



Reporte entregable 10

Caso de uso de aplicación de IA e IAGEN

Detección de Fugas de Metano en Vaca Muerta, Neuquén, Argentina

I. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático ha puesto de relieve la importancia crítica de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, entre los cuales el metano ocupa un lugar destacado debido a su elevado potencial de calentamiento global, especialmente en horizontes temporales cortos.

La industria del petróleo y el gas es fuente antropogénica de emisiones de metano, liberado durante diversas etapas de la exploración, producción, procesamiento, transporte y distribución de hidrocarburos. En este contexto, la detección temprana y precisa de fugas de metano se ha convertido en una necesidad imperante tanto para la protección del medio ambiente como para la eficiencia operativa y el cumplimiento normativo.

La formación Vaca Muerta, ubicada en la provincia de Neuquén, Argentina, representa una de las reservas de hidrocarburos no convencionales más significativas a nivel mundial. Su vasta extensión y la creciente actividad de extracción de petróleo y gas, mediante técnicas como la fracturación hidráulica, hacen que la región sea un punto focal para el monitoreo y la mitigación de emisiones de metano. La aplicación de tecnologías avanzadas de detección, como la visión por computadora, ofrece una vía prometedora para abordar este desafío de manera automatizada y eficiente.

El presente informe tiene como objetivo proporcionar un análisis exhaustivo y profesional sobre la aplicación de la visión por computadora en la detección de fugas de metano en Vaca Muerta, complementando y enriqueciendo la información existente

para ofrecer una perspectiva más completa y autorizada.

II. El Desafío de las Emisiones de Metano en Vaca Muerta

El metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero significativamente más potente que el dióxido de carbono (CO_2) en el corto plazo. Durante los primeros 20 años después de su liberación a la atmósfera, el metano tiene un potencial de calentamiento global más de 80 veces superior al del CO_2 . Esta característica subraya la urgencia de reducir las emisiones de metano para frenar el ritmo del calentamiento global en las próximas décadas.

La formación Vaca Muerta, una extensa formación de esquisto que se extiende por aproximadamente 30,000 kilómetros cuadrados en la Cuenca Neuquina de Argentina, alberga importantes reservas de petróleo y gas no convencionales. Su geología se caracteriza por ser una roca madre rica en materia orgánica, lo que la convierte en una fuente prolífica de hidrocarburos.

La producción de hidrocarburos en Vaca Muerta ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, convirtiéndose en un motor clave de la producción total de petróleo y gas de Argentina. Este aumento en la producción se ha acompañado de un incremento en el número de pozos de fracturación hidráulica. La magnitud de las operaciones y la vasta extensión de la formación implican un riesgo inherente de fugas de metano, ya sea por fallas en equipos, errores operativos o deficiencias en la infraestructura.

La extracción de hidrocarburos presenta diversos desafíos ambientales, incluyendo el uso intensivo de agua, la gestión de residuos tóxicos y la preocupación por la posible inducción de sismicidad.

Investigaciones independientes han detectado niveles significativos de emisiones de metano y compuestos orgánicos volátiles (COV) utilizando cámaras de imagenología óptica de gases (OGI) en diversas instalaciones de fracking, procesamiento y almacenamiento en la región.

Estos hallazgos sugieren que las emisiones de metano en Vaca Muerta son un problema real que requiere una atención y un monitoreo continuos para garantizar una producción responsable y sostenible.

III. Fundamentos de la Visión por Computadora para la Detección de Fugas de Metano

La visión por computadora es un campo de la inteligencia artificial que busca capacitar a las máquinas para "ver" e interpretar el mundo visual. Implica la adquisición, el procesamiento y el análisis de imágenes y videos digitales para extraer información significativa.

En el contexto de la detección de fugas de metano, la visión por computadora se aplica para analizar imágenes y videos capturados por diversos sensores, con el objetivo de identificar patrones visuales que indiquen la presencia de una fuga.

Una tecnología clave en este campo es la imagenología óptica de gases (OGI). Las cámaras OGI utilizan filtros espectrales especializados para visualizar gases como el metano, que son invisibles a simple vista. El metano absorbe energía en longitudes de onda específicas del infrarrojo medio. Las cámaras OGI detectan esta absorción y representan visualmente el gas como una nube o penacho, lo que permite a los operadores identificar la ubicación y la extensión de la fuga. La capacidad de visualizar directamente las fugas de metano proporciona un método intuitivo y valioso para su detección en instalaciones de petróleo y gas.

IV. Algoritmos de Inteligencia Artificial en la Visión por Computadora para la Detección de Metano

La inteligencia artificial (IA) desempeña un papel fundamental en la automatización del análisis de imágenes y videos para la detección de fugas de metano. Los algoritmos de aprendizaje automático, y en particular las redes neuronales convolucionales (CNN), son ampliamente utilizados para procesar las imágenes capturadas por las cámaras OGI y detectar patrones que son indicativos de fugas de metano.

Las CNN son arquitecturas de redes neuronales profundas diseñadas específicamente para procesar datos de cuadrícula, como las imágenes. Se entrenan utilizando grandes conjuntos de datos de imágenes etiquetadas, donde se indica si una fuga de metano está presente o no. Durante el proceso de entrenamiento, la CNN aprende a identificar características visuales relevantes, como la forma, el movimiento y la intensidad de los penachos de gas, que distinguen una fuga de metano de otros elementos de la imagen.

Se han desarrollado arquitecturas de CNN específicas, como GasNet, optimizadas para la detección de fugas basadas en imágenes OGI. La aplicación de algoritmos de IA, especialmente las CNN, permite una detección de fugas de metano automatizada y potencialmente más precisa en comparación con el análisis manual de las imágenes OGI, lo que reduce la dependencia del juicio del operador. Esta automatización facilita el monitoreo continuo y una detección más rápida, lo cual es crucial para una mitigación oportuna.

Además, los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar el movimiento en las imágenes OGI para mejorar la detección de fugas. Los penachos de metano a menudo pueden parecer translúcidos en las imágenes OGI y pueden ser difíciles de distinguir del fondo. Al observar el movimiento del metano en relación con los elementos estáticos de la imagen, los algoritmos pueden identificar fugas con mayor fiabilidad.

El sistema Smart LEak Detection (SLED), desarrollado por SwRI, es un ejemplo de cómo el aprendizaje automático se aplica para fusionar imágenes OGI con datos de otros sensores y analizar el movimiento para detectar y cuantificar fugas de metano. El uso del aprendizaje automático mejora la fiabilidad de la detección de metano al diferenciar las fugas reales de otros artefactos visuales o movimientos, lo que conduce a una reducción de las falsas alarmas.

V. Tecnologías de Detección de Fugas de Metano: Una Comparativa

La detección de fugas de metano en la industria del petróleo y el gas se aborda mediante una variedad de tecnologías, cada una con sus propias ventajas y

limitaciones.

- Métodos Tradicionales:
 - Sensores Puntuales: Estos sensores estacionarios se instalan en ubicaciones específicas para monitorear continuamente la concentración de metano en el aire. Pueden ser altamente sensibles en los puntos de monitoreo, pero su cobertura espacial es limitada y pueden pasar por alto fugas que ocurran entre los sensores.
 - Analizadores Portátiles (Sniffers): Son dispositivos móviles utilizados por personal para detectar manualmente fugas acercando el sensor a los componentes de la infraestructura. Son útiles para identificar la fuente exacta de una fuga a corta distancia, pero son laboriosos, lentos y pueden exponer a los operadores a riesgos de seguridad en áreas peligrosas.
- Tecnologías Avanzadas:
 - Cámaras de Imagenología Óptica de Gases (OGI): Estas cámaras infrarrojas visualizan las fugas de metano en tiempo real, permitiendo escanear grandes áreas desde una distancia segura. Aunque son más seguras para los operadores y permiten una inspección eficiente, son costosas y su eficacia puede verse afectada por las condiciones climáticas y las diferencias de temperatura. Además, el análisis manual de las imágenes requiere operadores capacitados.
 - Drones (UAVs): Los vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores de metano (cámaras OGI o sniffers láser) realizan inspecciones aéreas de manera eficiente. Pueden cubrir áreas extensas e inaccesibles y proporcionar datos de ubicación precisos mediante GPS. Sin embargo, la duración del vuelo es limitada por la batería, existen restricciones regulatorias y su operación depende de las condiciones climáticas. La estabilización de la imagen también puede ser un desafío.
 - Satélites: Los sensores satelitales ofrecen una cobertura global para la detección y cuantificación de metano a gran escala. Son capaces de detectar grandes eventos de emisión, pero su resolución espacial es menor que la de los

drones o los métodos terrestres, y pueden pasar por alto fugas más pequeñas.
La cobertura también puede verse afectada por la nubosidad.

Tabla 1: Comparativa de Tecnologías de Detección de Fugas de Metano

Tecnología	Ventajas	Limitaciones
Sensores Puntuales	Monitoreo continuo, alta sensibilidad en ubicaciones fijas	Cobertura espacial limitada
Analizadores Portátiles	Móviles, localizan fuentes de fuga	Laboriosos, lentos, riesgos de seguridad para el operador
Cámaras OGI	Visualización en tiempo real, escaneo de grandes áreas, operación más segura	Costosas, dependientes del clima y la temperatura, requieren operadores capacitados para uso manual
Drones (UAVs)	Cobertura de áreas extensas e inaccesibles, rentables, datos de ubicación precisos	Limitaciones de tiempo de vuelo, restricciones regulatorias, dependientes del clima,

		desafíos de estabilización de imagen
Satélites	Cobertura global, detección de grandes emisiones, inventarios regionales/nacionales	Menor resolución espacial, pueden pasar por alto fugas más pequeñas, afectados por la nubosidad

La elección de la tecnología de detección de fugas de metano depende de las necesidades específicas y el contexto de la aplicación, considerando factores como la escala, el costo, la accesibilidad y la precisión deseada. La combinación de múltiples tecnologías puede proporcionar una solución más completa.

VI. Aplicación de la Visión por Computadora en la Detección de Fugas de Metano en Vaca Muerta

La visión por computadora tiene un gran potencial para mejorar la detección de fugas de metano en las operaciones de petróleo y gas en Vaca Muerta. Los algoritmos de visión por computadora pueden analizar automáticamente las imágenes OGI recopiladas por cámaras terrestres fijas, drones o incluso aeronaves en la región.

El uso de cámaras OGI fijas, combinadas con análisis impulsados por IA, permite un monitoreo continuo de las instalaciones. Sistemas como FLIR ADGILE proporcionan detección y alertas automatizadas en tiempo real para fugas de metano. Este monitoreo continuo puede proporcionar advertencias tempranas de fugas, lo que permite una respuesta y mitigación más rápidas, reduciendo potencialmente las emisiones generales y los riesgos asociados.

Los drones equipados con cámaras OGI y algoritmos de IA ofrecen una solución eficiente para inspeccionar la vasta región de Vaca Muerta, incluyendo pozos,

oleoductos y otra infraestructura. La integración de datos satelitales con IA puede identificar posibles puntos críticos de fuga en toda la región, que luego pueden ser investigados con mayor detalle utilizando drones o métodos terrestres. Iniciativas como MethaneSAT y Carbon Mapper están proporcionando datos valiosos para este propósito. Un enfoque de múltiples niveles, que combina la vigilancia satelital para una cobertura amplia y la detección de anomalías con OGI mejorado por CV basado en drones y tierra para una inspección detallada, ofrece una solución robusta para Vaca Muerta.

Además, la visión por computadora puede analizar las transmisiones de video de las cámaras de vigilancia ya implementadas en las instalaciones de petróleo y gas para detectar indicadores visuales de fugas de gas o derrames de líquidos. Empresas como Plainsight y Visionify ofrecen suites de automatización visual impulsadas por IA para la industria del petróleo y el gas. Aprovechar la infraestructura existente mediante la adición de capacidades de visión por computadora impulsadas por IA puede proporcionar una forma rentable de mejorar la detección de fugas sin inversiones significativas en nuevo hardware.

VII. Aplicación de IAGEN en la Detección de Fugas de Metano

1. Funcionalidad y Alcance de IAGEN

La Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) es una rama de la inteligencia artificial que se centra en la creación de nuevo contenido, como modelos, imágenes, código o texto, a partir de datos existentes. Esta tecnología utiliza algoritmos avanzados para analizar grandes cantidades de información, identificar patrones y generar contenido nuevo y original que a menudo es indistinguible del creado por humanos.

Los modelos de IAGEN, en el contexto analizado, puede encargarse de analizar imágenes y videos capturados por cámaras especializadas, tanto de drones como de dispositivos fijos, instalados en zonas estratégicas de la infraestructura. Mediante algoritmos de visión por computadora, la tecnología identifica patrones visuales

asociados a la presencia de fugas, incluso bajo condiciones adversas de iluminación o en entornos complejos.

2. Tecnologías y Modelos Específicos

- Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Fundamentales para el procesamiento y análisis de imágenes, estas redes detectan anomalías y patrones que sugieren la presencia de fugas.
- Modelos de Segmentación Semántica: Permiten aislar y resaltar áreas específicas de las imágenes que podrían corresponder a emisiones de metano, mejorando la precisión de la detección.
- Algoritmos de Detección en Tiempo Real: Integrados en el sistema para analizar continuamente el flujo de video, generando alertas de inmediato ante la detección de posibles fugas.
- Integración con Sistemas de Gestión Operacional: Conexión directa con plataformas de monitoreo centralizado, permitiendo acciones correctivas inmediatas y una respuesta coordinada ante incidentes.

3. Beneficios Operativos y Estratégicos

- Detección Temprana y Precisa: La capacidad de identificar fugas en cuestión de segundos permite intervenir rápidamente, minimizando el impacto del incidente.
- Reducción de Costos: Al disminuir la dependencia de inspecciones manuales y reducir la frecuencia y gravedad de las reparaciones, se optimizan los costos operativos.
- Mejora en la Seguridad: Una respuesta rápida ante fugas reduce significativamente los riesgos para el personal y el medio ambiente, elevando el nivel de seguridad en las operaciones.
- Escalabilidad y Adaptabilidad: La solución puede adaptarse a diversas condiciones y configuraciones operativas en Vaca Muerta, lo que permite su integración en múltiples etapas de la cadena de producción.

VIII. Flujo Agéntico para la Implementación

1. Concepto de agentes de IAGEN

En los últimos años, la inteligencia artificial generativa (IAGen) ha revolucionado la manera en que interactuamos con la tecnología, permitiendo el desarrollo de sistemas capaces de generar contenido, responder preguntas complejas y asistir en tareas cognitivas de alta demanda. A partir de esta capacidad, surge una nueva arquitectura tecnológica: los agentes impulsados por IAGen. Estos agentes no son simples interfaces conversacionales, sino sistemas autónomos que pueden interpretar instrucciones, tomar decisiones, ejecutar tareas y aprender de sus interacciones con el entorno.

Un agente de IAGen combina grandes modelos de lenguaje con componentes adicionales como herramientas externas, memoria, planificación y ejecución autónoma. Esto les permite operar en entornos complejos, con capacidad para descomponer objetivos en pasos, coordinar múltiples acciones, interactuar con sistemas digitales (como bases de datos, APIs o documentos) y adaptarse a los cambios del contexto en tiempo real. Estas cualidades los distinguen de los chatbots tradicionales, y abren un espectro de aplicaciones más sofisticadas y personalizables.

En el ámbito organizacional, estos agentes se están utilizando para automatizar procesos, generar análisis de datos, asistir en la toma de decisiones y mejorar la experiencia del usuario, tanto interna como externamente. Por ejemplo, pueden asumir tareas de recursos humanos, legales, financieras o logísticas, e incluso, vinculadas a las áreas técnicas de procesos productivos, actuando como asistentes inteligentes que colaboran con equipos humanos. Esta capacidad de integrar conocimientos y ejecutar tareas de forma autónoma transforma la forma en que las organizaciones pueden escalar sus operaciones sin perder calidad ni control.

Además, los workflows agénticos —estructuras donde múltiples agentes colaboran entre sí para resolver problemas complejos— permiten distribuir responsabilidades

entre distintos perfiles de agentes, cada uno con funciones específicas. Esto genera entornos de trabajo híbridos donde humanos y agentes coexisten, optimizando tiempos, costos y resultados. La posibilidad de conectar agentes con herramientas como Google Drive, CRMs o plataformas de gestión documental amplía aún más sus capacidades.

El desarrollo de agentes impulsados por IAGen representa un paso crucial hacia una nueva era de automatización inteligente.

Entre los beneficios de los workflows auténticos impulsados por modelos de inteligencia artificial generativa, se encuentra la posibilidad de automatizar procesos productivos completos, de punta a punta, e incluso, agregar valor a partir del aprovechamiento de las habilidades de los modelos de lenguaje basados en dichas tecnologías.

Sin embargo, su implementación también plantea desafíos técnicos, éticos y jurídicos, desde el diseño responsable hasta la supervisión humana. Por eso, comprender su arquitectura, su lógica operativa y sus impactos potenciales es fundamental para su adopción efectiva y segura en diversos contextos profesionales.

2. Fases del Flujo de Trabajo con IAGEN diseñado y propuesto

El proceso de implementación de IAGEN se estructura en fases que aseguran una integración efectiva y una respuesta ágil ante incidentes:

a. Recolección de Datos:

- Captura de Imágenes y Videos: Utilización de drones y cámaras fijas estratégicamente ubicadas.
- Integración de Sensores Ambientales: Complemento de la información visual con datos de sensores de gas para una visión más completa.

b. Procesamiento y Análisis:

- Preprocesamiento de Imágenes: Mejora de la calidad visual mediante técnicas de normalización, ajuste de contraste y reducción de ruido.
- Aplicación de Modelos de Visión por Computadora: Empleo de CNNs y modelos de segmentación semántica para identificar patrones anómalos asociados a fugas.
- c. Generación de Alertas:
 - Interpretación de Resultados: Los algoritmos asignan un score de riesgo a cada imagen o video analizado.
 - Notificación Inmediata: Integración con sistemas de gestión centralizados que envían alertas a los equipos de respuesta.
- d. Respuesta y Mitigación:
 - Activación de Protocolos de Emergencia: Una vez confirmada la anomalía, se activa el protocolo de seguridad para intervenir y mitigar la fuga.
 - Registro y Documentación: Se archivan los datos del incidente para análisis y mejora continua.
- e. Retroalimentación y Mejora Continua:
 - Análisis Post-Evento: Evaluación de la efectividad del sistema y ajustes en los parámetros de detección.
 - Actualización de Modelos: Incorporación de nuevos datos para perfeccionar la precisión del sistema en futuras detecciones.

2. Descripción de los Agentes Involucrados

El sistema se compone de distintos agentes, cada uno con un rol específico dentro del flujo operativo:

- Agente de Captura: Equipos de drones y cámaras fijas responsables de la

recolección de imágenes y videos en tiempo real.

- Agente de Preprocesamiento: Módulo encargado de mejorar la calidad de las imágenes, eliminando interferencias y ajustando parámetros para optimizar la entrada de datos.
- Agente de Análisis: Núcleo de IAGEN que aplica algoritmos de visión por computadora para detectar anomalías asociadas a fugas de metano.
- Agente de Alerta: Sistema integrado que evalúa el score de riesgo y emite notificaciones inmediatas al centro de control.
- Agente de Retroalimentación: Módulo que analiza los incidentes registrados y ajusta el modelo para mejorar la detección en el futuro.

3. Ejemplo Concreto del Flujo Agéntico

Consideremos una instalación en Vaca Muerta con múltiples puntos críticos:

Paso 1: Un dron equipado con cámara infrarroja sobrevuela la instalación cada dos horas, capturando imágenes de zonas estratégicas.

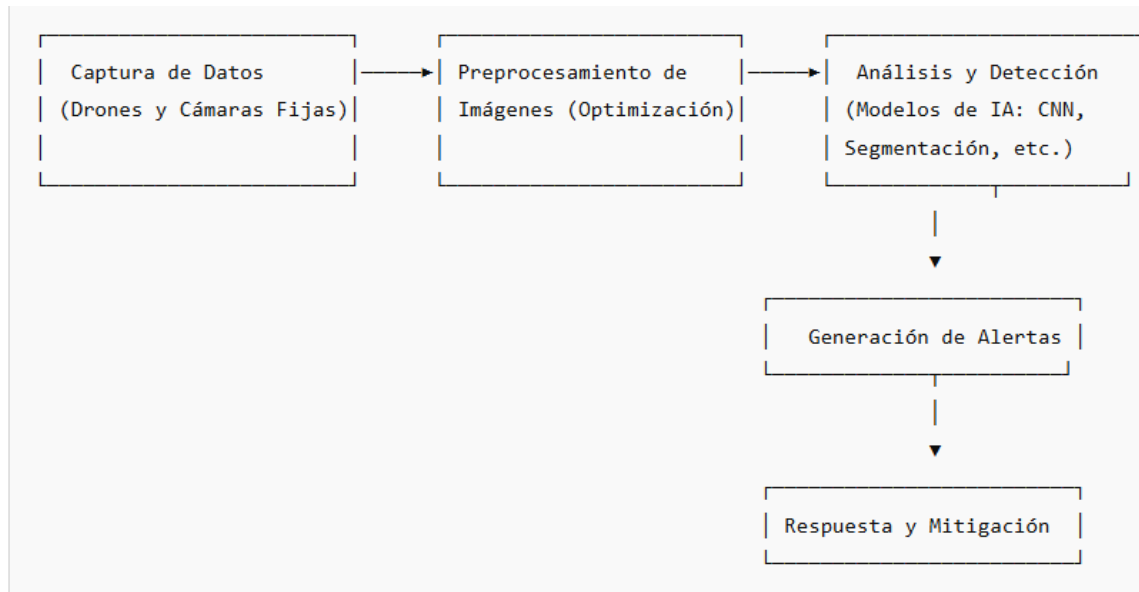
Paso 2: Las imágenes se transmiten a un servidor central donde el agente de preprocesamiento optimiza la calidad visual y elimina interferencias.

Paso 3: El agente de análisis identifica una anomalía térmica en la zona de tuberías, generando un score de riesgo elevado.

Paso 4: Ante el score superior al umbral definido, el agente de alerta envía una notificación inmediata al centro de control, activando los protocolos de emergencia.

Paso 5: Se despliegan equipos de intervención para evaluar y mitigar la fuga, mientras se documenta todo el proceso.

Paso 6: Tras la acción correctiva, el agente de retroalimentación recopila y analiza los datos para actualizar y ajustar el modelo, garantizando una mejora continua.



IX. Marco Regulatorio y Compromisos Ambientales en Argentina

Argentina ha asumido compromisos importantes en la lucha contra el cambio climático, incluyendo la presentación de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) en el marco del Acuerdo de París, donde se compromete a no exceder las emisiones netas de 349 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente para 2030. El país también ha anunciado su intención de reducir las emisiones de metano en al menos un 30% para finales de la década, tomando como referencia los niveles de 2020. Estos compromisos nacionales impulsan la necesidad de adoptar tecnologías eficaces de detección de emisiones en sectores clave como el petróleo y el gas.

El marco regulatorio argentino en relación con las actividades de petróleo y gas se establece tanto a nivel federal como provincial. Este panorama regulatorio en evolución, con un enfoque cada vez mayor en la medición y reducción de emisiones, probablemente impulsará una mayor adopción de tecnologías avanzadas de detección de metano, como los sistemas mejorados por visión por computadora.

Además de las regulaciones gubernamentales, existen iniciativas y colaboraciones industriales que promueven la reducción de emisiones de metano, como la Carta de Descarbonización de Petróleo y Gas (OGDC). Estos esfuerzos liderados por la industria,

junto con las regulaciones gubernamentales, pueden acelerar la adopción de mejores prácticas en la detección y mitigación de metano.

X. Métricas de Eficacia y Evaluación de Sistemas de Detección de Fugas de Metano

- La eficacia de los sistemas de detección de fugas de metano se evalúa mediante varias métricas clave.
- La tasa de detección o probabilidad de detección (PoD) indica el porcentaje de fugas de un determinado tamaño que el sistema puede detectar en condiciones específicas. Es crucial especificar la PoD junto con el umbral mínimo de detección (MDT) para comprender la fiabilidad del sistema.
- La precisión se refiere a la capacidad del sistema para identificar correctamente una fuga (bajos falsos positivos) y para localizar y cuantificar con exactitud la fuente de emisión. El tiempo de respuesta es el tiempo que tarda el sistema en detectar e informar de una fuga una vez que ocurre.
- La sensibilidad (MDT) es la tasa de fuga más pequeña que el sistema puede detectar de manera fiable.
- La tasa de falsas alarmas indica la frecuencia con la que el sistema señala incorrectamente una fuga.
- La precisión de la cuantificación es la exactitud con la que el sistema puede medir la tasa de emisión de metano.
- Finalmente, la resolución espacial es el nivel de detalle en la identificación de la ubicación de la fuente de la fuga, relevante para sistemas satelitales y basados en drones.

Para comparar el rendimiento de diferentes tecnologías de detección de fugas, es fundamental contar con protocolos de prueba y evaluación estandarizados. Iniciativas como el Centro de Evaluación de Tecnología de Emisiones de Metano (METEC) desempeñan un papel importante en este sentido. Unos KPI claramente definidos y medidos de manera consistente son esenciales para evaluar la eficacia de los sistemas de detección de fugas de metano y para tomar decisiones informadas sobre la

adopción de tecnología.

X. Recomendación para alcanzar soluciones basadas en IA e IAGEN a corto plazo y escalables

Inversión de corto plazo en equipos de implementación de agentes de IA en tecnología y capacitación: Se requiere inversión en pruebas de concepto y pruebas piloto. El foco aquí tiene que ser la formación del talento para implementar, ya que se verifica una tendencia de reducción de costos en sistemas que permiten automatización “no code” y “low code”. Para la primera etapa, también se recomienda recurrir a equipos con experiencia en diseño e implementación de agentes de IA. Por último, es clave formar un equipo “in house” para el acompañamiento y la apropiación de una cultura agéntica que redefine la interacción humano-máquina.

XI. Conclusión

La detección de fugas de metano es de suma importancia en la industria del petróleo y el gas, especialmente en áreas de alta producción como Vaca Muerta. Las emisiones de metano tienen un impacto significativo en el cambio climático, y su mitigación es crucial para alcanzar los objetivos climáticos globales y nacionales.

La visión por computadora, impulsada por algoritmos de inteligencia artificial, emerge como una herramienta poderosa para mejorar la precisión, la eficiencia y la automatización de la detección de fugas de metano. La combinación de tecnologías como las cámaras OGI con el análisis inteligente de imágenes ofrece un potencial significativo para la detección temprana y precisa de fugas en toda la infraestructura de petróleo y gas en Vaca Muerta. Un enfoque integral y profesional para la detección de fugas de metano, respaldado por un marco regulatorio sólido y la adopción de métricas de eficacia claras, es esencial para garantizar una producción de hidrocarburos responsable y sostenible en la región.

Adicionalmente,

- La aplicación de IAGEN para la detección de fugas de metano permite

respuestas ágiles y precisas, reduciendo el riesgo de incidentes críticos y optimizando la operación en Vaca Muerta.

- La integración de visión por computadora en entornos complejos ofrece mejoras sustanciales en términos de seguridad, eficiencia y reducción de costos operativos.
- La implementación de este sistema se alinea con las normativas ambientales y de seguridad, fortaleciendo la competitividad de las empresas en un mercado exigente.

Fuentes citadas

1. Argentina's Vaca Muerta Fuels Oil Production Surge - Brazil Energy Insight, acceso: febrero 17, 2025, <https://brazilenergyinsight.com/2025/03/13/argentinas-vaca-muerta-fuels-oil-production-surge/>
2. Vaca Muerta - Wikipedia, acceso: marzo 17, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Vaca_Muerta
3. Can oil and gas companies reduce their emissions at Vaca Muerta? - Dialogue Earth, acceso: febrero 17, 2025, <https://dialogue.earth/en/business/can-oil-and-gas-companies-reduce-their-emissions-at-vaca-muerta/>
4. Inadequate methane emissions data undermines oil and gas reports | Dialogue Earth, acceso: febrero 17, 2025, <https://dialogue.earth/en/climate/381775-inadequate-methane-emissions-data-undermines-oil-and-gas-reports/>
5. Geomechanical properties of the Vaca Muerta Formation - E3S Web of Conferences, acceso: febrero 17, 2025, https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/65/e3sconf_icegt2020_03013.pdf

6. The Vaca Muerta Formation (Late Jurassic - Early Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina: Sequences, Facies and Source Rock Characteristics - GeoLab Sur, acceso: febrero 17, 2025, https://www.geolabsur.com/Biblioteca/Legarreta_Villar_2015_VM_Urtec.pdf
7. Vaca Muerta Formation, Argentina by Ricardo Sebastian Martinez from U3 Explore, acceso: febrero 17, 2025, <https://www.u3explore.com/reports/vaca-muerta-formation-argentina>
8. Argentina oil and gas sector: Vaca Muerta shale can drive near-term growth and fuel medium-term opportunities - Deloitte, acceso: febrero 17, 2025, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/economy/americas/vaca-muerta-argentina-energy-sector-boom.html>
9. Argentina's crude oil and natural gas production near record highs - U.S. Energy Information Administration (EIA), acceso: febrero 17, 2025, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63924>
10. The Vaca Muerta Tribunal Delegation, acceso: febrero 17, 2025, <https://www.rightsofnaturetribunal.org/vaca-muerta/>
11. Balancing energy security and a healthy environment | SEI, acceso: febrero 17, 2025, <https://www.sei.org/publications/energy-environment-vaca-muerta-fracking/>
12. Vaca Muerta Case (Argentina) - International Rights Of Nature Tribunal, acceso: febrero 17, 2025, <https://www.rightsofnaturetribunal.org/cases/vaca-muerta-case/>
13. REPORT: Unearthing the truth & the power of people in Argentina - Earthworks, acceso: febrero 17, 2025, <https://earthworks.org/unearthing-the-truth-in-argentina-an-in-depth-exploration-of-vaca-muertas-environmental-impact-and-beyond/>
14. Argentina's Vaca Muerta: 10 Years of Fracking and Local Resistance - NACLA |, acceso: febrero 17, 2025, <https://nacla.org/argentina-vaca-muerta-fracking-resistance>
15. Using Machine Learning for Methane Leak Detection and Quantification, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.swri.org/markets/industrial-robotics-automation/blog/using-machine-learning-methane-leak-detection-quantification>

16. Optical Gas Imaging (OGI) Cameras - Opgal, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.opgal.com/fixed-optical-gas-imaging-ogi-cameras/>
17. Optical Gas Imaging - Infrared Cameras, Inc., acceso: marzo 3, 2025, <https://infraredcameras.com/industries-served/optical-gas-imaging>
18. Optical Gas Imaging | Infrared Gas Detection | Teledyne FLIR, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.flir.com/instruments/optical-gas-imaging/>
19. Gas Detection with Optical Gas Imaging (OGI) Cameras - Quickset, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.quickset.com/gas-leak-detection-ogi-cameras/>
20. Methane Leak Detection | Southwest Research Institute, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.swri.org/markets/energy-environment/oil-gas/fluids-engineering/methane-leak-detection>
21. Using AI to Reduce Methane Emissions - energynews, acceso: marzo 3, 2025, <https://energynews.pro/en/using-ai-to-reduce-methane-emissions/>
22. Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera, acceso: marzo 3, 2025, <https://ngi.stanford.edu/sites/ngi/files/media/file/1-s2.0-S030626191931685X-main.pdf>
23. Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera - NASA/ADS, acceso: marzo 3, 2025, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApEn..25713998W/abstract>
24. Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera | Request PDF - ResearchGate, acceso: marzo 3, 2025, https://www.researchgate.net/publication/336927362_Machine_vision_for_natural_gas_methane_emissions_detection_using_an_infrared_camera
25. Methane Point Instrument | SLB, acceso: marzo 3, 2025, <https://www.slb.com/products-and-services/decarbonizing-industry/methane-emissions-management/sees-end-to-end-emissions-solutions-family/sees-methane-point-instrument>
26. Comparing Approaches to Leak Detection and Repair for Upstream Oil & Gas, acceso: marzo 3, 2025,

<https://www.systemswithintelligence.com/blog/comparing-approaches-to-leak-detection-and-repair-for-upstream-oil-gas>

27. www.mdpi.com, acceso: marzo 3, 2025,

<https://www.mdpi.com/2227-9717/12/1/67#:~:text=The%20traditional%20method%20cannot%20specify,the%20surrounding%20leak%20is%20necessary.>

28. A new era in methane leak inspection - Sorama, acceso: marzo 3, 2025,

<https://sorama.eu/a-new-era-in-methane-leak-detection/>

29. Gas Detection Cameras | FLIR Industrial, acceso: marzo 3, 2025,

<https://www.flir.com/browse/industrial/gas-detection-cameras/>

30. FLIR GF77a CH4 OGI thermal camera for methane - Apliter, acceso: marzo 5, 2025,

<https://www.apliter.com/en/product/flir-gf77a-ch4-camara-termica-fija-ogi-metano/>

31. Satellites: a game-changer for methane leak detection? - Gas Outlook, acceso:

marzo 5, 2025,

<https://gasoutlook.com/analysis/satellites-a-game-changer-for-methane-leak-detection/>

32. www.flogistix.com, acceso: marzo 5, 2025,

<https://www.flogistix.com/methane-leak-detection#:~:text=Flogistix%20offers%20cutting%20edge%20methane,for%20unparalleled%20safety%20and%20precision.>

33. Drones Detecting and Sealing Greenhouse Gas Leaks - Inside Unmanned Systems,

acceso: marzo 5, 2025,

<https://insideunmannedsystems.com/drones-detecting-and-sealing-greenhouse-gas-leaks/>

34. SeekOps: Emissions Monitoring, Detection & Quantification, acceso: marzo 5, 2025,

<https://seekops.com/>

35. Drone Technology Advances Methane Leak Detection | Cat | Caterpillar, acceso:

marzo 5, 2025,

https://www.cat.com/en_US/blog/drone-technology-advances-methane-leak-detection.html

36. INPEX Conducts Successful Drone-based Gas Detection Test, acceso: marzo 5,

2025, <https://www.inpex.com/english/news/english/news/assets/pdf/20230427.pdf>

37. Methane Leak Detection - Flogistix, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.flogistix.com/methane-leak-detection>
38. Perfect solution for gas leak detection | GIS 320 - Thermal and infrared cameras, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.drone-thermal-camera.com/gas-leak-detection-gis320/>
39. Aerial Methane Leak Detection - Flogistix, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.flogistix.com/methane-leak-detection/aerial>
40. Integrating Methane Detection into Airborne Drones - YouTube, accesso: marzo 5, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=_24SN9_f5pk
41. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives - MDPI, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.mdpi.com/2411-5134/5/3/28>
42. Methane Leak Detection with a Drone: Proof of Concept - SPH Engineering, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.sphengineering.com/news/methane-leak-detection-with-a-drone-proof-of-concept>
43. Detection of Methane Leaks via a Drone-Based System for Sustainable Landfills and Oil and Gas Facilities: Effect of Different Variables on the Background-Noise Measurement - MDPI, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7748>
44. Detection of Methane Leaks via Drone in Release Trials: Set-Up of the Measurement System for Flux Quantification - MDPI, accesso: marzo 5, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/6/2467>
45. Dronedesk case study - innovation in methane detection, accesso: marzo 7, 2025, <https://dronedesk.io/case-study-innovation-in-methane-detection>
46. Case Study: Using Drones for Gas Monitoring and Detection - DJI Ferntech, accesso: marzo 7, 2025, <https://www.ferntech.co.nz/blog/news-case-studies/using-drones-for-gas-monitoring-and-detection>
47. Laser OGI for Methane Emission Detection and Quantification - Xplorobot, accesso: marzo 7, 2025, <https://www.xplorobot.com/laser-ogi>

48. Natural Gas Pipeline Leak Detection Methods Continue To Advance, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.aogr.com/web-exclusives/exclusive-story/natural-gas-pipeline-leak-detection-methods-continue-to-advance>
49. Detection technology | Methane - ExxonMobil, acceso: marzo 7, 2025, <https://corporate.exxonmobil.com/what-we-do/delivering-industrial-solutions/methane/detection-technology>
50. MethaneSAT | Solving a crucial climate challenge, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.methanesat.org/>
51. How satellites, algorithms and AI can help map and trace methane sources - Google's Keyword Blog, acceso: marzo 7, 2025, <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/how-satellites-algorithms-and-ai-can-help-map-and-trace-methane-sources/>
52. Machine Learning for Methane Detection and Quantification from Space - A survey - arXiv, acceso: marzo 7, 2025, <https://arxiv.org/html/2408.15122v1>
53. How MethaneSAT is different from other satellites - Environmental Defense Fund, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.edf.org/methanesat/how-this-satellite-different>
54. Latest images demonstrate MethaneSAT's unique, powerful capabilities, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.methanesat.org/project-updates/latest-images-demonstrate-methanesats-unique-powerful-capabilities>
55. Chevron Methane Report, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.chevron.com/-/media/shared-media/documents/chevron-methane-report.pdf>
56. Carbon Mapper: Methane, CO2 Detection Satellite | Greenhouse Gas, acceso: marzo 7, 2025, <https://carbonmapper.org/>
57. Deep learning for detecting and characterizing oil and gas well pads in satellite imagery, acceso: marzo 7, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11327246/>
58. New AI Model Detects Methane Emissions From Space More Accurately, acceso: marzo 7, 2025,

<https://www.asianscientist.com/2024/09/environment/new-ai-model-detects-methane-emissions-from-space-more-accurately/>

59. New satellite offers breakthrough in global methane emissions tracking - UC Berkeley Law, acceso: marzo 7, 2025, <https://www.law.berkeley.edu/article/center-for-law-energy-and-the-environment-tanager-1-satellite-global-methane-emission-tracking/>

60. Daily detection and quantification of methane leaks using Sentinel-3: a tiered satellite observation approach with Sentinel-2 and Sentinel-5p | NASA Airborne Science Program, acceso: marzo 10, 2025, https://airbornescience.nasa.gov/content/Daily_detection_and_quantification_of_methane_leaks_using_Sentinel-3_a_tiered_satellite

61. Case Study Library Details | Global Methane Initiative, acceso: marzo 10, 2025, <https://globalmethane.org/case-studies/library/details.aspx?id=14>

62. Coal Mining Methane Emissions | Case Study - GHGSat, acceso: marzo 10, 2025, <https://www.ghgsat.com/en/case-studies/coal-mining-methane/>

63. Automated detection of regions with persistently enhanced methane concentrations using Sentinel-5 Precursor satellite data - ACP - Recent, acceso: marzo 10, 2025, <https://acp.copernicus.org/articles/24/10441/2024/>

64. Oil & Gas AI Solutions & Use Cases at Plainsight, acceso: marzo 10, 2025, <https://plainsight.ai/services/oil-and-gas/>

65. FLIR ADGiLE Automated Methane Monitoring Solution with Optical Gas Imaging, acceso: marzo 10, 2025, <https://www.flir.com/products/flir-adgile?vertical=optical+gas&segment=solutions>

66. Leak detection | Vision AI monitoring for Workplace Safety - Visionify.ai, acceso: marzo 10, 2025, <https://visionify.ai/spills-and-leaks-detection/>

67. Liquid Leak Detection - Noema.tech, acceso: marzo 10, 2025, <https://noema.tech/leak/>

68. Open sourcing code to improve methane emission localisation and quantification, acceso: marzo 10, 2025, <https://www.shell.com/what-we-do/digitalisation/collaboration-and-open-innovation/op>

[en-sourcing-code-to-improve-methane-emission-localisation-and-quantification.html](#)

69. Argentina | NDC Action Project - UNEP, acceso: marzo 10, 2025,
<https://www.unep.org/ndc/action-area/argentina>

70. Argentina's Second Nationally Determined Contribution - UNFCCC, acceso: marzo 10, 2025,
<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-12/Argentinas%20Second%20NDC.pdf>

71. Argentina | iieci - World Bank, acceso: marzo 10, 2025,
<https://flaringventingregulations.worldbank.org/argentina>

72. Oil & Gas Laws and Regulations Report 2025 Argentina - ICLG.com, acceso: marzo 10, 2025, <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/argentina>

73. Argentina: Hydrocarbons – Regulation of the new O&G framework: Decree 1057/2024, acceso: marzo 10, 2025,
https://insightplus.bakermckenzie.com/bm/energy-mining-infrastructure_1/argentina-hydrocarbons-regulation-of-the-new-og-framework-decree-10572024

74. Legal 500 Country Comparative Guides 2025, acceso: marzo 10, 2025,
<https://www.legal500.com/guides/chapter/argentina-energy-oil-gas/?export-pdf>

75. Alternative Methane Detection Technologies Evaluation - Alberta Energy Regulator, acceso: marzo 17, 2025,
https://www.aer.ca/documents/reports/Alternative_methane_detection_tech_evaluation.pdf

76. Methane Detection Sensitivity and Probability of Detection - Bridger Photonics, acceso: marzo 17, 2025,
<https://www.bridgerphotonics.com/blog/methane-detection-sensitivity-probability-of-detection>

77. 5 Evaluation Guidelines and Principles, acceso: marzo 17, 2025,
<https://methane-1.itrcweb.org/5-evaluation-guidelines-and-principles/>

78. www.bridgerphotonics.com, acceso: marzo 17, 2025,
<https://www.bridgerphotonics.com/blog/methane-detection-sensitivity-probability-of-detection#:~:text=One%20of%20the%20proposed%20detection,rate%20of%2010%20kg%20Fhr.>

79. OGI Efficacy | METEC - Colorado State University, acceso: marzo 17, 2025, <https://metec.colostate.edu/ogi-efficacy/>
80. Methane gas monitor response times | Resources Safety & Health Queensland, acceso: marzo 17, 2025, <https://www.rshq.qld.gov.au/safety-notice/mines/methane-gas-monitor-response-times>
81. Irwin SX Gas Leak Detector | Southern Cross - Subsurface Solutions, acceso: marzo 17, 2025, <https://www.subsurfacesolutions.com/product-page/irwin-sx-gas-leak-detector>
82. Laser Methane Smart for Gas Leak Detection | Pergam USA, acceso: marzo 17, 2025, <https://pergamusa.com/handheld>
83. The Benefits of using Monitoring for Natural Gas Leak Detectors - NYC Rules, acceso: marzo 17, 2025, <https://rules.cityofnewyork.us/wp-content/uploads/2023/10/The-Benefits-of-Monitoring-Natural-Gas-Leaks-01-03-23.pdf>
84. Gas Monitor t90 Response Time - Newcastle Safety Servicing, acceso: marzo 17, 2025, <https://newcastlesafetyservicing.com/t90-response-time-testing/>
85. Evaluation of next generation emission measurement technologies under repeatable test protocols, acceso: marzo 17, 2025, <https://energy.colostate.edu/wp-content/uploads/sites/28/2022/12/426-7344-1-pb.pdf>
86. Understanding Methane Detection Sensitivity - Bridger Photonics, acceso: marzo 17, 2025, <https://www.bridgerphotonics.com/blog/understanding-methane-detection-sensitivity>
87. An Overview of Pipeline Leak Detection Technologies - ASGMT, acceso: marzo 17, 2025, <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2018/05/102.pdf>
88. Comparing Natural Gas Leakage Detection Technologies Using an Open-Source “Virtual Gas Field” Simulator - ACS Publications, acceso: marzo 17, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b06068>
89. Standard Test Procedures for Evaluating Leak Detection Methods - US EPA, acceso: marzo 17, 2025,

<https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/pipeline.pdf>

90. An Evaluation Study of Leak Testing Technologies for Watertight Plate Heat Exchangers - DiVA portal, acceso: marzo 17, 2025, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1762252/FULLTEXT01.pdf>

91. How to Evaluate and Verify External Leak Detection Systems | C-FER TECHNOLOGIES, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.cfertech.com/insights/how-to-evaluate-and-verify-external-leak-detection-systems/>

92. Evaluation of leak-detection technologies, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.cfertech.com/insights/evaluation-of-leak-detection-technologies/>