

WHITE PAPER TÉCNICO-CIENTÍFICO

De la medición periódica a la optimización continua del biogás de relleno sanitario

Marco vendor-neutral para observabilidad a nivel de pozo, CH₄-flow, validación de campo y traducción a generación eléctrica

From Periodic Measurement to Continuous Landfill-Gas Optimization

A vendor-neutral framework for well-level observability, methane-flow accounting, field validation and electricity-generation linkage

Autor intelectual: Cristian Albornoz Lillo

Versión 1.1 · 27 de agosto de 2026

ESTADO DE PUBLICACIÓN / White paper técnico-científico, versión 1.1. No ha sido sometido a revisión por pares. Presenta un marco metodológico, metrológico y de validación; no publica datos confidenciales de un operador ni afirma un uplift cuantitativo universal o un desempeño específico no validado.

Resumen

Los sistemas de captación de gas de relleno sanitario (LFG) operan sobre un medio heterogéneo y dinámico. La producción de gas, la permeabilidad de la masa de residuos, la infiltración de aire, la presencia de líquidos, la presión barométrica y las interacciones de presión y flujo entre pozos cambian espacial y temporalmente. En ese contexto, una medición puntual o agregada puede describir el estado del sistema en un instante, pero no necesariamente permite atribuir causas, evaluar persistencia ni cuantificar el efecto de una intervención sobre el metano útil recuperado.

Este white paper propone un marco vendor-neutral de optimización digital del campo de biogás basado en cinco principios: (i) observabilidad a nivel de pozo y header; (ii) uso del caudal normalizado de metano (denominado operacionalmente CH_4 -flow en este documento), evitando interpretar la concentración de CH_4 de manera aislada; (iii) trazabilidad temporal desde pozo → sector → planta → generación; (iv) validación experimental de toda mejora atribuida a la intervención; y (v) límites explícitos por capacidad de tratamiento y generación, de modo de evitar doble conteo o extrapolaciones físicas no sostenibles. La contribución del marco no consiste en reivindicar como novedosos el monitoreo continuo, la automatización de pozos o el wellfield tuning por sí solos, sino en integrarlos dentro de una secuencia auditable de medición, intervención, atribución, reconciliación aguas abajo y conversión energética limitada por capacidad real.

El marco no presupone que elevar el porcentaje de CH_4 produzca un incremento proporcional de energía. La variable físicamente relevante es el flujo normalizado de metano recuperado, condicionado además por disponibilidad de la planta, restricciones de calidad del combustible, pérdidas, tratamiento y eficiencia de conversión. Por ello, cualquier caso económico debe quedar subordinado a una validación de campo que demuestre el incremento atribuible y su persistencia.

El marco es aplicable como metodología a rellenos sanitarios que cuenten con extracción activa de LFG y valorización energética, pero su desempeño no puede generalizarse sin caracterización específica de cada sitio. El objetivo de esta publicación es formalizar la hipótesis, las variables, las ecuaciones, la arquitectura de datos y un protocolo de validación reproducible que permitan evaluar el modelo de manera técnica y contrastarlo posteriormente con evidencia de campo.

Palabras clave: landfill gas; biogás; methane recovery; methane flow rate; CH_4 -flow; wellfield optimization; continuous monitoring; digitalization; waste-to-energy; field validation.

Abstract

Landfill-gas collection systems operate in a heterogeneous and time-varying porous medium. Gas generation, waste permeability, air intrusion, liquid accumulation, barometric pressure and pressure-flow interactions among wells vary in space and time. Periodic or aggregated measurements can characterize system status at a given instant, but they do not necessarily provide sufficient spatial and temporal resolution to test causal hypotheses, assess persistence, or estimate defensibly the methane increment attributable to an operational intervention.

This white paper proposes a vendor-neutral framework for digital landfill-gas optimization based on well- and header-level observability, methane-flow accounting, temporal traceability from well to energy conversion, experimental field validation, and explicit capacity constraints. The contribution is not to claim continuous monitoring, automated well control or wellfield tuning as novel by themselves; rather, it is to integrate them into an auditable chain linking measurement, intervention, attribution, downstream reconciliation and energy conversion constrained by actual plant headroom. The framework intentionally separates methane concentration from recoverable methane flow and requires any economic claim to be subordinate to measured, attributable and persistent field performance.

The method is intended to be transferable across active landfill-gas collection systems, but site-specific performance cannot be inferred without local validation. This publication formalizes the hypothesis, variables, equations, data architecture and a reproducible field-validation protocol for technical scrutiny and subsequent experimental testing.

Contenido

1. Problema y oportunidad de investigación
2. Estado de la práctica: del monitoreo periódico a la observabilidad continua
3. Hipótesis, contribución y variables de evaluación
4. Definiciones, límites y convención de unidades
5. Arquitectura metodológica vendor-neutral
6. Métrica central: CH₄-flow, balance e incertidumbre
7. Jerarquía de observabilidad: pozo → header → planta → generación
8. Protocolo de validación de campo y atribución causal
9. Traducción del metano útil a energía y límites anti-sobreestimación
10. Datos, calidad, trazabilidad y analítica
11. Seguridad funcional, atmósferas explosivas y límites de este documento
12. Transferibilidad a rellenos sanitarios de Latinoamérica
13. Limitaciones, falsabilidad y agenda de investigación
14. Conclusiones

Referencias

Declaraciones de transparencia, intereses y contribución autoral

1. Problema y oportunidad de investigación

El gas de relleno sanitario se genera por degradación anaerobia de residuos y se extrae mediante pozos o colectores conectados a una red sometida a vacío. En proyectos de valorización, el gas capturado puede acondicionarse y utilizarse para generación eléctrica u otros usos energéticos. La US EPA describe esta arquitectura básica y señala que los operadores ajustan el campo de pozos para mejorar la captación; también identifica vacío, temperatura, composición y caudal como variables operativas relevantes [1–3].

El desafío es que el relleno no constituye una fuente estacionaria. La Global Methane Initiative (GMI) documenta cambios temporales y espaciales asociados, entre otros factores, a infiltración de aire, edad y disposición de residuos, presión atmosférica, precipitación, humedad y compactación. Por ello, la operación requiere monitoreo y ajuste de los pozos para mantener o aumentar la eficiencia de captación, evitar vacío excesivo y optimizar el uso energético [4].

Cuando la información se obtiene sólo mediante campañas periódicas, existen intervalos no observados entre mediciones. Además, las mediciones agregadas en headers o en la entrada a planta permiten reconocer que “algo cambió”, pero no necesariamente localizar qué pozos originaron el cambio. Esta brecha entre observación agregada y diagnóstico causal constituye el problema central abordado por este marco.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN / ¿Puede una arquitectura de observabilidad de mayor resolución temporal y espacial, con capacidad de intervención trazable a nivel de pozo, mejorar la identificación y validación de oportunidades de recuperación de metano útil respecto de una estrategia basada principalmente en mediciones periódicas y agregadas, sin introducir sobreextracción, infiltración de aire ni sobreestimación energética?

1.1 Alcance de la contribución

- Que la concentración de CH_4 y el caudal son variables diferentes y que el caudal normalizado de metano recuperado depende de ambas.
- Que la observabilidad por pozo aporta resolución espacial y temporal para formular y contrastar hipótesis causales que no pueden reconstruirse de forma única a partir de una sola medición agregada aguas abajo.
- Que un modelo de optimización debe incorporar restricciones operacionales, disponibilidad de conversión, incertidumbre y calidad de dato antes de traducir una mejora a MWh o valor económico.
- Que cualquier beneficio atribuible a automatización debe validarse en campo mediante un diseño predefinido de comparación, control de variables de confusión, reconciliación aguas abajo y criterios de persistencia.

1.2 Fuera de alcance

- No afirma un porcentaje universal de aumento de captación, generación o facturación.
- No establece que la automatización sustituya el criterio del operador, la ingeniería de campo o el mantenimiento de la red.
- No fija límites de combustible para un motor específico; éstos deben provenir del fabricante del paquete de generación.
- No clasifica áreas peligrosas ni declara equipos Ex/ATEX/IECEx.
- No declara funciones instrumentadas de seguridad, SIL, SIS ni interlocks de protección como validados.

2. Estado de la práctica: del monitoreo periódico a la observabilidad continua

La práctica convencional de wellfield tuning se apoya en mediciones en el cabezal del pozo. La EPA señala que los wellheads suelen disponer de puertos para temperatura, presión/vacío y composición, además de

dispositivos de medición de flujo como pitot u orificio. La combinación de presión y caudal permite detectar pozos que no producen o que requieren investigación adicional [2].

La misma guía advierte un punto operacional decisivo: un pozo puede estar bajo vacío y, sin embargo, no estar captando gas si existe una obstrucción o un nivel alto de líquido; por esa razón el flujo debe medirse y no inferirse únicamente desde la presión. Asimismo, cambios en caudal o calidad del header pueden alertar sobre problemas de campo, pero requieren investigación para identificar su origen [3].

La evolución hacia monitoreo automatizado ya se encuentra documentada en la industria. La EPA presentó el caso de McCommas Bluff Landfill, donde se implementó automated wellfield tuning con monitoreo y control del proceso de captación para maximizar la recolección de metano [5]. Un plan de monitoreo remoto automatizado presentado ante South Coast AQMD describe la evolución tecnológica desde mediciones periódicas de presión, temperatura, composición, caudal y líquidos hacia mediciones automáticas y continuas de ciertos parámetros [6].

La literatura científica también muestra el valor de observaciones de mayor resolución temporal. Izumoto et al. utilizaron un sistema automático para caracterizar variaciones diarias y horarias de emisiones y concentración de metano en superficie, mostrando información temporal que una baja frecuencia de muestreo puede omitir [7]. En un contexto de extracción, Kubal et al. reportaron cuatro años de seguimiento continuo de un pozo y concluyeron que el monitoreo continuo resultó útil para el control del relleno en postcierre [8]. Un trabajo previo de Martinec et al. documentó además monitoreo continuo de caudal y CH₄ en un pozo individual y destacó la mayor granularidad frente a mediciones aisladas [15].

Finalmente, estudios de diseño y modelación muestran que la heterogeneidad del residuo, la presión de succión y el arreglo de colectores influyen en la recuperación y en la intrusión de aire [9–10]. La literatura sobre eficiencia de captación también muestra una variabilidad importante entre sitios y a lo largo del tiempo, por lo que no resulta defendible utilizar un único factor universal sin justificar su aplicabilidad local [11,13–14].

2.1 Niveles de observabilidad

Nivel	Dato principal	Qué permite ver	Qué no resuelve por sí solo	Valor para optimización
Planta	Caudal/calidad total	Resultado agregado de captación	Localización de la causa	Bajo para diagnóstico causal
Header/sector	Caudal/calidad sectorial	Sector afectado	Pozo causal dentro del sector	Medio
Pozo periódico	Estado del pozo al momento de visita	Condición puntual y ajuste manual	Dinámica entre visitas y persistencia	Medio-alto
Pozo continuo	Serie temporal por pozo	Localización, dinámica, persistencia y respuesta	No sustituye inspección física ni mantenimiento	Alto
Pozo continuo + control	Medición + actuación	Medir–intervenir–comprobar	Requiere gobernanza, límites y validación	Muy alto

3. Hipótesis, contribución y variables de evaluación

La hipótesis de trabajo es que una fracción del potencial recuperable puede permanecer operacionalmente “oculta” cuando la resolución espacial o temporal de la medición no permite distinguir entre calidad de gas, cantidad de gas, restricciones de flujo y vacío, presencia de líquidos, infiltración de aire y disponibilidad de conversión. “Oculto” no significa que el gas exista necesariamente; significa que la información disponible no permite confirmar ni descartar con suficiente resolución dónde existe una oportunidad recuperable.

La contribución propuesta es un marco que convierte esa hipótesis en una secuencia falsable: observar → diagnosticar → intervenir → medir respuesta → atribuir resultado → verificar persistencia → reconciliar aguas

abajo → traducir a metano útil → aplicar límites de planta → decidir escalamiento. Si una intervención no produce un incremento atribuible y persistente, el marco debe registrarlo como resultado negativo y no como beneficio potencial.

3.1 Contribución diferenciadora frente al estado de la práctica

El monitoreo automatizado, el control de pozos y el wellfield tuning ya están documentados en la práctica industrial y en la literatura [5,6,15]. Por ello, este trabajo no reivindica esas capacidades aisladas como innovación. La contribución metodológica propuesta es su integración en una única cadena auditable: observabilidad a nivel de pozo → cuantificación mediante Q_{CH_4} → intervención trazable → respuesta de pozos vecinos y header → persistencia → reconciliación pozo–header–planta → limitación por headroom → energía incremental atribuible. Esta integración busca hacer explícita la frontera entre “dato disponible”, “hipótesis operacional”, “efecto demostrado” y “beneficio monetizable”.

3.2 Hipótesis falsable

La hipótesis se formula sobre el incremento atribuible de caudal normalizado de metano y no sobre la concentración de CH_4 , los MWh o la facturación como variable primaria.

Hipótesis	Formulación
H_0 · Hipótesis nula	Tras ajustar por variabilidad temporal, covariables predefinidas e incertidumbre de medición, la intervención no produce un incremento positivo de $\Delta Q_{CH_4,attrib}$ que simultáneamente satisfaga el criterio de decisión predefinido, persista durante la ventana de validación y reconcilie aguas abajo.
H_1 · Hipótesis alternativa	La intervención produce un incremento positivo de $\Delta Q_{CH_4,attrib}$ que satisface el criterio de decisión predefinido, persiste durante la ventana de validación y reconcilia aguas abajo sin vulnerar límites operacionales o de seguridad.

3.3 Variables de evaluación y jerarquía de endpoints

La jerarquía evita que una mejora secundaria o económica sustituya la demostración de la variable física primaria. Los criterios estadísticos y metrológicos específicos se fijan después de caracterizar el baseline y antes de la primera intervención.

Jerarquía	Variable(s)	Criterio de uso
Primario	$\Delta Q_{CH_4,attrib}$ [Nm^3/h]	Incremento atribuible de caudal normalizado de metano respecto del contrafactual o baseline ajustado.
Secundarios	Estabilidad, O_2 /air-intrusion risk, ε_{bal} , respuesta de vecinos, disponibilidad de datos	Caracterizan calidad, persistencia, interacción espacial y reconciliación del efecto.
Energético	$\Delta P_e,attrib$; $\Delta E_e,attrib$	Se calcula sólo después de demostrar y reconciliar $\Delta Q_{CH_4,attrib}$ y aplicar $P_e,headroom$.
Económico	Valor incremental atribuible	Resultado downstream; no constituye endpoint primario y sólo se calcula sobre energía validada y reglas contractuales aplicables.

3.4 Principios de diseño

P-01 · Vendor-neutral — El desempeño se especifica por variables, calidad, frecuencia, interoperabilidad y criterios de aceptación; no por marca.

P-02 · Observabilidad antes que automatización — No se automatiza una variable cuya medición, calidad o significado operacional no estén previamente caracterizados.

P-03 · CH₄-flow antes que CH₄% — La concentración se interpreta junto con el caudal; el objetivo energético es metano útil, no porcentaje aislado.

P-04 · Falsabilidad — Toda mejora debe poder ser refutada por datos de campo.

P-05 · No double counting — Un mismo incremento de gas no puede contabilizarse simultáneamente en múltiples beneficios energéticos.

P-06 · Capacity cap — La energía atribuida no puede exceder la capacidad disponible y técnicamente operable de tratamiento/generación.

P-07 · Safety boundary — La optimización nunca puede operar fuera de límites del fabricante, clasificación de áreas, permisos o funciones de protección validadas.

P-08 · Auditability — Cada dato, transformación y decisión debe conservar timestamp, origen, estado de calidad y versión del algoritmo.

4. Definiciones, límites y convención de unidades

Variable	Unidad	Criterio
Caudal normalizado	Nm ³ /h	0 °C y 101,325 kPa(a) (1 atm) en este documento. Si la fuente usa otra base, debe declararse y convertirse de manera trazable.
Presión	bar(g) / bar(a)	Puede conservarse in w.c. cuando sea dato original de fabricante o instrumento, pero debe declararse la conversión.
Temperatura	°C	Registrar temperatura del gas y, cuando corresponda, ambiente.
Composición	% v/v; ppm	CH ₄ , O ₂ , CO ₂ y gases traza según tecnología. Declarar base húmeda/seca cuando sea relevante.
Energía específica	kWh/Nm ³	El LHV utilizado debe tener fuente, composición y base de referencia explícitas.
Potencia	kW / MW	Potencia eléctrica neta o bruta debe etiquetarse.
Energía	MWh	Período de integración y fuente de medición deben indicarse.

4.1 Definición operacional de metano útil

En este marco, “metano útil” es el caudal normalizado de CH₄ que, después de las restricciones del sistema de captación, acondicionamiento y disponibilidad de conversión, puede ser efectivamente utilizado por la planta. La definición evita equiparar “gas generado en la masa de residuos” con “gas capturable”, y evita a su vez equiparar “gas capturado” con “gas convertible en electricidad”.

4.2 Nomenclatura y símbolos

Los símbolos siguientes se utilizan de manera consistente en las ecuaciones y criterios del marco.

Símbolo	Definición	Unidad
$Q_{LFG,i}$	Caudal normalizado de LFG del punto i	Nm ³ /h
$x_{CH_4,i}$	Fracción volumétrica de CH ₄ del punto i	–
$Q_{CH_4,i}$	Caudal normalizado de CH ₄ del punto i (CH ₄ -flow)	Nm ³ /h
$Q_{CH_4,header}$	Caudal normalizado de CH ₄ medido/reconciliado en header	Nm ³ /h
$Q_{CH_4,no-inst}$	Contribución estimada de puntos no instrumentados	Nm ³ /h
$Q_{CH_4,loss}$	Pérdidas explícitamente modeladas, cuando existan	Nm ³ /h
ε_{bal}	Residuo de reconciliación del balance	Nm ³ /h
$\Delta Q_{CH_4,attrib}$	Incremento de Q_{CH_4} atribuible a la intervención	Nm ³ /h
LHV_{CH_4}	Poder calorífico inferior del CH ₄ , base declarada	kWh/Nm ³
η_e	Eficiencia eléctrica válida para equipo y carga	–
$P_{e,headroom}$	Capacidad eléctrica adicional realmente disponible	kW
$\Delta P_{e,attrib}$	Potencia eléctrica incremental atribuible	kW
$\Delta E_{e,attrib}$	Energía eléctrica incremental atribuible	kWh o MWh
$u_c(y)$	Incertidumbre estándar combinada del mensurando y	unidad de y
$U(y)$	Incertidumbre expandida, $U = k \cdot u_c(y)$, con k declarado	unidad de y
MDE	Minimum Detectable Effect del diseño validado	unidad del endpoint

5. Arquitectura metodológica vendor-neutral

La arquitectura se define por funciones, no por productos. Un proveedor puede resolver una o varias capas siempre que cumpla los requisitos de medición, interoperabilidad, trazabilidad, mantenibilidad y seguridad establecidos para el sitio.

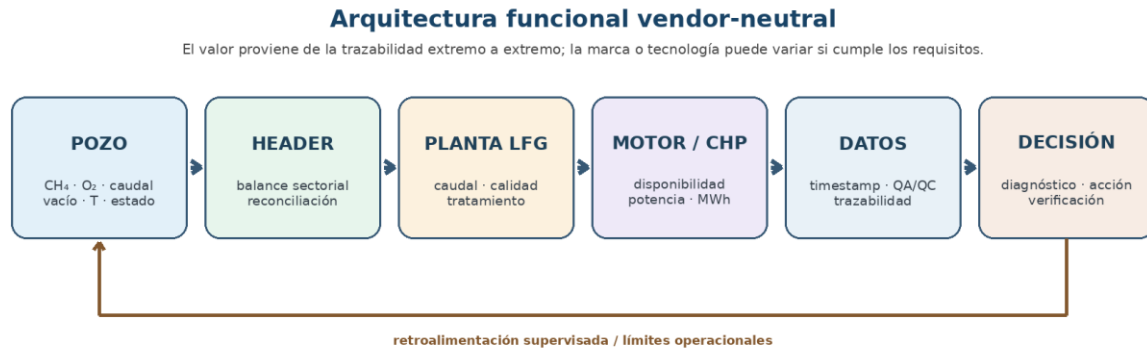


Figura 1. Arquitectura funcional vendor-neutral. La trazabilidad pozo → header → planta → generación → datos → decisión se conserva independientemente de la marca o tecnología seleccionada.

5.1 Capa de campo

- Medir variables críticas en cada punto seleccionado con timestamp y estado de calidad.
- Conservar posibilidad de inspección y ajuste manual seguro.
- Diferenciar presión del pozo, presión del sistema, caudal y composición.
- Registrar posición o estado de válvula cuando exista actuación automática.
- Detectar pérdida de comunicación, energía, calibración o sensor inválido como condición distinta de “cero proceso”.

5.2 Capa sectorial/header

- Medir el comportamiento agregado de grupos de pozos para reconciliar el balance de metano y localizar discrepancias.
- Usar el header como control cruzado de la suma de contribuciones de pozos, considerando pérdidas, incertidumbre y puntos no instrumentados.
- Identificar cambios sectoriales que justifiquen inspección física o reasignación de vacío.

5.3 Capa planta y generación

- Integrar caudal y calidad de gas a entrada de tratamiento/generación.
- Integrar disponibilidad y potencia de unidades de generación.
- No atribuir a la optimización del wellfield pérdidas o ganancias causadas por indisponibilidad eléctrica, mantenimiento de motores u otras causas externas.
- Aplicar límites de capacidad y de combustible del fabricante antes de convertir un incremento de CH₄-flow en MWh.

5.4 Requisitos mínimos vendor-neutral de instrumentación y adquisición

El marco no fija una exactitud, rango o frecuencia universal porque esos valores dependen del sitio, la dinámica del proceso y el MDE definido tras el baseline. En cambio, establece requisitos verificables de desempeño: la incertidumbre, resolución temporal y disponibilidad deben ser suficientes para distinguir el efecto que el protocolo pretende detectar, y deben quedar documentadas antes de la intervención.

Variable/función	Criterio técnico mínimo	Metrología / QA-QC	Datos / interoperabilidad
CH ₄	Tecnología apta para matriz LFG; interferencias, base húmeda/seca y tiempo de respuesta declarados.	Calibración/verificación con patrón gaseoso trazable o referencia documentada; incertidumbre declarada y compatible con MDE.	Timestamp sincronizado; raw + quality flag; pérdida/calibración ≠ cero proceso.

Variable/función	Criterio técnico mínimo	Metrología / QA-QC	Datos / interoperabilidad
O ₂	Sensibilidad adecuada al rango operacional del sitio; interferencias y límite de cuantificación declarados.	Zero/span y verificación periódica según fabricante y criticidad; incertidumbre documentada.	Usado como indicador de riesgo/condición operacional, no como límite universal del marco.
CO ₂ y gases traza	Incluir cuando sean necesarios para balance, diagnóstico, tratamiento o requisitos del sitio.	Método y rango definidos por matriz de gas y objetivo de medición.	No se exige universalmente para toda arquitectura.
Presión/vacío	Sensor compatible con bajas presiones y condiciones de condensación; referencia bar(g)/bar(a) o conversión documentada.	Cero, deriva y montaje incluidos en QA/QC; incertidumbre declarada.	Muestreo suficiente para capturar respuesta a intervención y cambios de red.
Caudal LFG	Principio compatible con gas húmedo, baja presión, geometría y condensado; condiciones normalizadas explícitas.	Efectos de instalación, perfil de flujo y compensaciones incluidos en presupuesto de incertidumbre.	Salida en Nm ³ /h sobre base declarada; raw data conservado.
Temperatura	Rango y montaje coherentes con gas/ambiente y compensaciones requeridas.	Verificación y trazabilidad acordes al uso del dato.	Registrar junto con timestamp y estado de calidad.
Válvula/actuación	Posición o estado real distinguible del comando cuando exista automatización.	Fail state y override manual documentados; actuación subordinada a límites aprobados.	Toda intervención debe conservar setpoint, hora, actor/origen y motivo.
Sistema de datos	Sincronización temporal, versionado, estado de calidad y retención de dato bruto.	No sustituir automáticamente datos inválidos por cero; registrar calibración y mantenimiento.	Interfaz documentada y exportable para reconciliación y auditoría.

6. Métrica central: CH₄-flow, balance e incertidumbre

La concentración de metano expresa una fracción volumétrica; por sí sola no informa cuántos Nm³/h de CH₄ están siendo recuperados. Dos corrientes con distinta concentración pueden transportar cantidades de metano diferentes si sus caudales también difieren. En este documento se utiliza “CH₄-flow” como abreviatura operacional del caudal volumétrico normalizado de metano Q_CH₄; el término no pretende definir una nueva magnitud metrológica estandarizada.

Ecuación 1 — Caudal normalizado de metano (CH₄-flow): $Q_{CH_4,i}(t) = Q_{LFG,i}(t) \times x_{CH_4,i}(t)$

Q_CH₄,i: caudal volumétrico normalizado de CH₄ del punto i [Nm³/h]; Q_LFG,i: caudal volumétrico normalizado de LFG [Nm³/h]; x_CH₄,i: fracción volumétrica de CH₄ [0–1], sobre una base de humedad compatible con la del caudal.

Esta ecuación no constituye por sí sola un algoritmo de control. Es una transformación física mínima que permite comparar pozos y períodos sobre una base coherente. Su validez depende de la calidad de la medición de caudal, de la normalización a condiciones de referencia y de la representatividad de la medición de composición. La base húmeda o seca de caudal y composición debe declararse y mantenerse consistente, o corregirse explícitamente.

6.1 Balance sectorial

$$\text{Ecuación 2 — Reconciliación sectorial: } Q_{\text{CH}_4, \text{header}}(t) \approx \sum Q_{\text{CH}_4, i, \text{inst}}(t) + Q_{\text{CH}_4, \text{no-inst}}(t) - Q_{\text{CH}_4, \text{loss}}(t) + \varepsilon_{\text{bal}}(t)$$

La reconciliación entre pozos y header debe considerar puntos no instrumentados, pérdidas o fugas, incertidumbre de medición, diferencias de sincronización y condiciones transitorias. ε_{bal} representa el residuo de balance; no debe interpretarse automáticamente como fuga.

6.2 Indicadores complementarios

Indicador	Propósito
Methane-flow uplift	Cambio de Q_{CH_4} respecto de baseline ajustado.
Stability index	Variabilidad temporal del CH_4 -flow y de variables de calidad dentro de una ventana definida.
Air-intrusion risk	Indicador basado en O_2 y, cuando esté disponible, N_2 /balance gas, junto con vacío, temperatura y tendencia. Los límites deben provenir de normativa, permisos e ingeniería del sitio.
Well responsiveness	Cambio de variables después de una intervención controlada.
Data availability	Porcentaje de intervalos con dato válido y trazable.
Attribution confidence	Nivel de confianza de que el cambio observado se debe a la intervención y no a un confusor.

6.3 Presupuesto de incertidumbre metrológica

La decisión sobre uplift debe considerar la incertidumbre del mensurando y no sólo la dispersión temporal del proceso. Conforme al enfoque GUM del JCGM [19], cada magnitud derivada debe acompañarse de un modelo de medición, sus fuentes de incertidumbre y la propagación correspondiente. Para $Q_{\text{CH}_4} = Q_{\text{LFG}} \cdot x_{\text{CH}_4}$, una forma general de la incertidumbre estándar combinada es:

$$\text{Ecuación 3 — } u_c^2(Q_{\text{CH}_4}) = x_{\text{CH}_4}^2 \cdot u^2(Q_{\text{LFG}}) + Q_{\text{LFG}}^2 \cdot u^2(x_{\text{CH}_4}) + 2 \cdot Q_{\text{LFG}} \cdot x_{\text{CH}_4} \cdot \text{cov}(Q_{\text{LFG}}, x_{\text{CH}_4})$$

Si Q_{LFG} y x_{CH_4} pueden tratarse como independientes, el término de covarianza se anula. La incertidumbre expandida se expresa como $U = k \cdot u_c$, declarando el factor de cobertura k . Si la no linealidad o las distribuciones de entrada lo justifica, n, puede utilizarse propagación Monte Carlo conforme a JCGM 101.

El MDE no se fija universalmente en este white paper. Debe estimarse con el baseline, considerando variabilidad natural, autocorrelación, estructura pozo/header, frecuencia efectiva de observación e incertidumbre metrológica; una vez definido, se congela antes de la primera intervención.

7. Jerarquía de observabilidad: pozo → header → planta → generación

El marco propone una jerarquía de reconciliación. Cada nivel responde una pregunta diferente. El pozo aporta resolución para localizar cambios y contrastar hipótesis; el header permite agregar y reconciliar; la planta permite verificar cuánto gas utilizable llega al proceso; y la generación permite medir cuánto de ese combustible fue convertido efectivamente en energía.

Nivel	Pregunta	Datos mínimos
Pozo	¿Qué está produciendo o restringiendo este punto?	CH ₄ , O ₂ , CO ₂ , presión/vacío, caudal, temperatura, líquidos cuando aplique.
Sector/Header	¿El cambio es local o sectorial?	Composición, presión, caudal agregado, balance respecto de pozos.
Planta LFG	¿Cuánto combustible utilizable llega realmente?	Caudal total, calidad, tratamiento, disponibilidad de blower/conditioning.
Generación	¿Cuánto fue convertido?	Disponibilidad de unidades, potencia, MWh, trips y restricciones de combustible.
Economía	¿Qué parte del cambio es monetizable?	Sólo energía incremental atribuible, neta de límites y reglas contractuales.

8. Protocolo de validación de campo y atribución causal

Una hipótesis técnico-científica debe poder ser refutada. Por ello, el supuesto de “potencial recuperable” debe someterse a un diseño de validación que permita separar, con un criterio predefinido, el efecto de la intervención de la variabilidad natural, la incertidumbre de medición y los cambios externos.

8.1 Fases mínimas de una validación

A. Baseline instrumentado — Medir sin cambiar deliberadamente el régimen de operación, salvo acciones de seguridad o mantenimiento necesarias. Caracterizar variabilidad natural y calidad de dato.

B. Selección de candidatos — Elegir pozos/sectores con criterio transparente: potencial de CH₄-flow, estabilidad, restricciones, líquidos, air-intrusion risk y capacidad downstream.

C. Intervención controlada — Modificar un conjunto acotado de variables operativas respetando límites del sitio; registrar hora, operador, setpoint y motivo.

D. Respuesta inmediata — Medir cambio en pozo, pozos vecinos, header y planta para detectar interacción y desplazamiento de gas.

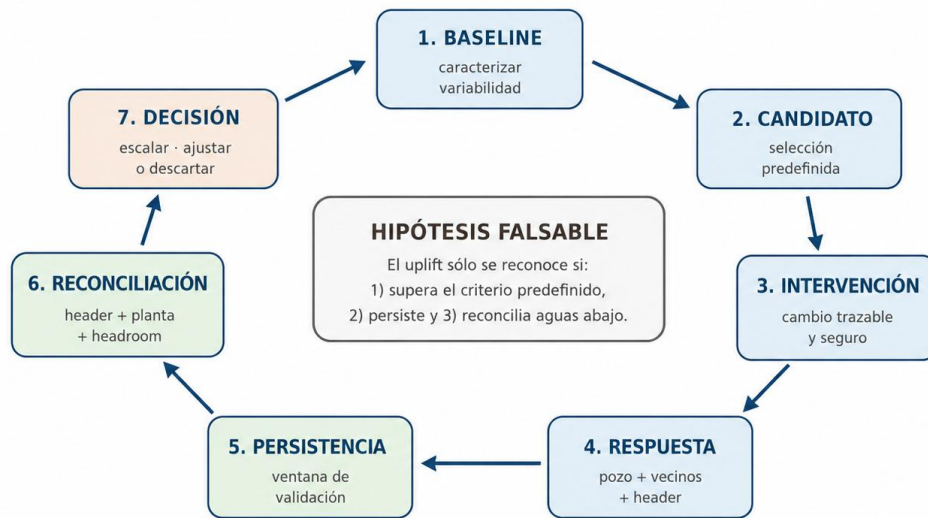
E. Persistencia — Verificar que el uplift no sea un transiente corto ni consecuencia de un cambio meteorológico, de carga o de disponibilidad de planta.

F. Reconciliación energética — Traducir sólo el incremento atribuible y utilizable a potencia/energía, aplicando límites.

G. Decisión — Escalar, reconfigurar o descartar la hipótesis según evidencia.

Ciclo de validación de campo

La intervención sólo se atribuye a beneficio cuando supera incertidumbre, persiste y reconcilia aguas abajo.



El protocolo se congela antes de la primera intervención; los criterios de exclusión y decisión no se ajustan retrospectivamente al resultado.

Figura 2. Ciclo de validación de campo. El beneficio sólo se atribuye cuando el efecto supera el criterio predefinido, persiste y reconcilia aguas abajo; de lo contrario se ajusta o descarta.

8.2 Variables de confusión que deben controlarse

- Presión barométrica y meteorología relevante.
- Cambios de disposición de residuos o cobertura.
- Mantenimiento de pozos, laterales, headers, blowers o tratamiento.
- Extracción de lixiviados/condensado y cambios de nivel de líquido.
- Cambios de disponibilidad o carga de motores.
- Cambios de setpoints globales de vacío.
- Deriva, calibración o reemplazo de sensores.
- Intervenciones simultáneas en pozos vecinos.

8.3 Recomendación de diseño experimental

El diseño estadístico debe seleccionarse y congelarse antes de observar los resultados postintervención. No se prescribe un único test universal porque la estructura del campo y la disponibilidad de controles determinan el método apropiado. La variable primaria es $\Delta Q_{CH_4, attrib}$.

a) Con controles contemporáneos y despliegue escalonado. Cuando existan pozos o sectores comparables aún no intervenidos, utilizar un enfoque de diferencias-en-diferencias o modelo longitudinal equivalente que represente explícitamente el momento de adopción, covariables y heterogeneidad temporal. La hipótesis de tendencias paralelas debe evaluarse y su plausibilidad documentarse; un simple before/after no es suficiente [21].

b) Sin control contemporáneo defendible. Utilizar una serie temporal interrumpida con modelo de impacto definido a priori, incorporando autocorrelación, tendencia/estacionalidad cuando corresponda y confusores dependientes del tiempo [20]. La ausencia de un control reduce la confianza causal y debe declararse.

c) Dependencia espacial y jerárquica. Cuando la cantidad y estructura de datos lo permitan, el modelo debe representar la agrupación de observaciones por pozo, sector/header y tiempo, evitando tratar observaciones correlacionadas como independientes.

d) MDE y reglas de decisión. El MDE, el umbral de significancia si se utiliza, la potencia objetivo, la ventana de persistencia y cualquier ajuste por comparaciones múltiples deben definirse tras el baseline y antes de la intervención. Este marco no impone $p = 0,05$ ni un porcentaje universal.

e) Criterios de exclusión. Intervalos afectados por calibración, sensor inválido, mantenimiento, override de seguridad, indisponibilidad downstream u otros eventos predefinidos se tratan según reglas congeladas. No pueden excluirse retrospectivamente sólo porque deterioren el resultado.

f) Sensibilidad. El resultado primario debe acompañarse de análisis de sensibilidad frente a especificación del baseline, covariables, datos faltantes y ventanas temporales cuando estas decisiones puedan cambiar materialmente la conclusión.

CRITERIO DE FALSABILIDAD / Una intervención se considera no demostrada cuando el cambio observado no satisface el criterio estadístico predefinido respecto de la incertidumbre de medición y la variabilidad del baseline, no persiste durante la ventana de verificación, o no puede reconciliarse aguas abajo dentro del presupuesto de incertidumbre. En ese caso no debe atribuirse beneficio a la intervención.

8.4 Prerregistro y congelamiento del protocolo

Antes de la primera intervención debe congelarse una versión identificable del protocolo que contenga, como mínimo: variable primaria y secundarias; población/puntos incluidos; ventana de baseline; MDE; presupuesto de incertidumbre; modelo estadístico; covariables; criterios de exclusión; tratamiento de datos faltantes; ventana de persistencia; reglas de reconciliación y criterios de decisión. La versión debe quedar fechada y protegida contra edición retrospectiva mediante repositorio con timestamp, control documental inmutable o hash criptográfico verificable. Cualquier desviación posterior se registra como enmienda, con fecha y justificación, y no sustituye silenciosamente el protocolo original.

9. Traducción del metano útil a energía y límites anti-sobreestimación

La potencia eléctrica potencial de una corriente de metano puede expresarse a partir de su caudal normalizado y su poder calorífico inferior (LHV). Sin embargo, atribuir energía incremental a una intervención requiere trabajar con el incremento de CH_4 efectivamente demostrado, la eficiencia eléctrica válida para la condición de carga y el headroom real de generación. Esos parámetros deben provenir del fabricante, del sistema de medición del activo o de una medición validada específica del sitio.

Ecuación 4 — Potencia eléctrica potencial: $P_{e,pot}(t) = Q_{\text{CH}_4,useful}(t) \times LHV_{\text{CH}_4} \times \eta_e(t)$

$P_{e,pot}$: potencia eléctrica potencial; LHV_{CH_4} : poder calorífico inferior del CH_4 sobre la misma base normalizada del caudal; $\eta_e(t)$: eficiencia eléctrica válida para el equipo y condición de carga. Debe declararse si la potencia es bruta o neta y tratar de forma consistente los consumos auxiliares.

Ecuación 5 — Potencia incremental atribuible: $\Delta P_{e,attrib}(t) = \min[\Delta Q_{\text{CH}_4,attrib}(t) \times LHV_{\text{CH}_4} \times \eta_e(t), P_{e,headroom}(t)]$

$\Delta Q_{\text{CH}_4,attrib}$ es sólo el incremento de metano útil atribuido a la intervención. $P_{e,headroom}$ es la capacidad eléctrica adicional realmente disponible en ese instante, considerando unidades operables y potencia ya utilizada. Esta formulación evita convertir en MWh un incremento de gas que la planta no puede recibir.

$$\text{Ecuación 6 — Energía incremental atribuible: } \Delta E_{e, \text{attrib}} = \int_T \Delta P_{e, \text{attrib}}(t) dt$$

La integración debe realizarse únicamente sobre intervalos con datos válidos y trazables. Las reglas para datos faltantes, indisponibilidad y consumos auxiliares deben definirse antes del análisis.

9.1 Cinco barreras contra el doble conteo

- No contabilizar como energía el gas que no alcanza la planta.
- No contabilizar dos veces un incremento capturado en pozo y luego nuevamente en header.
- No contabilizar como uplift del wellfield una recuperación debida a reparar un motor o blower.
- No extrapolar horas con dato válido a períodos con indisponibilidad no demostrada.
- No monetizar energía que exceda la capacidad contractual, técnica o la disponibilidad efectiva de generación.

10. Datos, calidad, trazabilidad y analítica

El valor de una arquitectura digital depende tanto de la calidad del dato como de la cantidad de sensores. La EPA y GMI enfatizan la importancia de monitorear sistemáticamente composición, presión/vacío, temperatura y flujo, mientras que los enfoques contemporáneos de monitoreo automatizado agregan continuidad, telemetría y análisis [3–6].

10.1 Registro mínimo por observación

- Tag único del punto y ubicación lógica/física.
- Timestamp con zona horaria y sincronización documentada.
- Valor medido y unidad.
- Condición normalizada cuando aplique.
- Estado de calidad: válido, estimado, inválido, en calibración, sin comunicación.
- Identificación de sensor, rango y versión/calibración.
- Posición de válvula o setpoint cuando exista actuación.
- Evento de operador/intervención asociado.
- Versión del algoritmo o regla que generó una recomendación.

10.2 Analítica recomendada

- Series temporales por pozo y superposición con pozos vecinos.
- Ranking de CH₄-flow con bandas de incertidumbre de medición.
- Detección de outliers y cambios de régimen.
- Reconciliación pozo–header–planta.
- Alertas por degradación de calidad de dato antes que alertas de proceso.
- Análisis de respuesta posterior a cada intervención.
- Reportes de beneficio sólo sobre datos validados y atribuibles.

10.3 Datos faltantes, imputación y control de calidad

La ausencia de dato no equivale a valor cero de proceso. Cada observación debe conservar un estado de calidad independiente del valor numérico. Para el endpoint primario, la imputación o interpolación sólo puede utilizarse si fue predefinida y metodológicamente justificada; de lo contrario, el intervalo se trata como no observado. Las reglas de exclusión e imputación deben aplicarse de igual forma a períodos favorables y desfavorables, y cualquier método de imputación debe acompañarse de análisis de sensibilidad cuando pueda modificar la conclusión.

- Los datos brutos se conservan junto con los valores procesados; una corrección posterior no debe sobrescribir el registro original.

- Un sensor en calibración, inválido o sin comunicación debe identificarse explícitamente y no transformarse automáticamente en “0”.
- Los intervalos sin cobertura suficiente para demostrar $\Delta Q_{CH_4,attrib}$ no generan beneficio atribuible salvo que exista una regla conservadora predefinida y auditada.
- Los cambios de algoritmo, filtros, ventanas de agregación o reglas de calidad deben versionarse para permitir reproducir exactamente un resultado histórico.

11. Seguridad funcional, atmósferas explosivas y límites de este documento

La optimización de un campo de LFG ocurre en un entorno potencialmente peligroso. Este white paper no sustituye la clasificación de áreas, el diseño eléctrico para atmósferas explosivas, la evaluación de riesgos de proceso, la especificación de funciones de seguridad ni los límites de combustible del fabricante. Esos elementos pertenecen a la ingeniería específica del sitio y deben resolverse con la normativa, certificados, permisos y datos aplicables.

Como criterio de gobernanza, ningún algoritmo de optimización debe tener autoridad para sobrepasar límites de seguridad, límites del fabricante o funciones de protección independientes. Las acciones automáticas deben ser trazables, reversibles cuando corresponda y quedar subordinadas a la filosofía de seguridad aprobada.

11.1 Marcos de referencia para la ingeniería específica

- IEC 60079 — Explosive atmospheres. La parte aplicable depende del equipo, método de protección, instalación y clasificación de área [16].
- Directiva 2014/34/UE (ATEX) — aplicable a equipos y sistemas de protección comercializados bajo el marco regulatorio de la Unión Europea, o cuando se exija contractualmente como referencia de conformidad [18].
- IEC 61511 — Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector, únicamente cuando existan SIF/SIS dentro del alcance de la instalación [17].

LÍMITE DE SEGURIDAD / Este marco no autoriza setpoints ni acciones fuera de límites aprobados. Certificación Ex, clasificación de áreas, límites de combustible, funciones de protección y cualquier SIF/SIS deben provenir de documentación oficial y de la ingeniería específica del sitio.

12. Transferibilidad a rellenos sanitarios de Latinoamérica

La GMI ha desarrollado una guía internacional para proyectos de energía con LFG [4], y la EPA publicó un modelo específico para Centroamérica que exige información y supuestos propios del sitio para estimar generación y recuperación [12]. Estas referencias respaldan el uso de una estructura metodológica común, pero no la transferencia automática de parámetros o resultados entre rellenos.

Por tanto, la transferibilidad propuesta es metodológica: la secuencia de medición, balance, intervención, atribución y validación puede aplicarse a distintos rellenos. En cambio, los setpoints, límites, coeficientes, recuperación esperada, número de puntos a instrumentar y retorno económico son específicos de cada activo.

12.1 Condiciones mínimas de aplicabilidad

- Sistema activo de captación con capacidad de medir o instalar medición en puntos representativos.
- Identificación razonable de pozos, laterales y headers.
- Posibilidad de obtener caudal y composición sobre una base temporal trazable.
- Acceso a datos de planta y, si existe valorización eléctrica, a disponibilidad y MWh.
- Capacidad de ejecutar intervenciones controladas sin comprometer seguridad o cumplimiento.

- Histórico suficiente para construir baseline o, en su defecto, un período inicial instrumentado para crearlo.

12.2 Qué no debe transferirse sin validación

- Porcentaje esperado de incremento de captación.
- Concentraciones objetivo de CH₄ u O₂.
- Vacío objetivo por pozo.
- Eficiencia eléctrica del CHP.
- LHV utilizado para liquidación energética.
- Número de sensores o proporción de pozos automatizados.
- Payback, ROI o proyección de facturación.

13. Limitaciones, falsabilidad y agenda de investigación

Esta publicación es deliberadamente conservadora. Formaliza un marco de investigación y operación, pero no presenta un conjunto de datos público y anonimizado que permita reproducir estadísticamente el uplift de un caso real. En consecuencia, no sostiene afirmaciones cuantitativas universales sobre desempeño.

13.1 Limitaciones de esta publicación

- No incluye dataset público de series temporales por pozo.
- No incluye resultados de un piloto con diseño experimental publicado.
- No incluye incertidumbre metrológica cuantificada por tecnología de sensor.
- No incluye límites de motores específicos ni curvas de eficiencia por carga.
- No demuestra todavía causalidad entre automatización y MWh incrementales en un sitio identificado.
- No ha sido sometido a revisión por pares ni constituye una validación independiente del desempeño de una solución específica.
- El protocolo estadístico definido en este marco aún no ha sido ejecutado sobre un dataset público de intervención; por tanto, no existe todavía una estimación empírica publicada de $\Delta Q_{CH_4, attrib}$.

13.2 Líneas de validación y trabajo futuro

1. Prerregistrar y congelar el protocolo de validación, la variable primaria, MDE, presupuesto de incertidumbre, modelo estadístico y criterios de exclusión antes de la primera intervención.
2. Anonimizar y publicar un dataset mínimo con series temporales de variables clave o, si existe restricción contractual, publicar estadísticas agregadas reproducibles.
3. Cuantificar la incertidumbre de caudal, composición y reconciliación de metano.
4. Aplicar comparación baseline/intervención/control y análisis estadístico de uplift y persistencia.
5. Incluir respuesta downstream en header/planta para descartar desplazamiento de gas entre pozos.
6. Reportar resultados positivos y negativos.
7. Someter los resultados experimentales futuros a revisión independiente y, cuando la evidencia sea reproducible, a revisión por pares.

14. Conclusiones

La optimización de un campo de biogás no puede reducirse a maximizar la concentración de CH₄. El resultado energético depende del caudal normalizado de metano que se recupera, de cuánto de ese caudal llega en condición utilizable a la planta y de cuánto puede convertirse efectivamente dentro de los límites del sistema.

La observabilidad a nivel de pozo aporta la resolución necesaria para localizar cambios y contrastar hipótesis que el monitoreo agregado no puede resolver de manera única. Sin embargo, mayor instrumentación no equivale automáticamente a mayor recuperación: el valor debe demostrarse mediante intervenciones

controladas, reconciliación aguas abajo, control de confusores, cuantificación de incertidumbre y verificación de persistencia.

El marco propuesto convierte la hipótesis de potencial recuperable en una metodología falsable. Si el campo demuestra un incremento de Q_{CH_4} atribuible, persistente y utilizable dentro de los límites del sistema, existe evidencia para considerar escalamiento. Si no lo demuestra, el resultado debe limitar o detener el escalamiento. Esa disciplina permite evaluar la digitalización del campo de LFG como ingeniería basada en evidencia y no como una extrapolación no verificada.

Referencias

- [1] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Landfill Methane Outreach Program (LMOP). “Basic Information about Landfill Gas.” Actualizado 12-09-2025. <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- [2] U.S. EPA, LMOP. “LFG Energy Project Development Handbook – Chapter 7: Best Practices for Landfill Gas Collection System Design and Installation.” Actualizado julio de 2021. https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/pdh_chapter7.pdf
- [3] U.S. EPA, LMOP. “LFG Energy Project Development Handbook – Chapter 8: Best Practices for Landfill Gas Collection System Operation and Maintenance.” Actualizado julio de 2021. https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/pdh_chapter8.pdf
- [4] Global Methane Initiative (GMI). “International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects.” 2012. <https://www.globalmethane.org/resources/details.aspx?resourceid=1980>
- [5] U.S. EPA, LMOP. “Webinar: Landfill Gas Control System Best Practices.” Caso McCommas Bluff, 4-11-2020. <https://www.epa.gov/lmop/webinar-landfill-gas-control-system-best-practices>
- [6] SCS Engineers. “LFG Wellfield Automated Remote Monitoring Plan – Chiquita Canyon Landfill.” Preparado para South Coast AQMD, 19-04-2024. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/Agendas/hearing-board/case-documents/exhibit-ee-chiquita-condition-66-lfg-wellfield-automated-remote-monitoring-plan.pdf>
- [7] Izumoto, S.; Hamamoto, S.; Kawamoto, K.; Nagamori, M.; Nishimura, T. “Monitoring of methane emission from a landfill site in daily and hourly time scales using an automated gas sampling system.” *Environmental Science and Pollution Research* 25(24), 24500–24506, 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-2671-1.
- [8] Kubal, M.; Martinec, M.; Chumchalová, J.; Hendrych, J. “Kontinuální sledování plyných emisí na skládce komunálního odpadu [Continuous monitoring of gaseous emissions at municipal landfill].” *Chemické Listy* 115(2), 104–108, 2021. <https://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3793>
- [9] Wong, C.L.Y.; Zawadzki, W. “Emissions rate measurement with flow modelling to optimize landfill gas collection from horizontal collectors.” *Waste Management* 157, 199–209, 2023. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.12.018.
- [10] Parameswaran, T.G.; Nazeem, K.M.; Deekshith, P.K.; Sivakumar Babu, G.L.; Deepagoda, T.K.K.C. “Gas collection system design for a landfill via three-dimensional stochastic waste heterogeneity models and kriging.” *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(5), 110563, 2023. DOI: 10.1016/j.jece.2023.110563.
- [11] Saul, C.J.; Imhoff, P.T.; Wang, Y.; Barlaz, M.A. “Critical analysis of literature on landfill gas collection efficiency and its application to emissions estimates.” *Waste Management* 213, 115353, 2026. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115353.
- [12] U.S. EPA, LMOP; SCS Engineers. “User’s Manual – Central America Landfill Gas Model, Version 1.0.” Marzo de 2007. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1013OZJ.TXT>
- [13] Oonk, H. “Efficiency of landfill gas collection for methane emission reduction.” *Greenhouse Gas Measurement and Management* 2(2–3), 129–145, 2012. DOI: 10.1080/20430779.2012.730798.
- [14] Barlaz, M.A.; Chanton, J.P.; Green, R.B. “Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance.” *Journal of the Air & Waste Management Association* 59(12), 1399–1404, 2009. DOI: 10.3155/1047-3289.59.12.1399.
- [15] Martinec, M.; Chumchalová, J.; Renkerová, P.; Kubal, M. “Continuous monitoring of landfill gas.” *Paliva* 11(2), 57–61, 2019. DOI: 10.35933/paliva.2019.02.05.
- [16] International Electrotechnical Commission (IEC). “IEC 60079 Series – Explosive atmospheres.” Serie consultada 25-08-2026. <https://webstore.iec.ch/en/publication/62417>
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC). “IEC 61511 Series – Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector.” Serie consultada 25-08-2026. <https://webstore.iec.ch/en/publication/5527>

[18] European Parliament and Council. “Directive 2014/34/EU on equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres.” Texto consolidado. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34>

[19] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). “JCGM 100:2008(E) — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.” BIPM, 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

[20] Bernal, J.L.; Cummins, S.; Gasparini, A. “Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: a tutorial.” *International Journal of Epidemiology* 46(1), 348–355, 2017. DOI: 10.1093/ije/dyw098.

[21] Callaway, B.; Sant’Anna, P.H.C. “Difference-in-Differences with multiple time periods.” *Journal of Econometrics* 225(2), 200–230, 2021. DOI: 10.1016/j.jeconom.2020.12.001.

Declaraciones de transparencia, intereses y contribución autoral

Autor intelectual: Cristian Albornoz Lillo.

Contribución autoral: conceptualización; formulación metodológica; integración de ingeniería; definición del marco de trazabilidad y atribución; revisión crítica; y aprobación final del contenido: Cristian Albornoz Lillo.

Declaración de intereses: el autor mantiene actividad profesional vinculada al desarrollo y evaluación comercial de soluciones de automatización y optimización de biogás, lo que constituye un potencial interés comercial relacionado con el ámbito de este trabajo. El white paper se presenta deliberadamente de forma vendor-neutral y no evalúa, recomienda ni certifica una marca, proveedor o producto específico.

Origen del marco: la metodología se desarrolló en el contexto de ingeniería aplicada a la optimización de campos de gas de relleno sanitario. Esta publicación presenta el marco metodológico de forma vendor-neutral y no constituye una certificación independiente de una tecnología, proveedor o resultado económico específico.

Disponibilidad de datos: este white paper no publica datos confidenciales de un operador ni un dataset de desempeño de un sitio identificado. Las afirmaciones cuantitativas de uplift requieren validación de campo específica y reproducible.

Revisión: versión 1.1 no sometida a revisión por pares. Las referencias externas respaldan los fundamentos citados, pero no sustituyen la validación experimental de la metodología en cada activo.

Cita sugerida: Albornoz Lillo, C. (2026). De la medición periódica a la optimización continua del biogás de relleno sanitario: marco vendor-neutral para observabilidad a nivel de pozo, CH₄-flow, validación de campo y traducción a generación eléctrica. White paper técnico-científico, versión 1.1.

© 2026 Cristian Albornoz Lillo. Todos los derechos reservados.