 % de DRE y minimizan luz/ruido.
- La ausencia de Mini-GNL obliga a quemas; el gas se puede licuar/comprimir para uso local o despacho por camión.
- Sin los LDAR avanzados, las fugas en válvulas, bridas y tanques persisten, con OGI y sensores continuos se detectan y corrigen rápidamente.

1.2 Formulación de la pregunta del problema de investigación

¿Cómo articular una propuesta de mitigación del impacto ambiental, relacionada a quema de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano, considerando la reducción de emisiones

fugitivas de metano, la disminución del venteo y la quema en mecheros, de manera que se minimicen los riesgos para el ambiente y se aproveche este recurso para la generación energética?

1.3 Operacionalización de la hipótesis – variables del estudio

A partir de la pregunta de investigación se realizó la operacionalización de la hipótesis y variables del estudio. La tabla (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) resume la hipótesis de la investigación, las variables independientes (X) y dependiente (Y), y los lineamientos de indicadores que orientaran al estudio.

1.3.1 Operacionalización de la hipótesis

La aplicación de estrategias y tecnologías sostenibles en el Oriente Ecuatoriano contribuirá a reducir el impacto ambiental asociado a la quema de gas natural significativamente, favoreciendo al equilibrio entre el desarrollo energético y la conservación del entorno amazónico.

1.3.2 Operacionalización de las variables

La operacionalización de las variables se realizó con el propósito de establecer los aspectos técnicos y ambientales. Esto permitirá analizar la relación entre la aplicación de estrategias y tecnologías sostenibles y la reducción del impacto ambiental generado por la quema de gas natural. La investigación es de tipo documental y no experimental, por ello las variables se analizaron mediante la revisión sistemática de literatura científica, normativa ambiental, grupo focal e informes técnicos especializados.

Operacionalización de la variable independiente

Variable:

- Estrategias y tecnologías sostenibles aplicadas a la gestión del gas natural

Dimensiones:

- Tecnologías de mitigación ambiental
- Gestión sostenible del gas natural
- Cumplimiento normativo ambiental

Indicadores:

- Implementación de sistemas de recuperación y aprovechamiento del gas natural.
- Uso de antorchas de alta eficiencia y sistemas cerrados de venteo.
- Aprovechamiento energético del gas natural (generación eléctrica, GLP, Mini-GNL).
- Alineación con la normativa ambiental ecuatoriana y estándares internacionales.

Técnica:

Revisión documental y análisis comparativo de estudios técnicos, científicos y normativos.

Fuente de información:

Artículos científicos, informes técnicos, normativa ambiental ecuatoriana y literatura especializada.

Operacionalización de la variable dependiente**Variable:**

- Impacto ambiental asociado a la quema de gas natural en el oriente ecuatoriano.

Dimensiones:

- Emisiones atmosféricas
- Calidad del aire
- Riesgos ambientales y sociales

Indicadores:

- Niveles de emisiones de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂)
- Frecuencia e intensidad de prácticas de flaring y venting
- Afectación a ecosistemas amazónicos
- Riesgos para la salud de las comunidades cercanas

Técnica:

- Revisión sistemática de literatura científica y análisis ambiental comparativo.

Fuente de información:

- Estudios ambientales, investigaciones académicas, informes institucionales y bases de datos científicas.
- Revisión técnica con grupo focal.

Tabla 1: Operacionalización de la hipótesis

IMPACTO AL COMPONENTE AIRE	VARIABLES X y Y	LINEAMIENTOS DE INDICADORES
La aplicación de estrategias y tecnologías sostenibles en el Oriente Ecuatoriano contribuirá a reducir el impacto ambiental asociado a la quema de gas natural significativamente, favoreciendo al equilibrio entre el desarrollo energético y la conservación del entorno amazónico.	X: Estrategias y tecnologías sostenibles aplicadas a la gestión del gas natural en pozos petroleros del Oriente ecuatoriano. Y: Impacto ambiental generado por la quema de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano.	X1: Aprovechamiento e implementación de sistemas de recuperación gas natural. X2: Uso de sistemas cerrados de venteo y mecheros de alta eficiencia para la quema de gas natural. X3 Utilidad del gas natural para generar eléctrica y GLP. X4: Aplicación de la normativa nacionales e internacionales. Y1: Emisiones de CH ₄ y CO ₂ Y2: Prácticas de flaring y venting Y3: Daño al territorio del oriente ecuatoriano Y4: Afectación a la salud de las comunidades cercanas

Nota: La relación entre la variable independiente y la variable dependiente se establece a partir del análisis de cómo la aplicación de estrategias y tecnologías sostenibles en la gestión del gas natural contribuye a la reducción de las emisiones contaminantes y, en consecuencia, al impacto ambiental generado por la quema de gas natural en los pozos petroleros del Oriente ecuatoriano.

1.4 Objetivo General:

Proponer estrategias y tecnologías sostenibles, mediante la base documental y normativa ecuatoriana de optimización ambiental para la mitigación del impacto ambiental asociado a la quema de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano.

1.5 Objetivos Específicos:

- Analizar los principales impactos ambientales generados durante la quema de gas natural en pozos petroleros del Oriente Ecuatoriano, mediante la revisión de estudios técnicos, ambientales y normativos, para la identificación los factores críticos que afectan el entorno natural.
- Evaluar tecnologías y prácticas sostenibles aplicables a la gestión de gas natural, a través del análisis comparativo de experiencias internacionales y literatura especializada, para determinación de su viabilidad técnica y ambiental en el contexto ecuatoriano.
- Diseñar estrategias de mitigación ambiental orientadas a la mejora de la gestión de gas natural, mediante el uso planes de manejo ambiental, con el propósito de la disminución de emisiones, desperdicios y riesgos ambientales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Gas natural

El gas natural, al igual que el petróleo, se localiza en el subsuelo dentro de formaciones geológicas conocidas como yacimientos o trampas. Estas trampas pueden clasificarse según su origen: estructurales, cuando se forman por pliegues o fallas; estratigráficas, cuando surgen por la intercalación de capas porosas con rocas impermeables llamadas rocas sello; o mixtas, cuando se combinan estructuras como pliegues o fallas con variaciones en la porosidad de las rocas (UCV, 2008).

El gas natural, cuando se presenta en forma libre o no asociado al petróleo, también se encuentra frecuentemente en yacimientos petrolero está constituido principalmente por metano (CH_4), el hidrocarburo más simple. Además, puede contener otros compuestos más complejos y pesados como el etano (C_2H_6) y el propano (C_3H_8), los cuales pueden ser extraídos mediante diversos procesos para potenciar el valor energético del metano, dada su alta capacidad de combustión. Este gas también incluye otros elementos como agua, sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono, nitrógeno, helio y otras sustancias (Tabla 2: Constitución del Gas Natural) que actúan como diluyentes o impurezas (Méndez, 2006).

Tabla 2: Constitución del Gas Natural

Componente Químico	Formula	Estado	% en la Gas Natural	Pto. (a) Ebullición	Variación % mol
Metano	CH_4	Gas	88,5	-161,5	55,00-98,00
Etano	C_2H_6	Gas	5,5	-88,6	0,10-20,00
Propano	C_3H_8	Gas	2,1	-42,0	0,05-12,00
*n-Butano	C_4H_{10}	Gas	0,3	0,5	0,05-3,00
Iso-Butano	C_4H_{10}	Gas	0,6	-11,7	0,02-2,00
Iso-Pentano	C_5H_{12}	Líquido	0,4	36,0	0,01-0,80
Hexano	C_6H_{14}	Líquido	0,3	69,0	0,01-0,50
Heptano	C_7H_{16}	Líquido	0,3	98,0	0,01-0,40
Total en porcentaje:			98 (b)		
Nitrógeno	N_2	Gas		-195,8	0,10-0,50
Dióxido d/ carb.	CO_2	Gas		-78,5	0,20-30,00
Oxígeno	O_2	Gas		-183,0	0,09-0,30
Suf. d/Hidrógeno	H_2S	Gas		-60,3	Trazas-28,00
Helio	He	Gas			Trazas-4,00

Nota. Composición química típica del gas natural, indicando los principales hidrocarburos y componentes no hidro carburados, su estado físico, porcentaje en la mezcla, punto de ebullición y rangos de variación molar (Méndez, 2006).

2.2 Tipos de Gas Natural

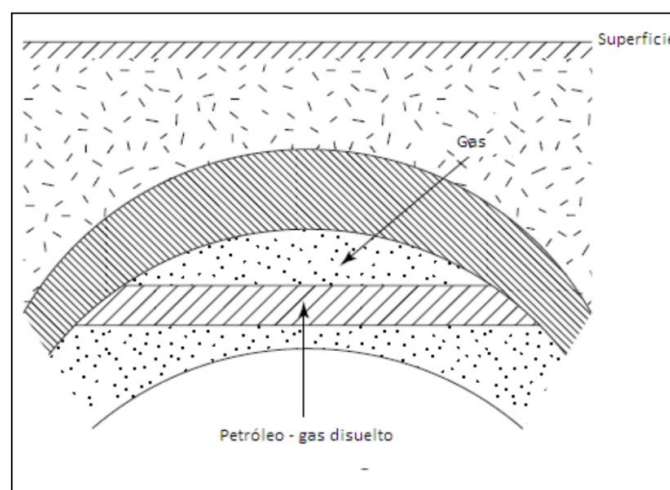
El gas natural es un compuesto no tóxico, incoloro e inodoro, constituido por una mezcla de hidrocarburos en la que su principal componente es el metano (CH_4), una molécula sencilla formada por 1 átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno (Iñesta et al., 2002). En su estado natural, el gas natural es incoloro e inodoro; por ello, se le añade un odorizante, generalmente mercaptano, para facilitar su detección en caso de fugas. Es un combustible fósil que se origina a partir de la descomposición de materia orgánica bajo condiciones de alta presión y temperatura durante millones de años. Su combustión es altamente eficiente y produce menos emisiones contaminantes en comparación con otros combustibles fósiles, lo que lo convierte en una fuente de energía más limpia. Gracias a estas características, el gas natural es ampliamente utilizado en la generación de energía (Rondón, 2012).

2.2.1 Por su lugar de procedencia

- *Gas asociado*

El gas asociado se encuentra en reservas petrolíferas (Figura 1), es decir es el gas que está en contacto con el petróleo.

Figura 1: Reservorio de gas asociado



Nota. Esquema de un yacimiento petrolero con gas asociado, mostrando la distribución del gas libre en la parte superior del reservorio y el petróleo con gas disuelto en capas inferiores bajo la superficie (Rojey, 2002).

El gas asociado puede estar como gas libre o gas disuelto

- *Gas Libre*

Permanece sobre el crudo, corresponde al casquete de gas del reservorio que ejerce presión sobre el crudo en la recuperación primaria del proceso de producción (Cronquist, 2001).

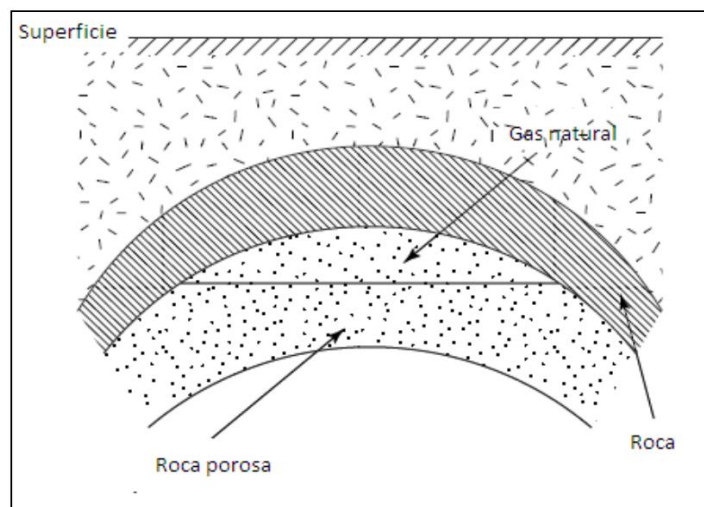
- *Gas Disuelto*

Está en solución con el crudo, a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento. La presencia del gas disuelto en el petróleo hace que aumente el volumen y la gravedad API del crudo, reduciendo la viscosidad y la tensión superficial (Cronquist, 2001).

- *Gas no asociado o libre*

El gas no asociado al petróleo se encuentra en yacimientos gasíferos (Figura 2), es decir no hay presencia de crudo, está atrapado en el reservorio por rocas porosas impermeables

Figura 2: Reservorio de gas asociado



Nota. Esquema de un yacimiento de gas natural, donde se observa la acumulación de gas en una roca porosa confinada por capas de roca impermeable bajo la superficie terrestre (Rojey, 2002).

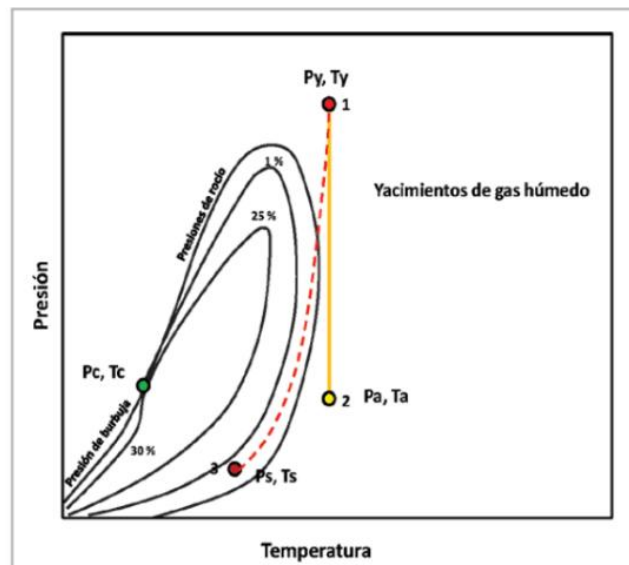
2.2.2 Por su composición

- *Gas húmedo*

El gas húmedo es aquel que contiene un porcentaje de hidrocarburos superiores y puede producir una fase líquida por variaciones de temperatura y presión. Estos yacimientos se encuentran en

estado gaseoso, por características específicas de presión, temperatura y composición, el gas está mezclado con otros hidrocarburos líquidos; se dice que se halla en estado saturado (Figura 3). Durante la producción del yacimiento, la presión disminuye y permite que el gas se condense en petróleo líquido, el cual al unirse en forma de película a las paredes de los poros queda atrapado y no puede ser extraído. Esto puede evitarse inyectando gas a fin de mantener la presión del yacimiento (Castro et al., 2011).

Figura 3: Diagrama de presión – temperatura para un yacimiento de gas húmedo



Nota. Diagrama presión–temperatura de un yacimiento de gas húmedo, que muestra el comportamiento de fases del fluido y las condiciones de presión y temperatura durante la producción (Rojey, 2002).

- Gas seco

2.2.3 Por su almacenamiento

- Gas natural comprimido
- Gas natural licuado

2.3 Liberación controlada y no controlada de gas

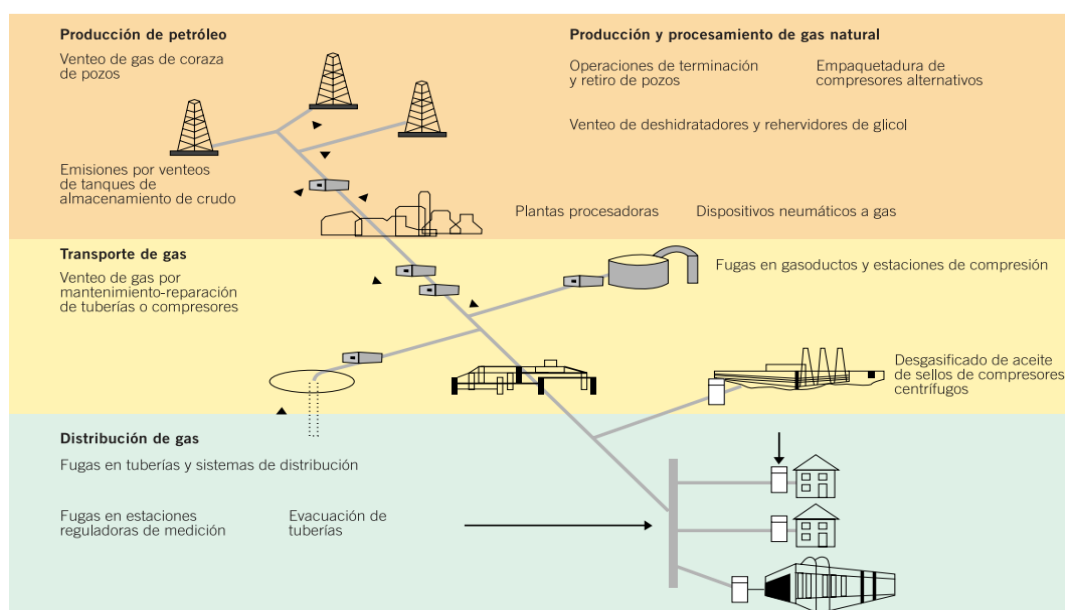
Las emisiones se categorizan en tres principales fuentes:

- Venteo Es una expulsión deliberada para disminuir la presión, la quema con antor

- Quema con antorcha (flare)
- Fugas no deliberadas

Esquema de la cadena de valor del gas natural (Figura), que identifica las principales etapas de producción, procesamiento, transporte y distribución, así como los puntos críticos de emisiones por venteo y fugas asociadas a cada fase

Figura 4: Reducción de emisiones de metano en la industria de petróleo y gas



Nota. Principales etapas de producción, procesamiento, transporte y distribución del gas (Michaels et al., 2022).

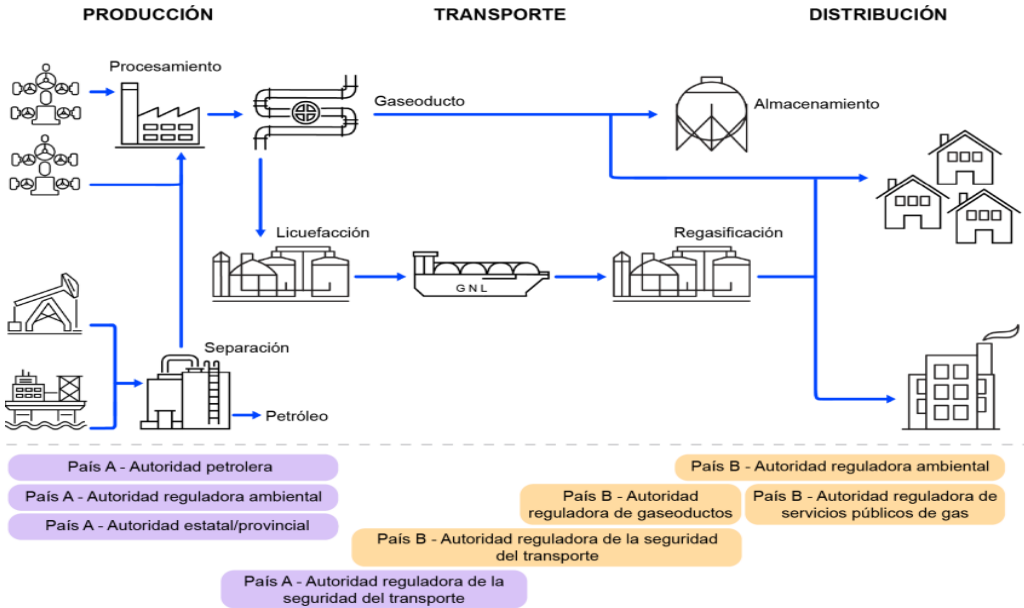
Las mediciones top-down en zonas petroleras revelaron que el nivel de emisión de metano puede ser hasta 16 veces superior al reportado por las empresas, dado que estas se apoyan en prácticas de abajo hacia arriba que minimizan las fugas pequeñas pero constantes. Las plataformas offshore son particularmente susceptibles; un informe en España muestra mega fugas calculadas entre 9.2 – 4.6 ton/h desde plataformas de petróleo en alta mar, lo que provoca alertas ecológicas inmediatas (Paule et al., 2024).

Un reporte de la EPA en Bogotá registra que, en las labores de finalización de pozos, limpiezas y ventilación de cabezales de petróleo, se identificaron fugas de gas vinculadas a compresores y válvulas, corroborando que la producción activa es un generador permanente de emisiones

gasíferas (Bylin, Emisiones de Metano en el Sector de Petróleo y Gas Natural: Contexto Internacional, 2012).

El siguiente diagrama (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), muestra los procesos de separación, procesamiento, licuefacción, regasificación y entrega al consumidor final, así como las autoridades regulatorias involucradas en cada etapa.

Figura 5: Diagrama de la cadena de valor del gas natural y división ilustrativa



Nota. Diagrama del sistema de producción, transporte y distribución del gas natural (Michaels et al., 2022).

El programa de Natural Gas STAR de Estados Unidos, avalado por la EPA desde 1993, ha conseguido disminuir miles de millones de metros cúbicos de metano mediante la aplicación de tecnologías de baja emisión (válvulas, sistemas secos, detección JDAR) en operaciones de petróleo y gas, incluyendo la producción de crudo con gas asociado (Plauchú y Bylin , 2009).

En países con sistemas fiscales de emisiones como Noruega, se aplica un gravamen al gas liberado durante la producción marina de petróleo, incentivando su captura y uso en vez del venteo o flameo (Michaels et al., 2022).

2.4 Beneficios y efectos negativos del gas natural

El uso del gas natural tiene muchos beneficios frente al uso de combustibles líquidos. Así, podemos enumerar.

1. Economía, debido a que se encuentra en estado natural, el procedimiento de obtención no es compleja.
2. Distribución del lugar de producción a los consumidores mediante conductos.
3. No es tóxico.
4. Facilidad de medición.
5. No requiere almacenamiento por consumidor.
6. La combustión no genera contaminación medio ambiente.
7. La generación de fuego es inmediata.
8. Fácil mantenimiento de los equipos.
9. La llama es controlable.

Las desventajas que pueda presentar son las siguientes:

- El peligro de generación de incendio.
- Problemas respiratorios por producción de dióxido de carbono (CO₂).

2.5 Gas natural en la industria energética

En los últimos veinte años, el gas natural (GN) ha adquirido una posición destacada en la matriz energética global debido a su costo competitivo, su menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles y su disponibilidad relativa en diversas regiones del mundo. Tradicionalmente, el gas natural (GN) se extrae del subsuelo a través de perforaciones realizadas en yacimientos donde el gas se encuentra confinado en formaciones rocosas impermeables, ya sea de forma independiente, conocido como gas libre o en conjunto con petróleo, caso en el que se denomina gas asociado. En la actualidad, las posibilidades de obtención se han ampliado mediante la exploración y explotación de fuentes no convencionales, lo que ha permitido el incremento de reservas a nivel mundial (Lopez, 2014).

El consumo energético global se expresa comúnmente en términos de energía primaria, ya que abarca el conjunto de fuentes fundamentales empleadas para la generación de servicios energéticos. A lo largo de los últimos dos siglos, la demanda de energía primaria se ha incrementado en un factor de veinte, mientras que la población mundial se ha sextuplicado. Este notable incremento guarda una relación directa con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico, particularmente en las naciones industrializadas (CEDA, 2011).

Diversos estudios y proyecciones sobre la evolución de la demanda energética a nivel global coinciden en que el mayor crecimiento en el consumo de energía provendrá de las naciones en vías de desarrollo. Estos análisis también resaltan la dificultad de sustituir, en el corto y mediano plazo, el uso creciente de combustibles fósiles principalmente petróleo, gas natural y carbón que continuarán representando entre el 65% y 70% de la matriz energética mundial en los próximos 20 años. En este escenario, se considera que la mayoría de las reservas de petróleo fácilmente accesibles y de bajo costo ya han sido identificadas y explotadas (Franca et al., 2013).

2.6 Cuenca Oriente

La Cuenca Oriente del Ecuador, situada al este de la cadena montañosa de los Andes y restringida al este por el escudo Guayanés, es una cuenca de antepaís compuesta por varios ciclos tectónicos sedimentarios desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. Su procedencia extensional en el Triásico-Jurásico se transformó en un sistema compresivo en el Cenozoico, lo que derivó en estructura complejas de retroarco con defectos normales profundos y pliegues típicos de un asentamiento móvil (Yang et al., 2024).

2.7 Gas Natural en el Oriente ecuatoriano

La Cuenca del Oriente, ubicada en la región amazónica de Ecuador, es una formación sedimentaria generada por la antigua subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Esto se debe a la acumulación de sedimentos provenientes de la cordillera, lo cual forma rocas porosas como las areniscas, especialmente de las formaciones Napo, la cual actúan como reservorios para hidrocarburos. Los yacimientos de la zona de Shushufindi - Aguarico, que se descubrieron en 1969, son un claro ejemplo de estas condiciones, con areniscas U y T inferiores que presentaron reservas probadas de 1.580 millones de barriles de crudo y un acompañamiento de gas natural asociado (Litherland et al., 1994).

2.8 Efectos del gas natural

A pesar de sus ventajas energéticas, la generación de gas natural produce efectos ambientales considerables, en particular en ecosistemas vulnerables como la Amazonía. Dentro de los efectos adversos más significativos se incluyen la liberación de gas de efecto invernadero como el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), la quema de gas relacionado, expulsión de gases y la polución de derrames o desechos operativos (Weyant et al., 2016).

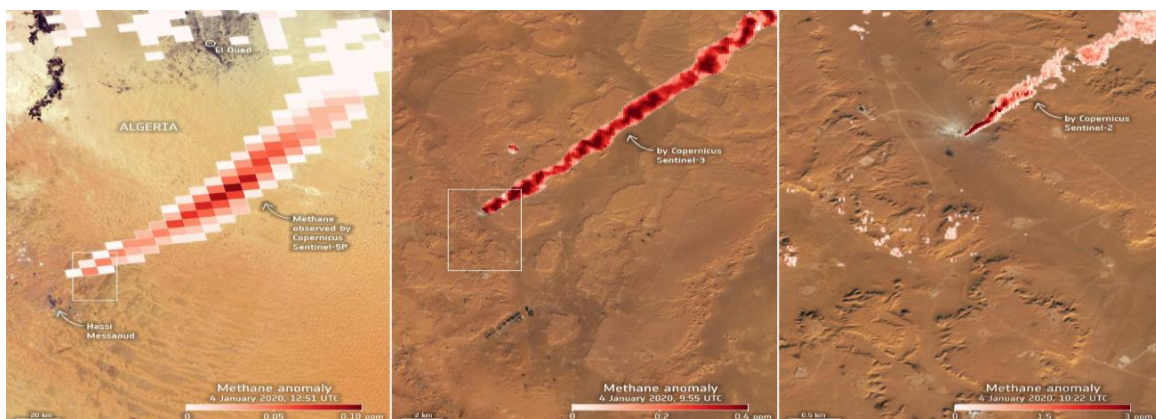
2.8.1 Impacto ambiental en la producción

La generación de gas natural, a pesar de ser menos contaminante que otros combustibles fósiles, produce consecuencias perjudiciales si no se maneja correctamente. En el Oriente ecuatoriano, con ecosistemas delicados, la combustión de gas relacionado (Flaring), la liberación directa (Venting) y las fugas (emisiones fugitivas) se presentan como fuentes significativas de gases de efecto invernadero, en particular en metano (CH_4). Además, el inadecuado manejo de los desechos líquidos propios de la actividad petrolera, principalmente las aguas de producción, lodos de perforación y fluidos residuales, (aguas de formación, aguas de producción conteniendo hidrocarburos y sales) y las filtraciones involuntarias provenientes del sistema de pozos, de fosas de desecho o del transporte de hidrocarburos, puede generar contaminación de cuerpos de agua, degradación de suelos y afectaciones a la biodiversidad local.

2.9 Emisiones de gas natural durante la producción de petróleo

En el proceso de producción de petróleo, el gas natural vinculado (una combinación de metano con otros hidrocarburos) se libera de forma no deliberada mediante el venteo y escapes en cabezales, válvulas y dispositivos operativos. Este gas, en caso de no ser controlado, se emite directamente a la atmósfera, afectando el clima debido a su considerable potencial para aumentar el calentamiento global. El IPPCC calculan que las emisiones en pozos pueden exceder el 5% del gas obtenido, en función de cada operación, en la (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se muestra una pluma de emisión asociada a infraestructura petrolera, identificada mediante sensores Copernicus Sentinel, evidenciando liberaciones significativas de gas a la atmósfera. (Carras et al., 2006).

Figura 6: Pluma de metano detectada por Sentinel-5P



Nota. Imágenes satelitales de detección de anomalías de metano (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2023).

En una investigación mundial acerca de “Ultras Emisores” donde se tiene fugas masivas y medibles por satélite, se descubrió que entre el 8% y el 12% del metano obtenido del petróleo y gas se origina de estas emisiones anómalas durante la producción primaria, lo que contribuye una estrategia crucial para una mitigación eficaz. En la (Figura 7) se muestra concentraciones y aumentos de metano observados desde el espacio (Carras et al., 2006).

Impactos ambientales de las emisiones de gas natural en Ecuador

1. Emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄).

En Ecuador, en 86,88 % de las emisiones de gases de efecto invernadero son causadas por el uso de combustible fósiles. La producción y el consumo de hidrocarburos, que abarcan actividades como la extracción, la refinación y el transporte, emiten más de lo que el medio ambiente puede absorber de forma natural. Por eso, este fenómeno incide directamente en la salud humana, en la biodiversidad y en el clima (Palacios, Estimación de Gases de Efecto Invernadero en la Perforación y el Workover de Pozos Petroleros: Caso Ecuador, 2022).

Figura 7: Penacho superemisor de metano observado en una explotación petrolífera



Nota. Detección satelital de emisiones de metano en Libia (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2023).

2.10 Impactos ambientales de las emisiones de gas natural en Ecuador

Emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄).

En Ecuador, en 86,88 % de las emisiones de gases de efecto invernadero son causadas por el uso de combustible fósiles. La producción y el consumo de hidrocarburos, que abarcan actividades como la extracción, la refinación y el transporte, emiten más de lo que el medio ambiente puede absorber de forma natural. Por eso, este fenómeno incide directamente en la salud humana, en la biodiversidad y en el clima (Palacios, Estimación de Gases de Efecto Invernadero en la Perforación y el Workover de Pozos Petroleros: Caso Ecuador, 2022).

Desde que se comenzó a extraer petróleo en Ecuador, un porcentaje significativo del gas natural asociado ha sido liberado al medio ambiente de manera de venteo o quemado. Esta práctica, además de constituir un despilfarro energético considerable, ha sido una fuente constante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los campos del nororiente. Un estudio de Instituto de Altos Estudios Nacionales (IAEN) informa que alrededor del 24,5% de la producción se captura para su uso operacional, mientras que el promedio diario de gas asociado quemado es de 7.4 millones de pies cúbicos como promedio por año (Pazos, 2008).

El flaring de gas asociado que se realiza de manera rutinaria en la Amazonía tiene consecuencias muy serias para el medio ambiente y la salud. En Lago Agrio, existen más de 400 flares que funcionan en la proximidad de áreas pobladas; gracias a una histórica demanda presentada por activistas en el 2021, se ordenó la erradicación de asentamientos de estos equipos alrededor de asentamientos humanos en un periodo de 18 meses y su total eliminación para el año 2030. No obstante, la implementación ha sido incompleta y tardía, lo que sigue manteniendo altos los niveles de contaminantes y de gases de efecto invernadero (GEI) (Brown, 2024).

El sector energético, especialmente en la extracción y la combustión de combustibles fósiles fue responsable del 47% del total de emisiones de gases de efecto invernadero en Ecuador durante el año 2012. El país ha admitido esto en sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), planteando medidas como la recolección de metano, el reemplazo de flaring y la utilización del gas para la producción de energía como tácticas de mitigación (World Bank, 2023).

Ecuador tiene como meta disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 12 % para el año 2026, en comparación con una situación sin medidas (BAU). Este plan abarca

proyectos de captura de metano para energía en vertederos, así como medidas de flare, el uso del gas para producir electricidad y estrategias orientadas a la eficiencia energética (World Bank, 2023).

Ecuador genera cerca de 35 millones de pies cúbicos diarios de gas natural y hasta 27 millones de pies cúbicos al día de gas asociado, lo que demuestra el tamaño de esta actividad extractiva y su posible efecto en el medio ambiente (Vicuña, 2011). Según el Inventario Nacional de GEI de Ecuador (2024), las emisiones fugitivas del sector de petróleo y gas natural aumentaron considerablemente, pasando de cero en 1994 a 67.9 kt CO₂ - eq en 2014, antes de volver a bajar en años siguiente (MAATE, 2024).

Las emisiones de gas natural y petróleo en Ecuador han tenido una variación significativa a lo largo de los años; por ejemplo, en 2010 fueron de 34.7 kt CO₂ – eq; para el 2022, sin embargo, alcanzaron los 37.7 kt, esto muestra que estas fuentes difusas son persistentes (MAATE, 2024). El gas natural tiene el potencial de ser promocionado como un combustible fósil que produce menos emisiones de gas de efecto invernadero que la gasolina o el diésel, lo cual sugiere su empleo en el transporte y el sector energético como una opción más sostenible (Posso, 2020).

Según la Tercera Comunicación Nacional de Ecuador ante la CMNUCC en el 2017, las emisiones nacionales llegaron aproximadamente hasta los 80504 Gg CO₂ – eq, lo que demuestra su participación en el cambio climático a nivel mundial (Alejandro y Mozo , 2023). Estos inventarios de GEI son cruciales para establecer acciones de disminución durante las operaciones extractivas y de workover, ya que muestran de manera clara cómo el consumo de combustibles fósiles en Ecuador afecta al 56.88 % del total de emisiones a nivel nacional (Palacios, 2022).

Emisión de contaminantes atmosféricos (NO_x, SO₂, partículas).

La combustión de gas en las antorchas (flares) es uno de los procesos más importantes en la industria del petróleo. La combustión incompleta produce emisiones altas de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y partículas debido a la velocidad del viento, el flujo irregular y las fallas en el diseño de la antorcha. Esta circunstancia es opuesta a la visión tradicional de que solamente se emiten gases inofensivos como el dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), pero en realistas una combustión deficiente incrementa la contaminación del aire (Osorio , 2020).

En la Refinería Estatal de Esmeraldas, se controlaron emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂) provenientes de diversos hornos operados con Fuel Oil y Fuel Gas. Estos contaminantes fueron analizados con celdas electroquímicas específicas durante cuatro meses de monitoreo semanal y los resultados se compararon con los máximos límites permitidos según la normativa ambiental en vigor (Macías y Zambrano, 2015).

Los tres contaminantes más importantes en la atmósfera, el amoníaco (NH₃), los óxidos de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂), son reconocidos por su potencial para acidificar ecosistemas, producir lluvia ácida y mantenerse activos durante extensos periodos de tiempo (Reyes, 2020). Investigaciones realizadas en Ecuador han determinado que los motores de combustión interna, como lo que se usan en maquinaria petrolera o generadores, emiten óxidos de nitrógeno (NO₂), partículas sólidas o líquidas (PM10), dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂). El tipo de combustible y el diseño del motor determinan estas emisiones, lo que requiere una evaluación pormenorizada en cada situación (Pinchao, 2023).

Se han utilizado modelos como AERMOD y AERMOD SCREN PRO para observar la dispersión del dióxido de azufre (SO₂) que emiten las industrias o las zonas de tráfico, lo cual ha mostrado concentraciones de hasta 125 ug/m³ en calles muy transitadas. El modelo se puede usar para examinar efectos parecidos en áreas de producción gasífera, aunque el caso no sea de zonas petroleras (Vega, 2015). Los inventarios se han empleado para medir el óxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), y el material particulado (MP) en investigaciones de fuentes fijas ubicadas en áreas industriales (Navas, 2022).

2.11 Normativa y Regulación Ambiental en Ecuador

1. Marco constitucional y principios ambientales.

El marco constitucional ecuatoriano reconoce que la explotación de recursos naturales no renovables, como el gas natural, debe realizarse bajo estrictos criterios de sostenibilidad ambiental, equidad intergeneracional y responsabilidad estatal. La Constitución del Ecuador (2008), en su artículo 313, establece que los hidrocarburos son propiedad inalienable del Estado y su aprovechamiento debe priorizar el interés nacional, garantizando la protección de los ecosistemas y de los derechos de la naturaleza. Esta ley es muy clara y se vincula directamente al Oriente ecuatoriano,

donde hay una alta producción de gas natural, asocia a la explotación petrolera y se generan dentro de zonas ambientalmente sumamente sensibles, como la Amazonía ecuatoriana.

El artículo 71 consagra a la naturaleza o “Pachamama” como sujeto de derechos, por consecuencia la quema, venteo o manejo ineficiente del gas natural puede ser considerado como una clara vulneración a sus derechos, al alterar los ciclos ecológicos y contribuir en gran escala a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para esto se plantea integrar planes de mitigación de emisiones, reinyección y aprovechamiento energético, siguiendo un plan de manejo ambiental.

El artículo 396 establece todas las empresas petroleras pública o privada, debe reparar los daños ambientales causados por la extracción de gas natural, incluyendo los daños en el suelo, el agua y la biodiversidad amazónica. Por esta razón se tendría que implementar sistemas de monitoreo permanentes, estudios de impacto ambiental y planes de manejo aprobados por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

El artículo 95 se menciona que las comunidades locales tienen derecho a ser consultadas antes de la aprobación de proyectos de explotación gasífera que puedan afectar su entorno. Gracias a esto, la consulta previa se ha convertido en un método para garantizar la aceptación social de los proyectos gasíferos y prevenir conflictos socioambientales.

La explotación gasífera responsable está contemplada dentro de la Constitución ecuatoriana lo cual ayudara a generar una transición a un sistema energético más limpio, donde el cuidado ambiental sea la parte fundamental de cualquier proyecto.

Estas leyes podrán garantizar que las medidas sugeridas para contribuir a tener un ambiente más limpio sean rastreables, comprobables y acordes con los requerimientos contractuales y regulatorios no solo nacionales sino también internacionales.

A. Eliminación de flaring rutinario mediante captura, utilización o reinyección.

Se crearían redes de recolección de gas con compresión para utilizarlo en reinyección, recuperación y valorización (VRU para tanques, así como la recuperación de NGLs, mini-GNL/mini-GTL, microturbinas o "virtual pipeline" CNG). Según un análisis técnico-económico reciente en el Oriente ecuatoriano demostró que existe el potencial

de convertir el gas que se quema hoy (cerca de 100 MMscfd) en GLP adicional para producción nacional, lo cual hace viable financieramente su reducción. El modelo que propone el Banco Mundial para financiar proyectos destinados a reducir los flares en lugares medianos ayudaría luchar contra el cambio climático disminuyendo la contaminación.

B. Programas LDAR y control de metano (fuentes fugitivas y de proceso)

Establecer un LDAR sólido (inventario de equipos, frecuencia basada en riesgo, OGI/Method 21, arreglo rápido y verificación) en concordancia con OGMP 2.0 (grados de reporte por activo/fuente), así como reemplazar las bombas neumáticas y los controladores de alto bleed por otras alternativas eléctricas o que tengan bajo/intermitente bleed. Los documentos técnicos de Natural Gas STAR y la guía de mejores prácticas de EPA evidencian retornos inmediatos a través del recorte de pérdidas, mientras que OGMP 2.0 estandariza el cálculo y la reducción meta a nivel empresarial y de activo.

C. Gestión integral de agua producida (reducción, tratamiento, reúso y reinyección)

Implementar sistemas de separación primaria (API/IGF/DGF), pulido (filtración) y membranas (nanofiltración/ósmosis inversa) para satisfacer los criterios de descarga o hacer posible el reúso operativo; en los casos en que sea más conveniente desde el punto de vista ambiental, dar prioridad a la reinyección en formaciones aptas con supervisión de integridad. Los guías IFC/EHS y la literatura técnica de Argonne para onshore definen rangos de calidad comunes, caminos tecnológicos y exigencias de seguimiento (integridad de pozos, caudales, química), que son útiles al dimensionar estaciones en la Amazonía.

D. Eficiencia energética y electrificación de equipos críticos

Incorporar al plan de desempeño energético y al inventario de emisiones las siguientes medidas: optimizar bombas y compresores (curvas de rendimiento, control de la velocidad), recuperar calor residual (WHR) y electrificar equipos en la medida de lo posible para disminuir la combustión in situ y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) / óxidos de nitrógeno (NO_x). Las Guías EHS Generales y el análisis de la IEA registran ventajas de seguridad energética y disminución de emisiones cuando la eficiencia se mezcla con tecnologías para mitigar el flaring y el metano.

E. Mejora de desempeño de mecheros y control operacional

Para situaciones en las que el flaring no rutinario sea ineludible (como la seguridad o los arranques), garantizar una eficiente combustión: encendido seguro, supervisión de la llama, apoyo de vapor/aire/gas, mezcla apropiada y calor neto del gas, con mantenimiento y documentación operativa. Las referencias de IFC/EHS se refieren a prácticas específicas que permiten reducir las emisiones de compuestos no quemados y asegurar el rendimiento durante los transitorios de proceso.

F. Plan de implementación, seguimiento y verificación

Establecer indicadores por estrategia, como la intensidad de metano (CH_4 /producción), tasa de flaring (m^3/boe), tasa de fugas reparadas, m^3 de agua tratada o reinyectada y energía recuperada (MWh), y conectarlos a la demanda de "medida más rigurosa" entre la normativa nacional. El estándar de rendimiento IFC requiere que se cumpla con el umbral más riguroso y que se den explicaciones técnicas para las alternativas, lo cual respalda auditorías y reportes de mejora continua.

2.12 Investigaciones Secundarias

Las investigaciones secundarias son aquellas que se basan en el análisis, interpretación y síntesis de información previamente recopilada y publicada por otros autores, instituciones u organismos científicos (Masaquiza, 2023) (Rodríguez-zurita, 2025). En contraste a la investigación primaria, este enfoque nos permite utilizar fuentes existentes de información como artículos científicos, libros, informes técnicos, bases de datos, estadísticas oficiales y documentos normativos. El objetivo principal es ayudar a generar nuevo conocimiento a partir de la reorganización, comparación y evaluación crítica de información ya existente, permitiendo comprender el de un tema específico y sustentar teóricamente una investigación (Carrion, 2024) (Herrera-Franco, 2024).

Dentro de las investigaciones secundarias existen diversos tipos, entre los que se destacan: las revisiones narrativas, que presentan una síntesis descriptiva de la literatura sin un protocolo estricto (Rodríguez-Zurita, 2025) (Herrera-Franco, 2024); las revisiones sistemáticas, que siguen criterios metodológicos definidos para la búsqueda, selección y análisis de estudios (Carrion-Mero, 2024) (Herrera-Franco, 2025); los meta-análisis, que integran resultados cuantitativos de múltiples investigaciones; los estudios bibliométricos, orientados al análisis estadístico de la producción científica (Briones-Bitar, 2025) ; y los estudios documentales, que

analizan informes técnicos, normativas y políticas públicas. Cada tipo de estudio cumple una tarea en específico dependiendo del objetivo de la investigación y del nivel requerido en el análisis (Tranfield et al., 2003).

Las investigaciones secundarias se caracterizan por su capacidad para fortalecer el rigor científico del estudio, optimizar recursos y proporcionar una base teórica y metodológica sólida. En investigaciones de carácter ambiental, técnico o territorial, este enfoque es sumamente importante debido a la complejidad de los sistemas analizados y a la disponibilidad de abundante literatura especializada. Además, nos permiten identificar vacíos de conocimiento, contrastar enfoques metodológicos y orientar la formulación de propuestas o soluciones basadas en evidencia científica consolidada, lo que ayuda a incrementar la validez y coherencia del trabajo académico (Donthu et al., 2021).

La revisión sistemática de la producción petrolera permite la integración de estudios técnicos, ambientales y normativos desarrollados en escenarios comparables, permitiendo evaluar los impactos de las emisiones de gas natural sobre la calidad del aire, los ecosistemas sensibles y la salud humana. En el oriente ecuatoriano este enfoque resulta muy conveniente ya que se tiene una complejidad ambiental y la fragilidad de los ecosistemas, donde se requieren estrategias de mitigación ambiental sustentadas en experiencias previas y en el análisis crítico de investigaciones nacionales e internacionales (Briones-Bitar, 2026).

Por último, la revisión sistemática contribuye a fortalecer el rigor científico y la coherencia metodológica de la propuesta de mitigación ambiental, al permitir identificar vacíos de conocimiento, contrastar enfoques de gestión y evaluar la efectividad de tecnologías y políticas de control de emisiones. De esta forma, las medidas de mitigación planteadas se fundamentan en conocimiento consolidado, favoreciendo la creación de soluciones ambientalmente sostenibles, técnicamente viables y pertinentes al contexto operativo y territorial del oriente ecuatoriano (Morante-Carballo, 2024).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

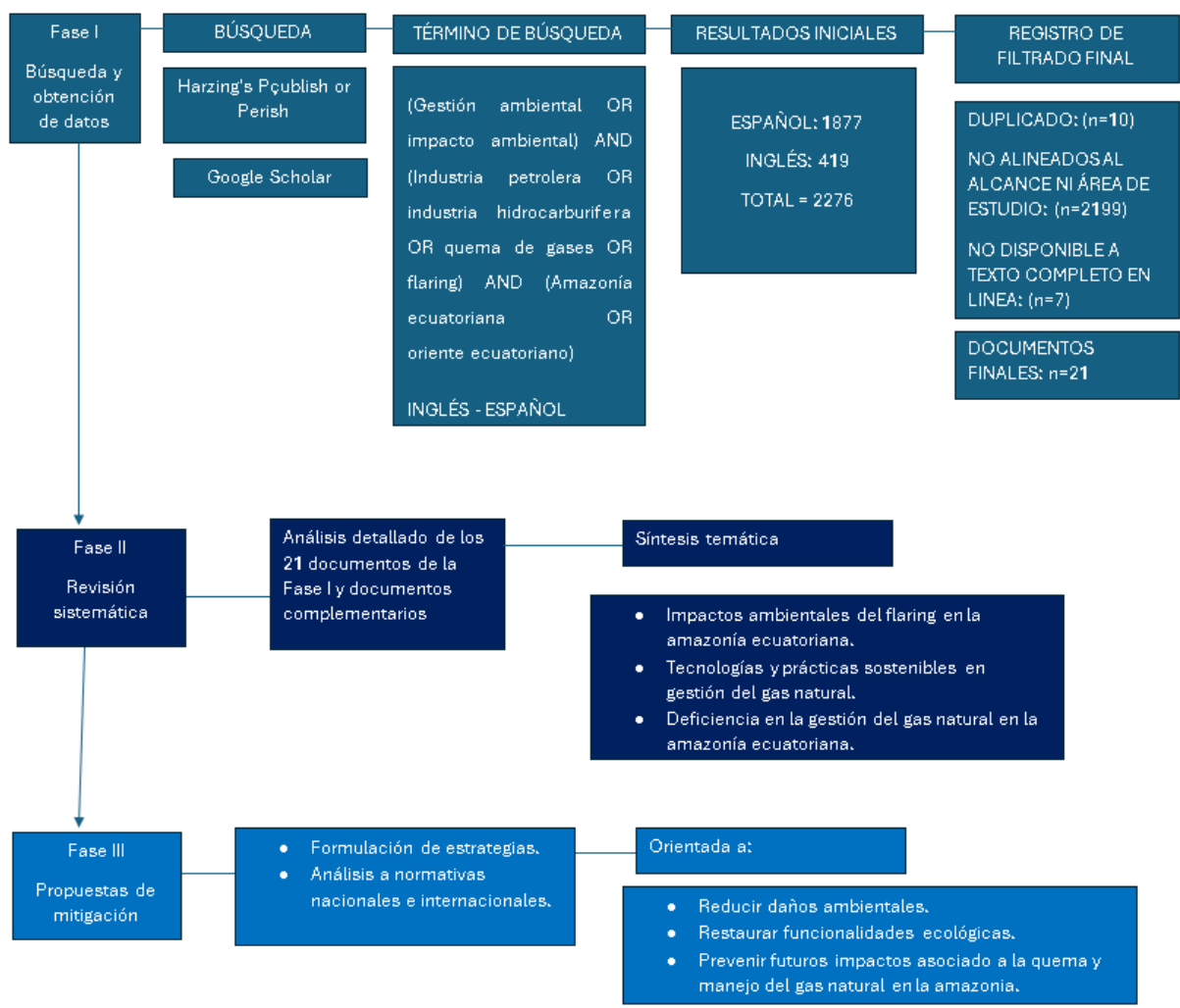
La presente investigación se desarrolla en la Región Amazónica del Ecuador, zona donde se concentra aproximadamente el 80,2 % de la producción nacional de hidrocarburos, con un volumen promedio de 475 000 barriles de petróleo diarios (Viceministerio De Hidrocarburos, 2021). De esta producción se generan cerca de 450 millones de pies cúbicos diarios de gas natural asociado, de los cuales entre 55 y 70 millones de pies cúbicos no son aprovechados y terminan siendo quemados o venteados, generando alrededor de tres millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente por año y liberando aproximadamente 25 000 toneladas de metano (CH₄), un gas con un potencial de calentamiento global 84 veces mayor al dióxido de carbono (CO₂) en un horizonte de 20 años (Jaramillo, 2022). Según los registros del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, la región del Oriente ecuatoriano cuenta con más de 400 mecheros activos y 295 puntos adicionales de flaring no registrados oficialmente, lo cual representa un subregistro del 76 % (Savinovich, 2022). Estos datos demuestran que hay falencias en los mecanismos de monitoreo y control ambiental, y genera la necesidad de diseñar e implementar estrategias de mitigación ambiental que reduzcan las emisiones fugitivas, la quema de gas y el impacto ecológico por la producción de gas natural (Facchinelli et al., 2023).

La siguiente investigación está basada en el impacto ambiental derivado de la producción y quema de gas natural en el Oriente ecuatoriano. A partir de una investigación documental, siguiendo el plan de manejo ambiental. Este estudio recopila y analiza información técnica y científica proveniente de fuentes secundarias para comprender el alcance de las emisiones y las formas de mitigación. Mediante un diseño metodológico de tipo mixto, con predominancia cualitativa, se describen las condiciones actuales de la gestión del gas natural y se proponen estrategias sostenibles basadas en evidencia técnica, normativa y que han dado buenos resultados en otros países.

El proceso metodológico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se dividió en tres fases: i) Búsqueda y obtención de datos, ii) Revisión sistemática de literatura, iii) Propuesta de mitigación del impacto ambiental.

Figura 8: Proceso Metodológico

Fuente: Elaborado por Mauricio Méndez (2025)



3.1 Fase I: Búsqueda y obtención de datos

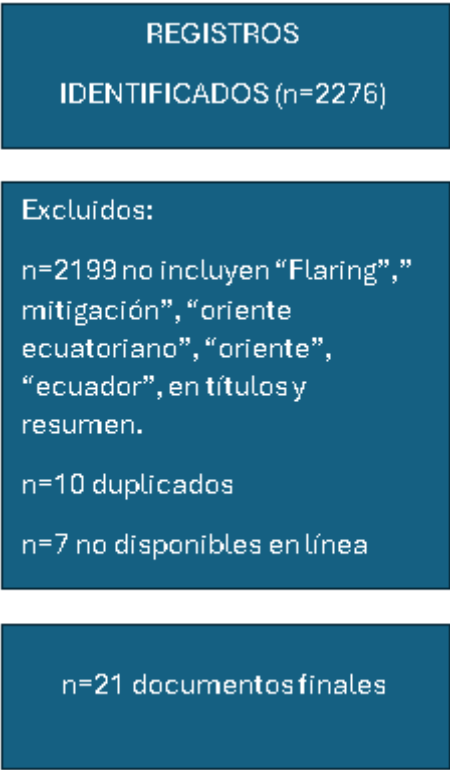
En la primera fase se desarrolló la estrategia de búsqueda bibliográfica. Para ello, se utilizaron plataformas reconocidas como Harzing's Publish or Perish y Google Scholar, lo que permitió acceder a una amplia variedad de publicaciones académicas. Se definieron términos de búsqueda específicos en inglés y español relacionados con la gestión ambiental, la industria petrolera, el gas de desecho (flaring), los hidrocarburos y temas asociados a la Amazonía ecuatoriana. Esta combinación de palabras aseguró que los resultados obtenidos fueran adecuados para objetivo del estudio.

Como resultado de esta búsqueda inicial, se recuperaron 2.276 registros, de los cuales 1.877 correspondieron a documentos en español y 419 a documentos en inglés. Posteriormente, se

realizó un proceso de filtrado para excluir estudios que no se ajustaban al alcance temático o geográfico, publicaciones duplicadas o documentos sin acceso a texto completo. Con lo cual se obtuvieron 21 documentos finales (Figura).

Figura 9: Registros identificados

Fuente: Elaborado por Mauricio Méndez (2025)



3.2 Fase II: Revisión sistemática

La segunda fase consistió en un análisis sistemático de los documentos seleccionados. Se examinaron a profundidad los 21 estudios que superaron el proceso de filtrado, junto con otras fuentes complementarias pertinentes. Este análisis permitió identificar los principales impactos ambientales del flaring en la Amazonía ecuatoriana, las tecnologías disponibles para reducir dichos impactos y las prácticas de gestión sostenible aplicadas en el manejo del gas natural.

Durante esta etapa, la información se organizó y sintetizó temáticamente. Esto facilitó la comprensión de las problemáticas más relevantes, el estado del conocimiento científico disponible y las brechas existentes en la literatura. La síntesis temática derivada de esta fase constituye la base técnica para formular estrategias de mitigación en la siguiente etapa.

3.3 Fase III: Propuestas de mitigación

La última fase se centró en la formulación de propuestas de mitigación orientadas a reducir los daños ambientales asociados a las emisiones de gas natural, restaurar las funcionalidades ecológicas afectadas y prevenir impactos futuros derivados de la quema y el manejo del gas natural en la Amazonía ecuatoriana.

La formulación de las propuestas de mitigación ambiental se basó en el enfoque de la jerarquía de mitigación ambiental, el cual fue aplicado como marco metodológico para la toma de decisiones (Bull et al., 2018). La jerarquía de mitigación ambiental está basada en el plan de manejo ambiental, el cual da un enfoque metodológico utilizado en la evaluación y gestión de impactos ambientales que prioriza secuencialmente las acciones para evitar, reducir, controlar y compensar estos impactos.

Para ello, se tomó como base los resultados de la revisión documental desarrollado en las fases previas, y las normativas nacionales e internacionales vigentes. Además, se mantuvo una reunión de grupo focal (Carrión , 2024) (Rubira - Gomez, 2024) (Morante - Carballo, 2023), con expertos en las áreas de petróleo, ambiente y energía, con el fin de integrar criterios técnicos y científicos especializados, como un método cualitativo complementario para el fortalecimiento de la propuesta de mitigación ambiental.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un estudio reciente efectuado en la Amazonía ecuatoriana mostró que la biodiversidad de organismos bentónicos del suelo aumenta en función de la distancia al mechero, las zonas ubicadas a 100 m del punto de flaring presentan menor diversidad que aquellas a 1 km o más, mientras que la diversidad vegetal también crece conforme aumenta la distancia, incluso en un rango de hasta 5 km (LoPresti, 2024).

Para las comunidades agrícolas que dependen del medio ambiente esto genera pérdidas económicas ya que la quema del gas genera efectos negativos tanto en la salud de las personas como en los suelos de las comunidades (LoPresti, 2024).

La metodología de mapeo participativo mostró 295 lugares de flaring, varios de los cuales no estaban en los registros oficiales del Ministerio del Ambiente ni en las detecciones satelitales (emisiones "Nightfire"), lo que indica un subregistro institucional de hasta el 76% (Facchinelli et al., 2022).

La práctica de "venting" es aún más perjudicial porque emite metano, un gas que tiene 86 veces más potencial de efecto invernadero que el CO₂. Esto aumenta los peligros para la salud pública y para el medio ambiente, en particular en zonas con gran biodiversidad como la Reserva de Biosfera Yasuní (Facchinelli et al., 2022).

4.1 Impactos ambientales.

La producción de gas natural asociada con la explotación petrolera en el Oriente ecuatoriano ha provocado impactos ambientales significativos, especialmente sobre la calidad del aire, suelo, la biodiversidad y las comunidades locales (Tabla 3).

Tabla 3: Impacto ambiental al componente aire

Fuente: Elaborado por Mauricio Méndez (2025)

Impactos ambientales

Daños y Referencias

Citas

<i>AIRE</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de mecheros (quema de gas asociado) con presencia de material particulado, SO₂, NO_x, CO₂, COV e hidrocarburos aromáticos policíclicos; estudios análogos reportan más de 100 sustancias tóxicas (incluido benceno) alrededor de mecheros. 	<p>Contaminación del aire por emisiones de mecheros, hollín, lluvia negra y lluvia ácida; olores pestilentes, irritación, cefaleas y riesgos cancerígenos por benceno.</p>	(Lawson et al., 2022)
	<ul style="list-style-type: none"> • La combustión y el venteo de gas generan “lluvia negra”: gotas de crudo y hollín que caen sobre techos, suelos, ropa, cultivos y superficies de agua. 	<p>La zona Texaco (Sacha, Shushufindi, Lago Agrio y Libertador) registra entre 147–205 mecheros operando continuamente. En Sucumbíos y Orellana, la quema de gas es uno de los principales delitos ambientales por contaminación atmosférica</p>	(Carrión, 2020)
	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación directa de gas cuando los mecheros se apagan o se ventea sin llama, causando nubes de gas sobre las comunidades. 		

Estos hallazgos ponen de manifiesto factores críticos:

- Impacto ambiental directo sobre el aire y biodiversidad cercanos a los pozos, afectando medios de vida rurales y ecosistemas frágiles.
- Falta de transparencia y sub-registro de mecheros, lo cual compromete la capacidad de monitoreo, la toma de decisiones públicas y el impacto ambiental.
- Potencial técnico realista para mitigar impactos mediante valorización del gas, proponiendo una transición hacia prácticas más sostenibles y eficientes.
- Se evidencia que los efectos ambientales en la producción de gas natural pueden ser cuantificados.

4.2 Tecnologías y prácticas sostenibles en la gestión del gas natural

Según la revisión de documentación obtenida, se reconocieron diferentes tipos de tecnologías y procesos que ayudarán a la mejorar la remediación y la eliminación del daño ambiental en el oriente ecuatoriano.

4.2.1. Reinyección / valorización de gas asociado

El gas asociado puede ser valorizado y reinyectado. Estas son prácticas que tienen una alta viabilidad técnica y ambiental en la Amazonía, pues disminuyen el flaring/venting, aumentan la eficiencia total del campo e incluso pueden ayudar a recuperar hidrocarburos (Galarza y Jara, 2025). En Ecuador, investigaciones demuestran situaciones de inyección de gas asociado (Huff & Puff) y utilización del gas (producción eléctrica-local, disminución de quema) con análisis técnico económico aplicado a campos amazónicos como el ITT, Singue entre otros, lo que avala su capacidad para ser transferido a otros campos (Álvarez y Ocapana, 2015).

4.2.2. Recuperación de líquidos del gas (NGLs) y aumento del GLP

Desde una perspectiva económica y técnica, se ha considerado la opción de utilizar el gas asociado en vez de quemarlo. La instalación integrada de deshidratación, fraccionamiento, recuperación de NGLs y sweetening posibilita una disminución importante en los volúmenes quemados y un incremento de un 30% en la producción de GLP, lo que disminuiría significativamente el flaring diario calculado (~100 MMscfd) (Ortiz et al., A Techno-Economic Analysis of Natural Gas Valuation in the Amazon Region to Increase the Liquefied Petroleum Gas (LPG) Production in Ecuador, 2023).

4.2.3. Tecnologías para minimizar/mejorar el flare (mecheros de alta eficiencia y lineamientos)

Las guías y la literatura técnica de la EPA registran parámetros de diseño y operación (mezcla, calor neto, asistencia de aire/vapor, razón de momentum) que mantienen altos niveles de eficiencia en la combustión si el flare está bien diseñado y funciona adecuadamente. Además, proporcionan criterios prácticos para optimizar el desempeño y disminuir las emisiones fugitivas. Estas referencias funcionan como fundamento para

realizar la transición de mecheros tradicionales a métodos de alta eficiencia en el país (Sorrels, 2019).

4.2.4. Monitoreo de metano con drones y sensores (IoT / remote sensing)

Se ha conseguido detectar pérdidas de gas natural en situaciones reales de operación con plataformas UAV que tienen detectores láser (como TDLAS/OGI) y se ha comprobado su eficacia a través de evidencia revisada por pares en redes de distribución y operaciones energéticas, lo que brinda un medio rápido para jerarquizar las reparaciones (LDAR). Su implementación en áreas amazónicas podría disminuir los tiempos de respuesta y las emisiones no controladas (Iwaszenko et al., Detection of Natural Gas Leakages Using a Laser-Based Methane Sensor and UAV, 2021).

Los resultados evidencian que Ecuador cuenta con alternativas reales y contratadas internacionalmente para mitigar los impactos ambientales del gas natural. Las experiencias de reinyección, valorización de NGLs, flares de alta eficiencia, monitoreo IoT y reúso de agua constituyen prácticas transferibles al contexto amazónico ecuatoriano, siempre que se supere la barrera de inversión en infraestructura y se fortalezca la normativa ambiental y energética.

La eficacia en términos operativos y la transparencia en emisiones, estas abarcan:

- Directrices IFC/EHS para hidrocarburos terrestres (gestión del aire, el agua, los desechos y la biodiversidad).
- El compromiso Zero Routine Flaring by 2030 para erradicar el flaring habitual.
- El marco OGMP 2.0 para cuantificar y gestionar metano por fuente y activo.

Para dar paso a estas tecnologías debemos tener en cuenta las malas prácticas que han provocado este daño masivo:

4.2.5. Mecheros de quema de gas asociado (“mecheros ecológicos”)

Estructuras donde se quema el gas natural asociado a la extracción de petróleo. Operan 24 horas al día; con el tiempo se elevaron hasta ~20 m y se presentaron como “ecológicos”, pero siguen emitiendo grandes cantidades de contaminantes atmosféricos y generando procesos como la atomización del petróleo (taponamiento y destape brusco

de tuberías que lanzan crudo a distancia, provocando lluvias de crudo sobre comunidades) (Ortiz et al., 2023).

4.2.6. Biorremediación

Práctica presentada durante años como un procedimiento “técnico y controlado” para manejar el gas asociado a la extracción petrolera. Sin embargo, la evidencia muestra que en muchos casos se reduce a mantener mecheros encendidos de forma continua, liberando a la atmósfera compuestos tóxicos como benceno, dioxinas y material particulado que contaminan el aire, el agua y el suelo. La presencia de cientos de mecheros cerca de comunidades amazónicas crea la apariencia de un proceso regulado, pero sin un control real de las emisiones ni de sus impactos. En la práctica, el flaring funciona como una solución aparente: se consume el gas para evitar su acumulación, pero no se eliminan los contaminantes, perpetuando daños a la salud, incrementando el riesgo de cáncer y afectando los ecosistemas locales, tal como evidencian estudios y acciones legales presentes en los documentos analizados (Facchinelli et al., 2021).

4.2.7. Remediación ambiental convencional / cierre de piscinas

Incluye acciones como cubrir o vaciar piscinas de lodos, retirar parte del crudo, relleno con tierra, clausura de pozos, etc. En muchos casos, según la tesis de (Maldonado, 2018), la remediación se diseñó bajo el criterio de “hacer lo más barato”, por lo que se consideró “extremadamente cara” la limpieza completa de todas las piscinas, y se optó por soluciones incompletas (Durango, 2019).

Las *Tabla 4* y la *Tabla 5* ofrecen una visión de la eficiencia y rentabilidad de algunas de estas tecnologías en los países donde han sido aplicadas.

Tabla 4: Comparación de propuestas de mitigación de relación con otros países

Fuente: Elaborado por Mauricio Méndez (2025)

TECNOLOGÍA	PAÍSES DONDE SE	RESULTADOS OBTENIDOS	CITA
-------------------	----------------------------	---------------------------------	-------------

**HA
APLICADO**

<p style="text-align: center;">REINYECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE GAS ASOCIADO</p> <p style="text-align: center;"><i>(mitigación del componente aire / sistemas cerrados de venteo)</i></p>	<p>Noruega, Canadá, Estados Unidos</p>	<p>Reducción superior al 95 % del flaring rutinario; disminución significativa de emisiones de metano y CO₂; incremento de la eficiencia energética y mejora de la recuperación de hidrocarburos.</p>	<p>(Lawson et al., 2022)</p>
<p style="text-align: center;">PROGRAMAS LDAR (DETECCIÓN Y REPARACIÓN DE FUGAS DE METANO)</p> <p style="text-align: center;"><i>(mitigación del componente aire)</i></p>	<p>Estados Unidos, Canadá, Unión Europea</p>	<p>Reducciones de emisiones fugitivas de metano entre 40 % y 60 %; identificación de super emisiones no reportadas; mejora de la seguridad y control operativo.</p>	<p>(Bylin y Plauchú, 2009)</p> <p>(Alvarez et al., 2018)</p>
<p style="text-align: center;">RECUPERACIÓN DE LÍQUIDOS DEL GAS (NGLS) Y AUMENTO DE GLP</p> <p style="text-align: center;"><i>(mitigación del componente aire)</i></p>	<p>Estados Unidos, Qatar, Ecuador (análisis técnico)</p>	<p>Incremento de hasta 30 % en la producción de GLP; valorización del gas quemado; reducción sostenida del flaring diario.</p>	<p>(Ortiz et al., 2023)</p> <p>(Gutierrez y James, 2008)</p>

<p>MECHEROS DE ALTA EFICIENCIA Y ANTORCHAS CERRADAS</p> <p><i>(sistemas cerrados de venteo y antorchas inteligentes)</i></p>	<p>Noruega, Estados Unidos</p>	<p>Eficiencia de destrucción superior al 99 %; reducción de emisiones de NOx, material particulado y metano no quemado; mejora del desempeño operacional.</p>	<p>(Alvarez et al., 2018)</p>
<p>MONITOREO DE METANO CON DRONES, SENSORES Y SATÉLITES</p> <p><i>(transversal: aire & mitigación social y sanitaria)</i></p>	<p>Estados Unidos, Canadá, Unión Europea</p>	<p>Detección de fugas no registradas; reducción del subregistro institucional; soporte técnico para programas LDAR y políticas de mitigación.</p>	<p>(Iwaszenko et al., 2021)</p>

Tabla 5: Comparación económica de las propuestas con experiencias internacionales

Fuente: Elaborado por Mauricio Méndez (2025)

TECNOLOGÍA	PAÍSES DE REFERENCIA	RESULTADOS ECONÓMICOS	CITA
<p>REINYECCIÓN Y VALORIZACIÓN DE GAS ASOCIADO</p>	<p>Noruega, Canadá</p>	<p>Recuperación de millones de m³ de gas comercializable; retorno de inversión positivo por sustitución de combustibles y aumento de productividad del campo.</p>	<p>(Michaels et al., 2022; Bedolla et al., 2020)</p>

<p>PROGRAMAS LDAR</p>	<p>Estados Unidos, Canadá</p>	<p>Bajos costos de implementación frente a altos beneficios; recuperación económica inmediata por reducción de pérdidas de gas; alta rentabilidad operativa.</p>	<p>(Plauchú & Bylin, 2009; EPA, 2012)</p>
<p>RECUPERACIÓN DE NGLS Y GLP</p>	<p>Estados Unidos, Ecuador (Amazonía)</p>	<p>Incremento de ingresos por mayor producción de GLP; reducción de importaciones; viabilidad técnico-económica comprobada para la Amazonía ecuatoriana.</p>	<p>(Ortiz et al., 2023; Pazos, 2008)</p>
<p>SUSTITUCIÓN DE FLARING POR GENERACIÓN ELÉCTRICA LOCAL</p>	<p>Canadá, Estados Unidos</p>	<p>Ahorros en costos energéticos operativos; uso del gas para autoconsumo; disminución de penalidades regulatorias por emisiones.</p>	<p>(IEA, 2022; World Bank, 2023)</p>
<p>MONITOREO AVANZADO DE METANO</p>	<p>Unión Europea, Estados Unidos</p>	<p>Optimización de inversiones en mitigación; reducción de sanciones ambientales; mejora en la transparencia y credibilidad de reportes de emisiones.</p>	<p>(Facchinelli et al., 2022; IPCC, 2023)</p>

4.3 Deficiencias en la gestión del gas en la Amazonía Ecuatoriana

Las deficiencias en la gestión del gas en la Amazonía ecuatoriana reflejan una combinación de prácticas obsoletas, falta de control ambiental y débil regulación, que contribuyen a emisiones contaminantes y a impactos negativos en el entorno y las comunidades locales como, por ejemplo:

4.3.1 Instalaciones obsoletas / adaptadas

Uso de infraestructura vieja, con corrosión interna, que aumenta el riesgo de roturas. Muchos pozos se dejan abandonados con su infraestructura en pie; solo una parte se reacondiciona como reinyectores de aguas de formación. Esta “tecnología” basada en explotación prolongada de instalaciones obsoletas forma parte de los pasivos ambientales flujo y acumulados (Lawson et al., 2022).

4.3.2 Falta de aplicación de tecnologías limpias / aprovechamiento de gas (nivel normativo)

La Constitución ecuatoriana y algunos documentos jurídicos mencionan la obligación de promover “tecnologías limpias y energías alternativas no contaminantes” y el aprovechamiento del gas natural asociado (por ejemplo, compromisos como “Cero Quema Rutina de Gas 2030”). Sin embargo, en la práctica descrita en los documentos, la quema en mecheros sigue siendo el método dominante y los proyectos de aprovechamiento de gas avanzan lentamente (Zambrano, 2024).

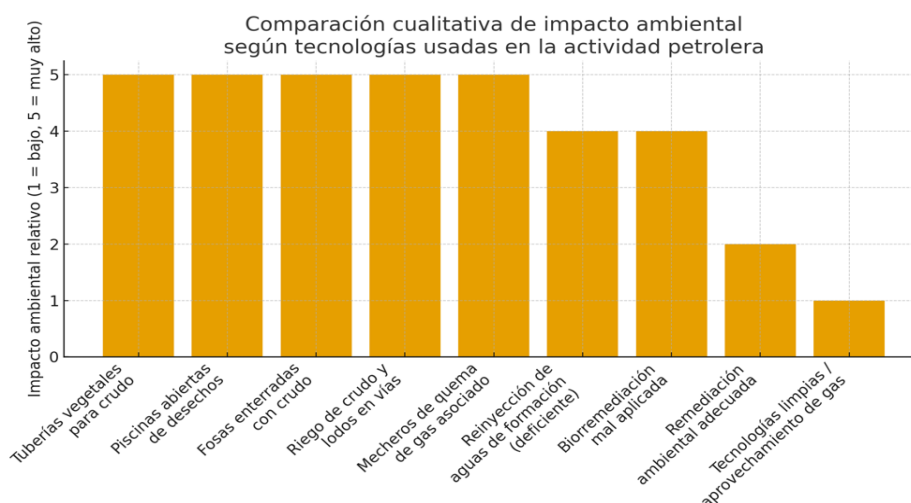
La quema rutinaria de gas en mecheros constituye la principal tecnología emisora de contaminantes atmosféricos y que, pese a ser presentada en ciertos momentos como “ecológica”, provoca lluvia de hollín, liberación de compuestos tóxicos y degradación de la calidad del aire, afectando también la salud de las poblaciones cercanas. Estas tecnologías conforman un conjunto de intervención el cual prioriza la operatividad sobre la integridad del ecosistema amazónico (Cuenca , 2022).

Por otra parte, las tecnologías limpias o amigable con el ambiente, como el aprovechamiento del gas asociado y la remediación integral con estándares técnicos, generan el menor nivel de impacto ambiental, pero su aplicación es muy limitada y más presente solo en la normativa que en la realidad. Por medio de esta comparación se

puede demostrar que la transición hacia tecnologías menos contaminantes es técnicamente posible, pero se enfrentan a barreras de costo, voluntad institucional y prácticas heredadas que siguen reproduciendo impactos ambientales severos (Castillo y Ocampo, 2023).

A continuación, se mostrará gráficamente (Figura 4) como es la tendencia a contaminar con métodos tradicionales en comparación a tecnologías limpias y el aprovechamiento del gas.

Figura 4: Comparación cualitativa de impacto ambiental según tecnología usadas en la actividad petrolera



Nota. El gráfico muestra una comparación cualitativa del impacto ambiental de distintas tecnologías usadas en la actividad petrolera. Las prácticas más contaminantes alcanzan valores altos (5), mientras que tecnologías limpias y de aprovechamiento de gas presentan impactos bajos (1–2). Elaborado por Mauricio Méndez (2025)

4.4 Estrategias de mitigación

En base a la revisión documental y al intercambio de criterios desarrollados en el grupo focal, se construyó una propuesta de mitigación ambiental según el enfoque de la jerarquía de mitigación ambiental orientada a evitar, reducir, controlar y compensar, los impactos negativos generados por el flaring, fortaleciendo la gestión ambiental del área de estudio. Estas propuestas se sustentan en criterios de buenas prácticas ambientales, viabilidad técnica, cumplimiento de

las normativas nacionales e internacionales, enfatizando a las mejoras continuas y la responsabilidad ambiental de los partes involucrados.

Asimismo, las acciones planteadas buscan minimizar los riesgos ambientales, optimizar el uso de los recursos y promover un manejo adecuado de los aspectos ambientales relevantes, integrando medidas preventivas y operativas. A continuación, se presentan las propuestas de mitigación ambiental:

4.4.1. Mitigación para el componente aire

Eliminación progresiva de mecheros (“Zero Routine Flaring”)

La quema rutinaria de gas asociado en mecheros genera emisiones atmosféricas contaminantes, incluyendo material particulado, compuestos tóxicos y hollín, que afectan la calidad del aire y la salud de las poblaciones cercanas. La eliminación progresiva del flaring permite reducir significativamente las emisiones de GEI y contaminantes locales, alineándose con iniciativas internacionales como Zero Routine Flaring by 2030 (Lawson et al., 2022).

Acciones recomendadas:

- Captación y aprovechamiento del gas asociado como GLP, electricidad o vapor industrial.
- Instalación de turbinas micro GT, plantas de compresión o mini refinerías modulares.
- Países como Noruega y Canadá lograron reducir >95% de quema mediante reinyección y sistemas de recuperación de gas.

En campos con infraestructura adecuada se puede captar y utilizar del 70 – 90 % del gas, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Producción continua de gas $\geq 0,5-1$ MMSCFD (millones de pies cúbicos por día).
- Composición con contenido de metano $> 60\%$.

- Bajo contenido de H₂S (< 4 ppm para uso energético sin tratamiento complejo).
- Presión de cabeza de pozo suficiente (> 50 psi) o factibilidad de compresión.
- Cercanía a infraestructura eléctrica o demanda energética.

4.4.2. Sistemas cerrados de venteo y antorchas inteligentes

En las operaciones gasíferas amazónicas se han evidenciado episodios de venteo directo y apagado de mecheros, situaciones que incrementan las emisiones fugitivas de metano y reducen la eficiencia de combustión. Los sistemas cerrados de venteo y las antorchas inteligentes permiten una eficiencia de combustión $\geq 98\%$. minimizando pérdidas de gas asociadas a fallas operativas, mejorar la seguridad del sistema y asegurar una combustión más limpia cuando la quema resulta inevitable (Cuenca , 2022).

Acciones recomendadas:

- Antorchas con monitoreo satelital, sensores infrarrojos y apagado automático.
- Reductores de presión y sellos antirretroceso de llama.
- Sistemas de recuperación de vapores (VRU).

Este tipo de antorchas se tiene que instalar en estaciones centrales de separación en baterías de producción, en puntos donde existan válvulas de alivio de presión, en zonas elevadas y con adecuada dispersión atmosférica y a distancia mínima de comunidades según normativa ≥ 500 m cuando sea posible. Ya que siguiendo estos parámetros tendremos una mayor eficacia de monitoreo y recuperación del gas.

4.4.3. Estrategias de mitigación social y sanitaria

Las operaciones que involucran la producción y manejo del gas asociado generan riesgos sociales y sanitarios vinculados principalmente a emisiones atmosféricas, episodios de quema irregular, venteo no controlado y presencia de contaminantes derivados de la combustión incompleta. Estos eventos pueden afectar directamente a las comunidades cercanas mediante exposición a material particulado, ruidos, vibraciones, olores y posibles episodios de lluvia de hollín cuando los sistemas de flare fallan o trabajan fuera de parámetros óptimos (Durango, 2019).

Esta estrategia se fundamenta en la participación ciudadana, el acceso a información ambiental en tiempo real y mecanismos institucionales que permitan alertar, documentar y atender incidentes operativos relacionados con el gas. Esto fortalece la transparencia, refuerzan la gobernanza ambiental y promueven un enfoque preventivo alineado con las mejores prácticas nacionales e internacionales (UNEP, EPA, IFC/EHS) (Ortiz et al., 2023).

Sistemas de alerta comunitaria

- Para episodios de quema irregular, venteo, derrames, lluvias de hollín, etc.

Monitoreo participativo

- Comunidades capacitadas para medir aire usando kits certificados.

4.4.4. Aprovechamiento energético del gas asociado

El aprovechamiento energético del gas asociado constituye una estrategia clave dentro de la jerarquía de mitigación, al evitar y reducir emisiones atmosféricas provenientes de la quema y el venteo, transformando un pasivo ambiental en un recurso energético. En el Oriente ecuatoriano, esto ayudara a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), a la mejora de la eficiencia operativa y al fortalecimiento del desarrollo local sostenible. Esto permitirá optimizar la gestión del gas producido y reducir la huella ambiental de las operaciones gasíferas, alineándose con los compromisos de descarbonización y con iniciativas globales de reducción del flaring.

Mediante la utilización de turbinas de gas, microturbinas (micro GT) o motores de combustión interna que funcionan con un volumen de gas de <0,5 MMSCFD, va a permitir la generación eléctrica con lo que se podrá abastecer instalaciones operativas, estaciones de compresión y campamentos, reduciendo el uso de combustibles fósiles y minimizando emisiones. En zonas aisladas el procesamiento del gas natural para la obtención de GLP u otros combustibles contribuirá al abastecimiento energético regional y reducirá la quema rutinaria de gas pues utiliza un aproximado de 0,5–3 MMSCFD.

CONCLUSIONES

- El estudio permitió identificar y caracterizar los principales impactos ambientales asociados a las emisiones de gas natural en los pozos petroleros del Oriente ecuatoriano, mediante una revisión de 21 documentos extraídos de la base Google scholar determinándose que el flaring y venting rutinario, las emisiones fugitivas de metano constituyen los problemas más relevantes. Estos impactos se manifiestan con mayor intensidad en las inmediaciones de las facilidades de superficie y durante fases operativas críticas, como arranques, paros y situaciones de contingencia.
- Se obtuvieron resultados relevantes sobre la calidad del aire, la emisión de gases de efecto invernadero y el entorno socioambiental, debido a los efectos generados por la quema natural. Demostrando que estas actividades, cuando no se administran adecuadamente, contribuyen al incremento de la contaminación ambiental de los ecosistemas locales.
- La comparación realizada de experiencias internacionales y literatura especializada permitió conocer nuevas tecnologías las cuales técnicamente probadas son aplicables al Oriente ecuatoriano. Entre las alternativas más relevantes se encuentran la captura, uso o reinyección del gas asociado para la eliminación del flaring rutinario, los programas de detección y reparación de fugas (LDAR), el uso de mecheros de alta eficiencia para eventos no rutinarios, la recuperación de líquidos del gas natural (NGL/GLP), las cuales presentan viabilidad técnica y ambiental para su implementación en el país.
- Las propuestas de mitigación ambiental basada en el método de jerarquización y con criterio experto, ofrece una base para la gestión de las emisiones de gases en la amazonia que incluyen la conexión a sistemas de recolección y compresión, la valorización mediante unidades de recuperación de vapores (VRU), NGL/GLP o generación eléctrica. La optimización de mecheros para flaring no rutinario, junto con la adopción de estándares internacionales como IFC/EHS, OGMP 2.0 y la iniciativa Zero Routine Flaring by 2030, conforman un enfoque integral y anticipativo de gestión ambiental con un alto potencial para reducir emisiones atmosféricas, minimizar desperdicios energéticos y disminuir riesgos operativos, al tiempo que fortalece la trazabilidad, la auditabilidad y la mejora continua. Esto ayudara a la protección de los ecosistemas y comunidades del Oriente ecuatoriano y a una administración responsable y sostenible del gas natural en la industria petrolera.

- Para que las estrategias tengan una mayor efectividad depende principalmente de la adecuada aplicación operativa más que de la selección de los tipos de tecnología en sí. Hay que dejar claro que la correcta calibración de equipos, la disponibilidad de repuestos, las capacidades locales de operación y mantenimiento, y la adaptación logística a las condiciones geográficas del Oriente ecuatoriano resultan determinantes para el éxito.

RECOMENDACIONES

- Poner en práctica el compromiso y plan de acción " Zero Routine Flaring " que dé prioridad a la conexión con recolección/compresión, a la recuperación mediante VRU y NGL/GLP. El objetivo es disminuir, en un plazo de 24 meses, el volumen quemado en un mínimo del 80 %; para esto se debe contar con una línea base previa y hacer un seguimiento mes a mes, además de contrastar los resultados antes y después (por ejemplo, utilizando la prueba t o Wilcoxon) sobre los indicadores m³ de gas quemado/boe y % de gas asociado valorizado.
- Un programa integral de metano que una el MRV y el LDAR, con un enfoque en el riesgo bajo la estructura OGMP 2.0. En la práctica: supervisión regular con OGI/Method 21, sustitución de dispositivos high-bleed por otras opciones eléctricas o de bajo/intermitente bleed, reparación con acuerdos de nivel de servicio e inventario según fuente/activo.
- Integrar IFC/EHS, OGMP 2.0 y Zero Routine Flaring en el sistema de gestión para institucionalizar la gobernanza ambiental: comités transversales (Aire/Metano, Energía, Comunidad), procedimientos escritos que implementen la medida más rigurosa entre la norma nacional y el estándar internacional, tablero trimestral de KPIs y auditoría externa cada año.

BIBLIOGRAFÍA

- Alejandro, J., & Mozo, A. (2023). *Determinación de huella de carbono y desarrollo de un plan piloto basado en la ISO 14064 en dos obras salesianas ubicadas en Quito Ecuador*. Quito, Pichincha: Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24413/1/TTS1187.pdf>
- Álvarez, B., & Ocapana, N. (2015). *“Optimización Del Uso Del Gas Asociado Para Generación De Energía En El Campo Singue-Bloque 53 Operado Por La Compañía Gente OIL ECUADOR PTE. LTD. AÑO 2015*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/739f8f39-edb7-43f5-a6a0-d8045e471acd/content>
- Alvarez, R., Zavala, D., Lyon, D., Allen, D., & Hamburg, S. (2018). *Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain*. Science Custom Publishing. <https://doi.org/https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar7204>
- Amazon, W. (2025). *Perforando hacia el desastre: El crudo amazónico y la apuesta petrolera de Ecuador*. Amazon Watch.
- Bedolla, L., Cai, W., Martin, Z., & Yu, F. (2020). *Technology and Policy Solutions to Reduce Harmful Natural Gas Flaring*. University Scholl of International and Public affairs.
- Brown, K. (2024). *Just by breathing we are contaminated: schoolgirls fight to extinguish Ecuador's gas flares*. Open Society Foundations. <https://www.theguardian.com/global-development/article/2024/may/16/breathing-contaminated-ecuador-schoolgirls-fight-fossil-gas-flaring?>
- Bylin, C. (2012). *Emisiones de Metano en el Sector de Petróleo y Gas Natural: Contexto Internacional*. NaturalGas EPA Pollution Preventer. https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2017-07/documents/methane_emissions_bogota2012_spanish.pdf
- Bylin, C., & Plauchú, J. (2009). *Reducción de emisiones de metano en el sector del petróleo y del gas*. Revista Petrotecnia.

https://doi.org/https://www.petrotecnica.com.ar/febrero09/reducciones_de_emisiones_de_metano.pdf

Carras, J., Franklin, P., Yuhong, H., Singh, K., Tailakov, V., Picard, D., . . . Yesserkepova, I. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.

Carrión, M. (2020). *Propuesta de diseño de una guía metodológica para la aplicación de las normas de Gestión Ambiental: ISO 14040 (2006) - Evaluación del ciclo de vida, principios y marco de referencia e ISO 14044 (2006)-Análisis del ciclo de vida, requisitos y directrices*. Universidad Andina Simón Bolívar.

Castillo, R., & Ocampo, K. (2023). *Estimación de emisiones atmosféricas de fuentes de área del cantón Puerto Francisco de Orellana para el año 2020*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Castro, L., Moncayo, S., López, W., & Córdova, L. (2011). *Yacimientos de gas húmedo*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. <https://es.scribd.com/doc/54088343/Gas-Humedo>

CEDA. (2011). *Hacia una matriz energética diversificada en el Ecuador*. Quito: Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental.

Cronquist, C. (2001). *Estimation And Clasification Of Reserves Of Crude Oil, Natural Gas And Condensate*. Houston, Estados Unidos : Society Of Petroleum Engineers.

Cuenca, P. (2022). *Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en Ecuador: visión desde el Acuerdo de París y el desarrollo*. Flacso.

Durango, J. (2019). *Environmental impacts of oil activities in the northeastern Ecuadorian Amazon: From the Spatial Study of vulnerability to risk*. Biodiversity and Ecology. <https://theses.hal.science/tel-02080465v1>

EUROPEAN SPACE AGENCY. (2023). *A three-tiered approach for methane detection*.

- Facchinelli, F., Pappalardo, S., Codato, D., Diantini, A., Della, G., Crescini, E., & De Marchi, M. (2021). *Unburnable and Unleakable Carbon in Western Amazon: VIIRS Nightfire Data to map Gas Flaring and policy Compliance in the Yasuní Biosphere Reserve*.
- Facchinelli, F., Pappalardo, S., Della Fera, G., & Crescini, E. (2022). *Extreme citizens science for climate justice: linking pixel to people for mapping gas flaring in Amazon Rainforest*. *Environmental Research Letters*.
https://www.researchgate.net/publication/356863603_Extreme_citizens_science_for_climate_justice_linking_pixel_to_people_for_mapping_gas_flaring_in_Amazon_Rainforest
- Franca, R., Miranda, V., & Cisneros, P. (2013). *Energía: Una visión sobre los restos y oportunidades en America Latina y el Caribe*. CAF.
- Galarza, J., & Jara, C. (2025). *Evaluación De Aplicación Del Método HUFF AND PUFF Mediante La Inyección De Gas Asociado Para Incrementar La Producción De Petróleo En Pozos De Los Campos AHUQUIMI Y ANCÓN*. La Libertad, Santa Elena, Ecuador : Universidad Península de Santa Elena.
<https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/556f8eda-dc21-495d-8398-2d203fa155f7/content>
- Gomes, H., Rocha, E., & Oliveira, V. (2016). *Produção e consumo de água dessalinizada em plataforma de petróleo*. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v8n214-01>
- González, M., España, J., & Almeida, A. (2020). *Impacto de los derrames de petróleo en la Amazonía Ecuatoriana*.
- Gutierrez, C., & James, P. (2008). *Optimización de captación de gas natural y producción de GLP en los complejos petroleros del Nororiente Ecuatoriano*. Universidad de posgrado del Estado. <https://doi.org/https://repositorio.iaen.edu.ec/handle/24000/214>
- Haddaway, N., Collins, A., Coughlin, D., & Kirk, S. (2015). *The Role of Google Scholar in Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138237>

- Iñesta, J., García , P., Escobar, J., Reol, N., Castells, C., Mitja, A., & López, C. (2002). *El Gas Natural: El recorrido de la energía* (Primera ed.). Madrid, España: E.i.S.E. Domènech, S.A. https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-gas-natural.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Iwaszenko, S., Kalisz, P., Slota, M., & Rudzki, A. (2021). *Detection of Natural Gas Leakages Using a Laser Based Methane Sensor and UAV*. *Remote Sens.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3c2e>
- Iwaszenko, S., Kalisz, P., Slota, M., & Rudzki, A. (2021). *Detection of Natural Gas Leakages Using a Laser-Based Methane Sensor and UAV*. MDPI. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13030510>
- Lawson, I., Honorio , E., Simpson, M., AnduezaL., Dargie, G., Davies, A., . . . Roucoux, M. (2022). *The vulnerability of tropical peatlands to oil and gas exploration and extraction*. Sage Journals . <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/27539687221124046>
- Lawson, I., Honorio, E., Andueza, L., Cole, L., Dargie, G., Davies, A., . . . Simpson, M. (2022). *The vulnerability of tropical peatlands to oil and gas exploration and extraction*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/27539687221124046>
- Litherland, M., Aspden, J., & Jemielita, R. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. British Geological Survey. <https://archive.org/details/1994-litherland-the-metamorphic-belts-of-ecuador-sp>
- Lopez, M. (2014). *Explotación del Gas Natural en el sector fabril del parque industrial de Cuenca* . Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca . <https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19859/1/TESIS.pdf>
- LoPresti, F. (2024). *Impacts of Gas Flaring on Soil Quality in the Ecuadorian Amazon: Measuring gas flare effects on soils at comparative distances in Loma del Tigre, Orellana*. Macalester Collage. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/3807/
- MAATE. (2024). *Documento de Inventario Nacional (DIN) de Gases de Efecto Invernadero del año 2022 del Ecuador, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*.

- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). https://unfecc.int/sites/default/files/resource/e.%202024.12.27_NID_5CN1RBT_v7_final.pdf?
- Macías, E., & Zambrano, D. (2015). *Caracterización y Evaluación de Emisiones de Gases Co, Nox, So2, en Hornos de la Refinería Estatal de Esmeraldas y propuesta de Remediación*. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/12704>
- Maldonado, A. (2018). *Una propuesta de reparación socio-ecosistémica a los impactos del metabolismo de la actividad petrolera para la Amazonía ecuatoriana*. Universidad Andina Simón Bolívar.
- Méndez, A. (2006). *Fundamentos de Gas en Lenguaje no Técnico*. Caracas, Venezuela .
- Michaels , K., Oliveira, T., & Konschnik, K. (2022). *Reducción de las fugas de metano en la industria del petróleo y el gas: Hoja de ruta y paquete de herramientas regulatorias*. International Energy Agency . https://iea.blob.core.windows.net/assets/db15c076-5482-433c-bead-7238d17e91f2/DrivingDownMethaneLeaksfromtheOilandGasIndustry_Spanish.pdf?
- Middlesex University , B. (2025). *Publish ou Perish: Explica o uso do Publish or Perish e suas métricas*. <https://econtents.sbu.unicamp.br/boletins/index.php/ppec/article/view/9523>
- Navas, C. (2022). *Cuantificación de Gases Efecto Invernadero de Fuentes Fijas en la Zona Industrial del Municipio de Girón, Santander*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/764cda28-e36b-4a42-a580-897c104e47f7/content>
- Ortiz, D., Calderón , D., Viloría , A., & Ricaurte , M. (2023). *A Techno-Economic Analysis of Natural Gas Valuation in the Amazon Region to Increase the Liquefied Petroleum Gas (LPG) Production in Ecuador*. Ecuador: School of Chemical Sciences and Engineering, Yachay Tech University. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources12080091>
- Ortiz, D., Calderón, D., Viloría, A., & Ricaurte , M. (2023). *A Techno.Economic Analysis of Natural Gas Valuation in the Amazon Region to Increase the Liquefied Petroleum Gas*

(LPG) Production in Ecuador.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources12080091>

Ortiz, D., Calderón, D., Viloria, A., & Ricaurte, M. (2023). *A techno-economic analysis of natural gas valuation in the amazon region to increase the liquefied petroleum gas (LPG) production in Ecuador.* MDPI.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources12080091>

Osorio , D. (2020). *Evaluación de la dispersión geográfica de CO2, SO2 y NOx Provenientes de antorchas de gas en la estación "El Coca".* Universidad Agraria del Ecuador.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/OSORIO%20PULITA%20DOMENICA%20MARIA.pdf>

Palacios, P. (2022). *Estimación de Gases de Efecto Invernadero en la Perforación y el Workover de Pozos Petroleros: caso Ecuador.* Escuela Superior Politécnica del Litoral.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/0a884fce-f56f-475c-8e64-f8dd6577bb34/T-70592%20PALACIOS%20ALVAREZ.pdf?>

Palacios, P. (2022). *Estimación de Gases de Efecto Invernadero en la Perforación y el Workover de Pozos Petroleros: Caso Ecuador.* Escuela Superior Politécnica del Litoral.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/0a884fce-f56f-475c-8e64-f8dd6577bb34/T-70592%20PALACIOS%20ALVAREZ.pdf?>

Paule, R., Núñez, M., Morales , I., Martín, J., Manzano, M., Montiel, L., . . . González, A. (2024). *Detección de fugas de metano en España y países importadores: análisis y propuestas de mejora.* FUNDACIÓN RENOVABLES.
https://fundacionrenovables.org/wp-content/uploads/2024/07/Fugas-de-metano_VF.pdf?

Pazos, J. (2008). *Optimización de la captación de gas natural y producción de GLP en los complejos petroleros de nororiente ecuatoriano.* Intituto de altos estudios nacionales.
<https://repositorio.iaen.edu.ec/jspui/bitstream/24000/214/1/IAEN-012-2008.pdf?>

Pinchao, Y. (2023). *Estudio de las emisiones vehiculares en el Distrito Metropolitano de Quito: Determinación de factores de emisión para estimar emisiones vehiculares en el DMQ*

- años base 2018*. Quito, Pichincha, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24349/1/CD%2013264.pdf>
- Plauchú, J., & Bylin , C. (2009). *Reducción de emisiones de metano en el sector del petróleo y del gas*. Petrotecnia.
https://www.petrotecnia.com.ar/febrero09/reducciones_de_emisiones_de_metano.pdf?
- Posso, A. (2020). *Emisión de gases de efecto invernadero en las opciones dominantes de movilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. (U. A. Bolívar, Ed.) Quito , Pichincha, Ecuador. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7972/1/T3453-MCCNA-Posso-Emision.pdf?>
- Reyes, G. (2020). *Evaluación de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por la refinería "La Libertad" mediante el modelo AERMOD VIEW*. Universidad Agraria del Ecuador.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/REYES%20URETA%20GABRIELA%20MARGARITA.pdf>
- Rojey, A. (2002). *Natural Gas Fundamentals*. París, Francia: Institut Francais Du Petrolé.
- Rondón, J. (2012). *Endulzamiento de Gas Natural*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
https://www.researchgate.net/publication/374544922_Endulzamiento_de_Gas_Natural
- Sorrels, J. (2019). *Flares: VOC Destruction Controls* .
https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/flarescostmanualchapter7thedition_august2019vff.pdf
- Stevens, P. (2018). *The Role of Oil and Gas in the Economic Development of the Global Economy*. Oxford Academic.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/oso/9780198817369.003.0004>
- Tran, H., Polka, E., Buonocore, J., Roy , A., Trask, B., Hull, H., & Arunachalam, S. (2023). *Air Quality and Health Impacts of Onshore Oil and Gas Flaring and Venting Activities*

- Estimated Using Refined Satellite-Based Emissions*. *GeoHealth - Advancing Earth and Space Sciences*. <https://doi.org/10.1029/2023GH000938>
- UCV. (31 de Enero de 2008). Retrieved 23 de mayo de 2025, from http://yacimientos-de-gas.blogspot.com/2008_01_01_archive.html
- Vega, D. (2015). *Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular y gasolineras del Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012*. Universidad San Francisco de Quito. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/bitstream/23000/4178/1/113616.pdf>
- Vicuña, S. (2011). *Evaluación de la factibilidad de industrializar helio a partir de gas natural y gases de pozos petroleros producidos en el Ecuador*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4502/1/CD-4119.pdf?>
- Weyant, C., Shepson, P., Subramanian, R., Cambaliza, M., Heimbürger, A., McCabe, D., . . . Bond, T. (2016). Black Carbon Emissions from Associated Natural Gas Flaring.
- World Bank. (2023). *Regulatory framework on flaring and venting*. <https://flaringventingregulations.worldbank.org/ecuador?>
- Yang, X., Tian, Z., Ma, Z., Zhou, Y., & Huang, T. (2024). *Tectonic Evolution and Sedimentary Filling of the Andean Foreland Basin in South America*.
- Zambrano, W. (2024). *La acción de protección ante la ausencia de jurisdicción ambiental especializada en Ecuador, Caso Mecheros* . Universidad Regional Autónoma de los Andes - Facultad de Jurisprudencia .