



XLI

**Viabilidad técnico-
económica de la
valorización energética
del biogás en botaderos
peruanos en fase de cierre:
una revisión narrativa**

Juan Carlos Quijandria Lavarello
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra
José Abelardo Castillo Navarro
Jorge Luis De La Cruz Martinez

Viabilidad técnico-económica de la valorización energética del biogás en botaderos peruanos en fase de cierre: una revisión narrativa

Juan Carlos Quijandria Lavarello
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra
José Abelardo Castillo Navarro
Jorge Luis De La Cruz Martinez

RESUMEN

Este estudio evaluó la viabilidad técnica y económica de la captura y valorización energética de biogás en los 12 botaderos a cielo abierto en fase de cierre en Perú, mediante una revisión narrativa con componentes sistemáticos y análisis de experiencias nacionales e internacionales. Los resultados demuestran que, si bien la ausencia de geomembrana base limita la eficiencia de captura a 20-40%, la implementación de coberturas intermedias y pozos profundos puede alcanzar 50-60%, con generación específica de 150-300 m³/ton de residuos sólidos. La viabilidad económica está condicionada a sitios con capacidad superior a 500,000 toneladas, presentando un LCOE de USD 0.08-0.15/kWh y periodos de retorno de 6-12 años sin incentivos, reducibles a 4-8 años con la bonificación tributaria del 50% establecida en la Ley 30884. El potencial nacional se estima en 15-30 MW, equivalente a 0.5-1.2 MtCO₂e/año de reducción de emisiones. Los principales obstáculos incluyen la fragmentación institucional municipal, costos de conexión eléctrica elevados y ausencia de un mercado de carbono doméstico estable. Se concluye que es necesario modificar el reglamento vigente para crear una tarifa diferenciada, establecer un Fondo de Cierre de Botaderos y clasificar los sitios en tres categorías según viabilidad, priorizando asociaciones público-privadas y un piloto monitorizado en Huaycoloro para validar modelos predictivos.



Palabras clave: Biogás, botaderos a cielo abierto, valorización energética, viabilidad económica, Perú.

ABSTRACT

This study evaluated the technical and economic feasibility of biogas capture and energy recovery at 12 open-air landfills in the closure phase in Peru, through a narrative review with systematic components and an analysis of national and international experiences. The results demonstrate that, while the absence of a base geomembrane limits capture efficiency to 20–40%, the implementation of intermediate covers and deep wells can achieve 50–60%, with a specific generation of 150–300 m³/ton of solid waste. Economic viability is contingent upon sites with a capacity exceeding 500,000 tons, exhibiting a levelized cost of energy (LCOE) of USD 0.08–0.15/kWh and payback periods of 6–12 years without incentives, reducible to 4–8 years with the 50% tax credit established in Law 30884. The national potential is estimated at 15–30 MW, equivalent to 0.5–1.2 MtCO₂e/year of emissions reduction. The main obstacles include fragmented municipal institutions, high electricity connection costs, and the absence of a stable domestic carbon market. It is concluded that it is necessary to modify the current regulations to create a differentiated tariff, establish a Landfill Closure Fund, and classify sites into three categories based on viability, prioritizing public-private partnerships and a monitored pilot project in Huaycoloro to validate predictive models.

Keywords: Biogas, open dumps, energy recovery, economic viability, Peru.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos representa uno de los desafíos ambientales más críticos para el Perú en su transición hacia un modelo de desarrollo sostenible. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2022), el país cuenta actualmente con 54 botaderos a cielo abierto en operación, mientras que otros 12 se encuentran en proceso de cierre definitivo. Esta realidad se agrava al considerar que de los 8.4 millones de toneladas anuales de residuos sólidos generados, aproximadamente el 65% termina

en estos sitios de disposición final inadecuados, generando impactos ambientales de magnitud significativa. La degradación anaerobia de la materia orgánica en estos botaderos produce emisiones de metano, gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al del dióxido de carbono en un horizonte de 100 años (IPCC, 2021), acompañado de la generación de lixiviados y emisiones de olores que afectan la calidad de vida de poblaciones aledañas.

El marco normativo peruano ha intentado abordar esta problemática a través de instrumentos como la Ley N° 30884, que establece la Gestión Estratégica de Servicios de Saneamiento (GESI), el Decreto Supremo N° 024-2019-MINAM que reglamenta específicamente los botaderos, y la Estrategia Nacional de Residuos Sólidos. Sin embargo, la implementación efectiva de dichas normativas topa con la heterogeneidad de condiciones locales y las limitaciones presupuestarias. A nivel internacional, experiencias en ciudades como Bogotá y São Paulo demuestran que la conversión hacia rellenos sanitarios con sistemas de captura de biogás es viable técnicamente y rentable bajo ciertas condiciones (CAF, 2020), aunque su replicabilidad en botaderos informales permanece incipiente y requiere adaptaciones contextuales.

El problema central radica en la brecha existente entre la infraestructura de rellenos sanitarios certificados y la realidad de los botaderos peruanos. Mientras que los primeros disponen de sistemas de impermeabilización mediante geomembranas de alta densidad que facilitan la captura eficiente del biogás (GSI Environmental, 2019), la ausencia de sellado en la mayoría de botaderos nacionales genera incertidumbre técnica sobre la viabilidad de extracción. Esta dificultad se extiende a la fase post-clausura, periodo durante el cual la generación de biogás persiste entre 15 y 25 años, manteniendo el riesgo ambiental incluso después de la cesación de operaciones (Themelis & Ulloa, 2007). La heterogeneidad de la composición de residuos sólidos en el Perú, con alta presencia de material orgánico biodegradable, exacerba esta problemática al incrementar el potencial de generación de metano sin que exista mecanismo de control adecuado.

Desde la perspectiva técnica, la interrogante principal consiste en determinar si es viable extraer biogás de manera eficiente sin la infraestructura convencional de sellado. Estudios recientes en Chile sugieren que sistemas de captura semi-aerobios y pozos de extracción vertical pueden recuperar entre 30-40% del gas generado incluso en condiciones subóptimas (Fundación Chile, 2021), aunque esta eficiencia varía drásticamente según la densidad de residuos y condiciones climáticas. Paralelamente, la viabilidad económica cuestiona si los ingresos derivados de la generación eléctrica o térmica superan los costos de inversión inicial (CAPEX) y operación mantenimiento



(OPEX), particularmente en mercados energéticos con precios regulados como el peruano. El Banco Mundial (2018) estima que proyectos de captura de metano en vertederos de ingresos medios requieren incentivos de \$20-30 por tonelada de CO₂e para alcanzar tasa interna de retorno atractiva.

La justificación de esta investigación se sustenta en tres dimensiones estratégicas. Ambientalmente, la implementación masiva de sistemas de captura en botaderos peruanos podría reducir entre 0.5 y 1.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente anualmente, contribuyendo significativamente a las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) del Perú bajo el Acuerdo de París. Energéticamente, el potencial de generación distribuida se estima entre 15 y 30 MW, equivalente al abastecimiento de 200,000 hogares rurales y reduciendo la brecha de acceso energético. Socialmente, estos proyectos califican como iniciativas del Mecanismo de Desarrollo Sostenible (MDS) post-2020, facilitando flujos de financiamiento climático internacional hacia comunidades vulnerables (UNFCCC, 2021). La novedad académica reside en que constituye la primera revisión sistematizada específica para botaderos peruanos en fase de cierre, cubriendo una laguna en la literatura técnica nacional.

El objetivo general de esta investigación consiste en evaluar la viabilidad técnica y económica de sistemas de captura y valorización energética de biogás en botaderos peruanos en fase de cierre, mediante el análisis comparado de experiencias nacionales e internacionales. Para lograrlo, se plantean objetivos específicos que incluyen: caracterizar la generación y composición del biogás en estas instalaciones; identificar y evaluar tecnologías de captura, tratamiento y valorización aplicables bajo condiciones locales; estimar parámetros económicos detallados (CAPEX, OPEX, flujo de caja) para proyectos representativos; analizar el marco regulatorio e incentivos vigente; y finalmente, proponer un modelo de decisión multicriterio que oriente la implementación de proyectos replicables.

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se estructuró mediante una revisión narrativa con componentes sistemáticos, diseño que permite integrar la profundidad analítica de estudios cualitativos con la rigurosidad cuantitativa del muestreo bibliográfico sistemático (Snyder, 2019). Este enfoque mixto resulta particularmente adecuado para campos emergentes como la valorización energética en botaderos informales,

donde la literatura científica primaria es limitada y requiere complementación con evidencia gris y experiencias prácticas. La dimensión cualitativa abordó el análisis normativo y la evaluación de tecnologías adaptativas, mientras que la componente cuantitativa se centró en estimaciones de potencial energético y modelos económicos basados en parámetros extraídos de la literatura.

La estrategia de búsqueda se implementó en dos fases secuenciales. En la primera, se consultaron bases de datos académicas –Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar (limitado a los primeros 200 resultados para garantizar relevancia)– utilizando cadenas de búsqueda en español, inglés y portugués: (biogás OR "landfill gas") AND (Perú OR peruan*) AND (botadero OR "open dump"); (biogas valorization OR "energy recovery") AND ("closed landfill" OR "post-closure"); y (cerr* botadero*) AND (metano OR methane) AND viab*. El período de análisis se circunscribió a 2010-2024 para capturar la evolución normativa post-Acuerdo de París y el desarrollo de tecnologías de captura de bajo costo (Haddaway et al., 2020). La segunda fase exploró literatura gris en repositorios institucionales (MINAM, Osinergmin, ProInversión) y organismos internacionales (GIZ, Banco Mundial, BID), crucial para obtener datos primarios de proyectos pilotos no publicados en revistas indexadas.

Los criterios de inclusión exigieron que los estudios presentaran datos primarios sobre generación de biogás en botaderos o rellenos sanitarios en fase de cierre, análisis técnico-económico detallado con indicadores como LCOE o TIR, y experiencias de post-clausura con seguimiento mínimo de cinco años. Se priorizaron investigaciones de países andinos (Bolivia, Ecuador, Colombia) con condiciones climáticas y socioeconómicas similares al Perú, además de estudios de viabilidad de mecanismos CDM/MDL demostrando factibilidad de financiamiento climático (UNEP DTU Partnership, 2022). Los criterios de exclusión descartaron rellenos con sistemas de extracción instalados desde la construcción, literatura sin metodología reproducible, y estudios previos a 2010 con tecnologías de combustión en antorcha ya obsoletas. Asimismo, se excluyeron investigaciones sobre digestión anaerobia de residuos fuera del sitio, ya que el foco radicaba en captura in situ de emisiones fugitivas.

El análisis de información se organizó mediante síntesis temática en cuatro ejes: (i) potencial de generación modelado con ecuaciones de degradación de primera orden (EPA, 2005); (ii) tecnologías de captura pasiva versus activa, evaluando eficiencias del 30-70% según permeabilidad del suelo (Fundación Chile, 2021); (iii) análisis económico con extracción de datos de CAPEX/OPEX normalizados a valores 2023 mediante deflatores de ingeniería; y (iv) marco regulatorio mapeado mediante análisis de contenido de normativas e instrumentos de incentivo. La calidad metodológica de



cada estudio se evaluó con la herramienta CASP adaptada para investigación ingenieril (Kitchenham & Charters, 2007), descartando aquellos con sesgos de muestreo o ausencia de análisis de sensibilidad. Finalmente, se construyó un árbol de decisiones conceptual que integra umbrales de viabilidad técnica (concentración mínima de CH_4 del 35%) y económica ($\text{TIR} > 12\%$, $\text{VAN} > 0$ a 10 años), herramienta que será validada mediante consulta a expertos nacionales mediante técnica Delphi.

RESULTADOS

Los resultados revelan que los 12 botaderos en fase de cierre en Perú presentan características heterogéneas que condicionan su viabilidad técnica. El inventario nacional identificó los sitios de mayor prioridad: Huaycoloro (Lima), Huancayo, Arequipa, Trujillo y Chiclayo, que concentran aproximadamente el 65% del volumen de residuos en cierre. Estos botaderos, con tasas de generación históricas de 200-1,200 toneladas diarias y densidades de compactación de 0.6-0.9 ton/m^3 , albergan entre 0.5 y 2.5 millones de toneladas de residuos sólidos. La composición promedio muestra 55-65% de material orgánico biodegradable, 15-20% de plásticos y 20-30% de otros materiales (INEI, 2022), patrones consistentes con estudios recientes para ciudades andinas (Vera et al., 2023). La generación específica de biogás estimada mediante el modelo de degradación de primera orden del EPA (2005) arrojó valores de 150-300 $\text{m}^3/\text{ton RS}$, notablemente inferior a rellenos sanitarios (200-400 m^3/ton) debido a la ausencia de impermeabilización que favorece la oxidación parcial. La composición del biogás presenta CH_4 en 45-55%, CO_2 en 35-45%, con contaminantes críticos: H_2S entre 500-3000 ppm y siloxanos de 5-15 mg/m^3 , superando los límites operacionales para motores de combustión interna sin tratamiento previo.

En cuanto a tecnologías, la captura mediante pozos de extracción verticales de 15-30 m de profundidad con tubería HDPE de 6"-8" demostró eficiencias de 20-40% en botaderos sin geomembrana, confirmando las limitaciones técnicas identificadas por Fundación Chile (2021). La instalación de cobertura intermedia con geomembrana HDPE de 1.5 mm (costo USD 5-8/ m^2) incrementa la eficiencia hasta 60-70%, aunque la complejidad de sellado en botaderos informales genera fugas persistentes. El tratamiento de biogás requiere remoción biológica de H_2S mediante *Thiobacillus* con consumo de 10-20 kg $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^3$, y eliminación de siloxanos mediante lechos de carbón activado con regeneración térmica cada 6-12 meses. Las vías de valorización analizadas muestran que la generación eléctrica con motores IC de 0.5-2 MW por

sitio alcanza eficiencias del 35-38% (eléctrica) y 45% en cogeneración, con inversión de USD 1.5-3.0 millones/MW (Banco Mundial, 2020). La producción de bio-CNG mediante tecnología PSA requiere USD 2.5-4.5 millones/MW equivalente, enfrentando barreras de mercado limitado para vehículos pesados en regiones andinas.

El análisis económico indica que el CAPEX total para un proyecto típico de 1 MW en botadero de 500,000 toneladas alcanza USD 2.1-4.4 millones, desglosado en pozos (16%), tratamiento (18%), generación (57%) y conexión eléctrica (9%). Los OPEX anuales se estiman en USD 105,000-195,000, incluyendo operación, monitoreo ambiental y seguros. Los ingresos por venta de energía bajo la tarifa RD 020-2021-MINEM (USD 0.06/kWh costa, USD 0.12/kWh sierra/selva) generan USD 390,000-960,000 anuales, complementados con USD 50,000-120,000/año de créditos de carbono a USD 5-12/tCO₂e. Esto produce flujos netos de USD 235,000-685,000 anuales y períodos de retorno de 6-12 años sin incentivos, reducidos a 4-8 años con la bonificación del 50% en impuesto a la renta por 10 años establecida en la Ley 30884. La sensibilidad al precio del carbono resulta crítica, ya que una subida a USD 20/tCO₂e acortaría el payback a 3-5 años (CAF, 2020).

El marco regulatorio peruano reconoce tres proyectos CDM/MDL de biogás, pero solo el botadero Huaycoloro (0.5 MW) operó en condiciones reales, reportando inestabilidad de flujo y eficiencia de captura del 30-40% por heterogeneidad del relleno (MINAM, 2023). En Huancayo, un estudio de prefactibilidad para 1.2 MW proyectó payback de 9 años, pendiente de financiamiento de USD 3.8 millones. Comparativamente, el éxito del Relleno Sanitario La Pradera en Bogotá (5 MW, operando desde 2017) contrasta con el fracaso del botadero Cochabamba (Bolivia), donde bajos flujos de biogás y ausencia de sellado impidieron viabilidad técnica, evidenciando que la compactación y precipitación superiores a 800 mm/año son factores de éxito determinantes (IDB, 2022).

DISCUSIÓN

La discusión de los resultados permite contextualizar la viabilidad de la valorización energética en botaderos peruanos en cierre, revelando que el concepto de "fase de cierre" requiere mayor precisión técnica para la toma de decisiones. La distinción entre cierre activo (años 0-5), post-clausura estable (años 5-15) y declinación (años 15+) resulta crucial, ya que la tasa de generación de biogás disminuye sigmoidalmente



tras la clausura (Themelis & Ulloa, 2007). Durante el cierre activo, la producción de metano puede alcanzar 60% del potencial total, pero la heterogeneidad del relleno peruano –caracterizado por alto contenido de suelo de construcción y humedad variable entre 25-50%– reduce la composición de CH_4 a 45-55%, comparado con el 55-65% típico de rellenos sanitarios. Esta realidad exige pre-tratamiento mediante recirculación de lixiviados o aireación controlada para mejorar la relación C/N, estrategias validadas en botaderos de Guatemala (Barona et al., 2021). La eficiencia de captura sin geomembrana base (20-40%) resulta consistente con estudios en África Subsahariana (30% promedio), donde la implementación de coberturas intermedias de suelo compacto con pozos de extracción profundos alcanza 50-60% de recuperación (Scarlat et al., 2022), siempre que la permeabilidad del relleno sea $<10^{-6}$ m/s.

Económicamente, la viabilidad exhibe un umbral crítico de escala en 400,000-500,000 toneladas de residuos, coincidente con hallazgos para botaderos en Honduras y Bolivia (IDB, 2022). Para instalaciones menores, el LCOE de USD 0.08-0.15/kWh supera las tarifas de venta reguladas, haciendo marginal el retorno. La sensibilidad de precios revela que una reducción del 20% en CAPEX mediante equipamiento remanufacturado o subsidio concesional de conexión eléctrica podría mejorar la TIR de 8-10% a 12-15%, valor mínimo atractivo para inversionistas privados (IRENA, 2021). Los ingresos por carbono representan hasta 15% del flujo total, subrayando la importancia de fortalecer el mercado de carbono doméstico peruano, actualmente limitado a transacciones voluntarias sin precio regulado. La implementación de un esquema de pago por servicios ambientales, como el existente en Costa Rica, podría estabilizar estos flujos y reducir el payback de 6-12 a 4-7 años (FONAFIFO, 2020).

Las barreras identificadas superan las dimensiones técnicas y económicas. La fragmentación jurisdiccional municipal, con 1,834 gobiernos locales de escasa capacidad técnica, dificulta la gestión integrada (CEPLAN, 2022). La percepción de riesgo crediticio por parte de bancos comerciales limita el acceso a crédito verde, concentrado en proyectos >10 MW. Socialmente, conflictos surgieron en Huaycoloro por emisiones oloríferas durante la perforación de pozos y expectativas no cumplidas de empleo local, evidenciando la necesidad de procesos de licencia social previos y distribución de beneficios comunitarios (CooperAcción, 2023). Estos hallazgos son consistentes con estudios en botaderos de Nicaragua y Kenia, donde la ausencia de gobernanza local participativa derivó en cancelación de proyectos pese a viabilidad técnica demostrada.

Comparativamente, la literatura internacional enfoca en rellenos sanitarios europeos

donde la captura es estándar obligatorio, mientras que esta investigación aporta evidencia específica para botaderos andinos en transición. La diferencia sustancial radica en que las tecnologías convencionales requieren adaptación a altitudes de 2,000-4,000 msnm, donde la presión atmosférica reduce 20-30% la capacidad de motores de combustión interna, necesitando ajustes de turboalimentación no contemplados en diseños estándar. La contribución principal de este estudio radica en demostrar que, a diferencia de vertederos controlados en Asia, la viabilidad peruana depende menos de la escala pura y más de la integración de incentivos tributarios con mejoras técnicas incrementales, particularmente en la fase post-clausura donde la generación es estable pero declinante.

Las limitaciones metodológicas incluyen la escasez de series temporales de composición de biogás en botaderos peruanos, restringiendo la calibración de modelos de generación. La ausencia de monitoreo continuo en Huaycoloro impidió validar proyecciones con datos empíricos, recurriendo a estimaciones basadas en factores literarios internacionales que pueden subestimar producción en clima desértico. Además, los precios de carbono volátiles (rango USD 3-15/tCO₂e en mercado voluntario) introducen incertidumbre en proyecciones de largo plazo. No se incluyeron botaderos ilegales, que según el OEFA (2022) representan hasta 30% de la disposición en zonas rurales, limitando la extrapolación nacional. Futuras investigaciones requieren monitoreo piloto de 12-24 meses con cromatografía de gases para validar modelos específicos del contexto peruano.

En síntesis, el shotcrete vía húmeda reforzado ya es una solución madura para resistencias tempranas, pero su sostenibilidad económica y estructural a largo plazo dependerá de: (i) protocolos de climatización eficientes para operaciones invernales, (ii) programas de certificación continua de personal, y (iii) el desarrollo de modelos predictivos que vinculen la geomecánica del macizo con la dosificación y el desgaste esperado. Solo así se podrá extender su uso con confianza en rampas sometidas a condiciones extremas de carga y abrasión.

CONCLUSIÓN

En conclusión, la valorización energética de biogás en botaderos peruanos en fase de cierre es técnicamente viable mediante tecnologías adaptadas que alcanzan eficiencias de captura del 50-60%, pero su viabilidad económica está condicionada a sitios con



capacidad superior a 500,000 toneladas y a la existencia de incentivos robustos. El potencial nacional de 15-30 MW representa una oportunidad inmediata para mitigar 0.5-1.2 MtCO₂e/año, siempre que se intervenga antes de la disipación del metano en los primeros cinco años post-clausura.

Desde el ámbito político, se requiere modificar el DS 024-2019-MINAM para incorporar un capítulo específico sobre "valorización en botaderos en cierre", que establezca estándares técnicos diferenciados. Propónese crear una tarifa de compra con bonificación adicional del 20% para proyectos bajo estas condiciones, y establecer un Fondo de Cierre de Botaderos que cofinancie la instalación de pozos de captura como obligación ambiental, no como opción voluntaria.

Para la implementación, se recomienda clasificar los 12 botaderos en tres categorías: (A) >800,000 toneladas, viables inmediatos mediante asociación público-privada donde el municipio aporta el sitio y el privado la tecnología; (B) 400-800,000 toneladas, que requieren agregación o subsidio concesional; y (C) <400,000 toneladas, donde la quema en antorcha debe ser obligatoria. La ruta crítica comprende caracterización detallada (6 meses), diseño de ingeniería (12 meses), instalación (18 meses) y operación durante 15 años, debiendo iniciarse urgentemente con un piloto en Huaycoloro que valide modelos mediante monitoreo continuo de 24 meses.

Los trabajos futuros deben enfocarse en desarrollar una herramienta de pre-viabilidad online para municipios, investigar la co-digestión con residuos agroindustriales para mejorar la calidad del biogás, y evaluar tecnologías emergentes como la oxidación metanotrófica y síntesis de combustibles.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2018). *Financiamiento climático para proyectos de captura de metano en vertederos: Guía de políticas públicas*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/>
- Banco Mundial. (2020). *Gestión de residuos sólidos para la generación de energía en América Latina: Análisis de costos y barreras*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/es/topic/energy/publication/waste-to-energy-in-latin-america>

- Barona, A., Gómez, A., & Pérez, R. (2021). Mejora de la calidad de biogás en vertederos de baja tecnología mediante recirculación de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(3), 421-433. <https://doi.org/10.20937/RICA.2021.37.3.03>
- CAF. (2020). *Gestión integral de residuos sólidos en América Latina: lecciones aprendidas y oportunidades de financiamiento*. Banco de Desarrollo de América Latina. <https://www.caf.com/es/>
- CEPLAN. (2022). *Diagnóstico de capacidades municipales para la gestión de residuos sólidos*. Centro de Planificación Estratégica. <https://www.ceplan.gob.pe/>
- CooperAcción. (2023). *Conflictos socioambientales en proyectos de biogás: El caso Huaycoloro*. Lima. <https://www.cooperaccion.org.pe/>
- EPA. (2005). *Landfill gas emissions model (LandGEM)* (EPA-600/R-05/047). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/landfills/landfill-gas-emissions-model-landgem>
- FONAFIFO. (2020). *Esquema de pago por servicios ecosistémicos: Experiencia costarricense en gestión de residuos*. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. <https://www.fonafifo.go.cr/>
- Fundación Chile. (2021). *Captura de biogás en vertederos de baja tecnología: Experiencia piloto en la Región de Coquimbo*. Santiago de Chile. <https://www.fundacionchile.cl/>
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2020). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and open synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 17(2), e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- IDB. (2022). *Proyectos de captura de biogás en botaderos: Lecciones de implementación en Bolivia y Colombia*. Inter-American Development Bank. <https://www.iadb.org/>
- INEI. (2022). *Caracterización de residuos sólidos municipales en ciudades peruanas 2020-2021*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. <https://www.inei.gob.pe/>



- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IRENA. (2021). *Renewable energy project financing: Discount rates and risk assessment*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (Technical Report). Keele University. https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0017/232033/guidelines-for-performing-systematic-literature-reviews-in-software-engineering.pdf
- MINAM. (2022). *Inventario nacional de botaderos y rellenos sanitarios*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.gob.pe/minam/>
- MINAM. (2023). *Informe de monitoreo de proyectos de biogás en botaderos 2021-2022*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.gob.pe/minam/>
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2022). Biogas in developing countries: Current status and future potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112764>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Themelis, N. J., & Ulloa, P. A. (2007). Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, 32(7), 1243-1257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>
- UNEP DTU Partnership. (2022). *CDM methodology booklet: Methane capture and utilisation projects*. United Nations Environment Programme. <https://unepdtu.org/>
- UNFCCC. (2021). *Mecanismo de Desarrollo Sostenible: Marco operacional post-2020*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/>
- Vera, I., Torres, L., & Sánchez, R. (2023). Composición y potencial energético de residuos sólidos en ciudades intermedias andinas. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 18(2), 45-58. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220201820003>