

Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande

Systematic review of the recovery of biogas from solid waste from Portillo Grande landfill

Carlos Hurtado Noriega^{1,a}

Recibido: 12/12/2022 - Aprobado: 19/01/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

En el mundo cada vez existe una mayor concientización sobre el uso de energías limpias para disminuir los índices de contaminación ambiental, ocasionados por los gases causantes del calentamiento global. En ese sentido, esta investigación se enfoca en el aprovechamiento del biogás que producen los residuos sólidos de los rellenos sanitarios como fuente de energía renovable. En el caso particular del relleno sanitario Portillo Grande de Lurín, los residuos sólidos confinados producen grandes cantidades de biogás que son quemadas manualmente antes que salgan al exterior, sin que su valor energético sea aprovechado. Se empleó como metodología de estudio un enfoque cualitativo. Se desarrolló una revisión sistemática de la bibliografía disponible para determinar mediante la valorización del biogás con parámetros aplicables a futuros rellenos sanitarios en el Perú.

Se concluye que el relleno sanitario Portillo Grande ofrece un gran potencial de biogás que se puede aprovechar como fuente de energía renovable, además que contribuirá con la mitigación de gases de efecto invernadero. Es indispensable continuar con la investigación sobre el aprovechamiento del biogás con el impulso de la inversión privada, complementada por una decisión política de Estado para su promoción y financiamiento.

Palabras claves: Biogás, digestión anaeróbica, relleno sanitario, residuos sólidos, valorización energética.

ABSTRACT

In the world there is a growing awareness about the use of clean energy to reduce the rates of environmental pollution caused by gases that cause global warming, in that sense this research focuses on the use of biogas produced by solid waste from landfills as a source of renewable energy. In the particular case of the Portillo Grande landfill from Lurín, the confined solid waste produces large amounts of biogas that are burned manually before it goes outside, without its energy value being used. A qualitative approach was used as a study methodology, developing a systematic review of the available literature to determine through the valorization of biogas with parameters applicable to future landfills in Peru.

It is concluded that the Portillo Grande landfill offers a great potential for biogas that can be used as a renewable energy source, in addition to contributing to the mitigation of greenhouse gases. It is essential to continue with research on the use of biogas with the impulse of private investment, complemented by a State political decision for its promotion and financing.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, energy recovery, landfill, solid waste.

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Lima, Perú.

E-mail: carlos.hurtado6@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0873-8419>

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo cada vez existe un mayor consumo de energía basado principalmente en los combustibles fósiles y derivados, lo que representa más del 80% del consumo de energía primaria a nivel mundial (Ghasemian et al 2020), que son altamente contaminantes y responsables de la generación de los gases de efecto invernadero (GEI) que provocan el calentamiento del planeta; sin embargo, también existe una creciente concientización sobre el cuidado del medio ambiente y por ello, progresivamente se viene dejando de lado el uso de hidrocarburos para cambiar las matrices energéticas con fuentes de energía renovables (Informe de estado global de energías renovables 2016; Imán 2021), así como optimizar sus medidas de eficiencia energética (Scarlat et al 2018); además, que beneficiará a la sociedad con un mayor crecimiento económico (el sector energía crece en forma paralela al crecimiento del PBI), equidad (beneficia a toda la sociedad) y desarrollo (mejora la calidad de vida de las personas que requieren acceso a esta fuente energética) (Vásquez et al 2016).

En el Perú, Petramás es la única iniciativa empresarial que realiza la valorización energética de los residuos sólidos. Con sus tres proyectos de Recursos Energéticos Renovables (RER) ganó la subasta de Osinergmin desde el 2016; sólo en el proyecto Huaycoloro obtiene cerca de 200 000 m³ diarios de biogás, en su central térmica de biomasa lo convierte en biometano y posteriormente en energía eléctrica para abastecer al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) con 28 295 MW/h anuales. Utiliza como combustible parte del biogás obtenido del relleno sanitario Huaycoloro (Petramás 2020).

Es verdad que el Estado peruano viene trabajando desde hace varias décadas con nuevas fuentes de energía renovable (MINEM 2021). El biogás es la fuente energética de última prioridad por carecer de la tecnología adecuada (Osinergmin 2017), porque tenemos otras fuentes mucho más económicas y por las grandes reservas de gas natural que dispone el país; sin embargo, amerita seguir investigando sobre este recurso por ser una fuente alterna. Sobre el particular, el art. 6 del DL N° 1278 (Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos) promueve la investigación e innovación tecnológica orientada a la ecoeficiencia, la minimización de residuos y su valorización. Además, este biogás se puede utilizar para la generación de energía eléctrica, calor y combustibles (Scarlat et al 2018; Tchobanoglous et al 2015).

La valorización energética es un procedimiento importante y necesario porque disminuye el peso y volumen de los residuos sólidos, protege el medio ambiente (siempre y cuando se emplee tecnología que elimine los gases tóxicos), amplía el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios, se obtienen diferentes tipos de combustibles en reemplazo de los hidrocarburos y genera ganancias por la obtención de créditos de carbono y la venta de electricidad (Nascimento et al 2019). Es decir, existe un enorme potencial de energía en los residuos sólidos sin explotar (Moreira et al 2020), además de disminuir los efectos del cambio climático con la mitigación de los GEI (IEA 2020).

El biogás se origina por la descomposición de la materia orgánica debido a la digestión anaeróbica, es un proceso biológico natural que se produce en ausencia de oxígeno (Kasinath et al 2021), compuesto principalmente de gas metano, que oscila entre un 50% y un 70% en volumen, de dióxido de carbono, y en menor escala de gases traza como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrógeno (Tait et al 2021; Chin et al 2020; Kormi et al 2017); este biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18.8 y 23.4 megajulios por metro cúbico (MJ/M³) (Osinergmin 2017). Asimismo, este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, o sistemas de refrigeración, (Osinergmin 2017; Sibilio et al 2017).

El biogás se genera en grandes cantidades, principalmente en los rellenos sanitarios (Escamilla 2019), además, representan la tercera fuente de emisiones de gas metano como consecuencia de actividades humanas a nivel mundial, representando casi el 15,4% (EPA 2016); por lo tanto, el biogás es una fuente de energía accesible e importante, cuyo uso y desarrollo pueden contribuir significativa en la reducción del calentamiento global, reducción de GEI y una de las vías de energía renovable más atractivas (Scarlat et al 2018; Ardolino & Arena 2019).

Tabla 1. Cantidad de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario Portillo Grande por años

Año	Cantidad en toneladas (ton)
1996	129 417
1997	407 922
1998	452 070
1999	474 989
2000	386 716
2001	301 041
2002	326 903
2003	482 770
2004	433 986
2005	437 779
2006	478 367
2007	480 420
2008	463 060
2009	507 858
2010	532 181
2011	563 940
2012	584 275
2013	757 910
2014	724 753
2015	814 130
2016	721 886

Año	Cantidad en toneladas (ton)
2017	733 863
2018	739 864
2019	843 419
2020	1 109 691
2021	1 085 918
2022	1 197 574

Nota 1. *Innova Ambiental (2023) Relleno sanitario Portillo Grande*

Nota 2. *La suma total de residuos sólidos confinados desde 1992 hasta 2022 es de 16 172 702 ton*

Si bien es cierto, que de la cantidad generada de biogás producida por digestión anaeróbica, un gran porcentaje ya se expulsó y quemó a través de las chimeneas, todavía se almacenan grandes cantidades de biogás, a pesar que su calidad no será uniforme en todos los puntos de extracción, debido que entre los residuos sólidos dispuestos sólo la materia orgánica en su etapa de descomposición es el principal insumo para la generación de este gas; sin embargo, sigue existiendo un enorme potencial que se podría aprovecharse como fuente de energía renovable (Petramás 2020).

De acuerdo con la Tabla 1, el relleno sanitario Portillo Grande, viene acumulando desde 1992 hasta el 2022 más de 16 millones de toneladas de residuos sólidos confinados; que a la fecha no se aprovecha energéticamente. Asimismo, ha habido ofertas por parte de la Empresa Innova Ambiental (actual concesionaria de Portillo Grande) para la explotación del biogás hasta en tres oportunidades (años 2003, 2012 y 2019), pero fracasaron los intentos de negociación con la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML), su propietaria, porque no se pusieron de acuerdo sobre los beneficios pecuniarios de la venta de dicho biogás; y porque no hay propuestas serias de alguna otra empresa para invertir en su aprovechamiento (Innova Ambiental 2023).

En relación a la cantidad potencial de residuos orgánicos perdidas en Portillo Grande, si bien no se tiene esa data, se podría estimar sabiendo que en el Perú el promedio de residuos sólidos orgánicos es del 57%, ésta sería 4 132 74.41 ton aproximadamente (Sigersol, 2022). En relación a la decisión y/o voluntad política del aprovechamiento del biogás a lo largo del tiempo, en Portillo Grande no existen mayor intención por parte del Estado peruano, debido a que existen otras fuentes energéticas más rentables como la hidroeléctrica, gas natural, eólica y solar, entre otros (MINEM 2022). En cuanto a potencialidad de contaminación en Portillo Grande por la quema de CH_4 y CO_2 , no se tiene información disponible, ya que ni la empresa Innova Ambiental ni el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) miden esta contaminación.

Según Rodríguez et al (2020), una manera de generar ingresos en la recuperación de energía son la venta de biogás, energía eléctrica o calorífica y créditos de carbono; sin embargo, los desafíos actuales para la implementación

de la recuperación de energía son los altos costos de inversión de las tecnologías, la falta de confiabilidad técnica, los requisitos específicos de las condiciones climáticas y la ubicación (Gu et al 2017).

Las principales razones que dificultan la implementación exitosa de la recuperación del biogás en Portillo Grande son la falta de servicios técnicos adecuados, inversión de capital suficiente y políticas adecuadas por parte del Estado peruano (Innova Ambiental 2023; Kasinath et al 2021; Patinvoth & Taherzadeh 2019); por otro lado, la inversión privada brasileña con muchos años de experiencia en el mercado internacional del biogás, luego de realizar estudios técnicos como características del clima (precipitación, temperatura y humedad relativa), características del terreno y otros factores como cantidad de materia orgánica, composición, granulometría, disponibilidad de oxígeno, tamaño de las partículas, compactación y pH, ha tenido el interés de firmar un contrato de explotación con la MML para aprovechar este biogás como recurso energético, sin embargo no tuvo el apoyo del Estado (Innova Ambiental 2023). Además, los bajos precios del gas natural, recurso que se dispone en grandes reservas en el país, sobretudo en los yacimientos de gas de Camisea, dificultan la competitividad del biogás (Bhatt & Tao 2020).

De las fuentes de energía primaria con las que viene trabajando el Estado peruano, la menos atractiva es el biogás, por sus costos operativos para la obtención de energía en relación a otros (MINEM 2022; Osinergmin 2017), hay que tomar en cuenta que el Perú es respetuoso de sus compromisos internacionales con organismos que protegen el medio ambiente; en ese sentido, se debe cumplir con su cuota participativa de mundo verde (COP 21 s/f; UN General Assembly 2015), es por ello que se fomenta la obtención de energías renovables, la adquisición de Certificados de Reducción de Emisiones de Carbono por quema o uso de biogás como energía (Nascimento et al 2019) y se hacen esfuerzos para la mitigación de gases contaminantes.

La eficiencia energética ha sido reconocida como una prioridad global para el desarrollo sostenible y un factor clave para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7): garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos; además de ser incluido en la Resolución de las Naciones Unidas, Agenda 2030 (Kasinath et al 2021; UN General Assembly 2015), para que millones de personas en todo el mundo dejen de usar combustibles contaminantes al medio ambiente, de allí la importancia y compromiso que tienen los países firmantes de cambiar su matriz energética progresivamente (Imán 2021). Por otro lado, están los objetivos del Acuerdo de París (COP 21 s/f), para proteger el medio ambiente, es por ello que se fomenta la obtención de energías renovables como el biogás y se hacen esfuerzos para la mitigación de gases contaminantes (UN General Assembly 2015).

El propósito de esta investigación es demostrar la cantidad de biogás como fuente de energía que se podría aprovechar de los residuos sólidos confinados en el relleno sanitario Portillo Grande, sabiendo que más del 50% son residuos sólidos orgánicos (Ayala et al 2017),

Tabla 2. Resumen de la caracterización de los residuos sólidos en el relleno sanitario Portillo Grande periodo 2018-2020

Municipalidad	Residuos sólidos confinados en Portillo Grande	Residuos orgánicos	Residuos inorgánicos								No aprovechables
			Papel	Cartón	Vidrio	Plástico	Metales	Caucho	Textiles	Total	
Cercado	205273.43	123081.94	11146.35	7903.03	3345.96	15929.22	3859.14	106.74	1476.94	43767.38	38424.11
Lurín	43451.97	24385.25	756.06	912.49	560.53	2137.84	1212.31	22.59	312.42	5914.24	13152.48
Miraflores	22500.22	12831.88	1444.51	981.01	1118.26	1361.26	452.25	137.25	186.75	5681.29	3987.05
Punta Hermosa	4368.29	2556.76	197.00	226.27	136.72	181.72	68.15	2.27	31.41	843.54	967.99
Punta Negra	2226.16	1167.40	118.43	126.45	49.64	97.28	19.59	1.15	16.01	428.55	630.21
San Bartolo	1182.56	605.59	57.71	17.38	12.18	74.26	36.66	0.61	8.50	207.3	369.67
San Borja	47573.00	12013.79	2965.84	815.61	487.25	1868.48	300.82	23.3	290.23	6751.53	28807.68
Santa María del Mar	962.36	616.58	28.97	22.13	19.54	36.67	15.30	5.00	23.58	151.19	194.59
SJM	153300.44	90523.91	32944.26	6791.21	3832.51	17077.67	2130.88	79.72	1102.23	63958.48	-1181.95
VES	121165.18	65950.21	8275.58	5791.70	3150.29	6288.47	1647.85	63.01	871.18	26088.08	29126.89
VMT	127286.12	79541.10	4289.54	3207.61	954.65	4276.81	1947.48	66.19	915.18	15657.46	32087.56
TOTAL	729289.73	413274.41	62224.25	26794.89	13667.53	49329.68	11690.43	507.83	5234.43	169449.04	146566.28
		57%	9%	4%	2%	7%	2%	0%	1%		20%

Nota: *Sigersol 2022*

convirtiéndose en un gran potencial energético, el cual solo se quema y por consecuencia se desperdicia una fuente de energía renovable alterna para la generación de energía eléctrica (Hosseini & Denayer 2022), de tal manera que en el futuro, el Estado peruano o la empresa privada apuesten por la inversión de nuevos rellenos sanitarios construidos con infraestructura adecuada para capturar dicho biogás y aprovechar su valor energético.

II. MÉTODO

Para iniciar el proceso de investigación, se partió de una fase exploratoria en la que se buscó identificar claramente el fenómeno de estudio, es decir la valorización energética del biogás a partir del proceso anaeróbico de los residuos sólidos confinados en el relleno sanitario Portillo Grande.

Se realizó una investigación de tipo aplicada, con enfoque mixto y diseño no experimental. Se comenzó con una revisión sistemática de la literatura disponible, con base en el diseño hermenéutico clásico, para determinar mediante la valorización del biogás, si es conveniente o no su aprovechamiento en futuros rellenos sanitarios en el Perú.

Los artículos científicos fueron extraídos de bases de datos como Science Direct, Scopus, Scielo y Concytec, previa verificación que estos artículos y otras fuentes de información no superen los cinco años de antigüedad a partir de la fecha actual (febrero 2023). La búsqueda de información en las bases de datos electrónicas se realizó

sistemáticamente de acuerdo con palabras clave como: “biogás”, “digestión anaeróbica”, “relleno sanitario”, “residuos sólidos” y “valorización energética”, en idioma inglés y portugués; además, se verificó las referencias de las revisiones para profundizar los temas más relevantes. Luego de revisar la información seleccionada inicialmente, se descartaron los documentos duplicados, irrelevantes y aquellos orientados a otras formas de obtención energética.

Para hallar la caracterización de los residuos sólidos confinados, se recurrió a documentos oficiales como los estudios de caracterización y/o plan de manejo de residuos sólidos, correspondiente al periodo 2018-2020 de las 11 municipalidades que depositan sus residuos como disposición final en el relleno sanitario Portillo Grande de Lurín. (Ver Tabla 2).

Asimismo, se empleó el software Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)V3.02, aprobado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental por sus siglas en inglés) de los EEUU, para estimar el volumen en m³ del biogás que se puede obtener de los más de 16 millones de toneladas de residuos sólidos confinados en el relleno sanitario Portillo Grande.

III. RESULTADOS

Se introdujo los datos de la caracterización de residuos sólidos de la Tabla 2, información del mismo relleno como inicio de las operaciones en 1979 y cierre estimado en 2043 (Innova Ambiental 2023), información meteorológica

Tabla 3. Resumen de los datos obtenidos con el software LandGEM V3.02

Información	Abreviaturas	Datos obtenidos	O B S
RS acumulados hasta el 2022	ton	16 172 702	
Volumen de biogás	m ³ /h	3 795	
Potencia	MW	8	
Energía	MWh/año	67 586	
Tarifa 4ta subasta RER	US\$/MWh	77	Osinermin
Costo de oportunidad	US\$/año	5 204 123	
CERs	tCO ₂ e/año	303 188	

Nota: Osinermin (2022) Metodología ACM0001versión 15

de la zona como los promedios de temperatura 23.57 °C, precipitación 0.01 mm/h y humedad 60.41% (Senamhi 2022); en el software LandGEM aplicando la metodología ACM0001, que es la metodología de cálculo establecido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) de las Naciones Unidas. Estos fueron los resultados:

IV. DISCUSIÓN

Con los datos de la caracterización de los residuos sólidos en el relleno sanitario Portillo Grande, según la Tabla 2 y los resultados obtenidos en la Tabla 3, el software estima que existen 3 795 m³/h de biogás, el cual una vez eliminado los gases traza como dióxido de carbono y otros en menor porcentaje, se convierte en un combustible apto para la generación eléctrica, que concuerda con lo afirmado por los autores Scarlat et al 2018 y Tchobanoglous et al 2015; este biogás al pasar por motogeneradores tiene el potencial de producir 8 MW de potencia y 67 586 MWh/año de energía eléctrica, descontando la merma propia de dicha transformación de energía; sabiendo que en la última subasta de RER de Osinermin que ofrece \$77 por cada MWh/año, entonces se podría vender a dicha entidad del Estado, previo contrato, para ser conectados al SEIN, y se obtendría un total de \$5 204 123 anuales, algo que coincide con lo afirmado por Nascimento et al (2019).

En relación al tema de los costos de inversión y su recuperación en el tiempo, se toma en cuenta que Petramás en sus tres proyectos invirtió inicialmente \$18.1 millones obteniendo 10.4 MW de potencia (Osinermin, 2022) luego se calcula que para producir los 8 MW de potencia se necesitaría \$13 923 millones como inversión inicial, y si se divide esta inversión entre los \$5 204 123 anuales, quiere decir que se recuperará el capital invertido en 2.6 a 3 años, argumento que coincide con lo afirmado por Nascimento et al (2019). Al respecto se hace un paralelo entre los rellenos sanitarios Portillo Grande y Huaycoloro, ya que el primero recibe entre 2 a 3 ton de residuos sólidos diarias, mientras que el segundo un promedio de 3.3 ton diarias (hasta antes del cierre de Zapallal); ambos emplean la misma técnica de confinamiento establecida en el DL N.º 1278 y su reglamento.

Otra ventaja adicional, es que se podría ahorrar cerca de 303,188 tCO₂ e/año (ver Tabla 3) validando certificados de reducción de emisiones de CO₂, argumento que coincide con lo afirmado por Nascimento et al (2019), cumpliendo a su vez con nuestra cuota con el Acuerdo de París, así demostramos que el Perú es respetuoso de los acuerdos internacionales sobre el cuidado del medio ambiente, y a la vez evitamos dañar el ambiente con los GEI.

Con los resultados obtenidos, se demuestra que en el relleno sanitario Portillo Grande existe un potencial de 3 795 m³/h de biogás, que generaría 67 586 MWh/año de energía eléctrica y un total en ventas de \$5 204 123 anuales, es decir que con iniciativas de inversión de privados y apoyo decidido del Estado peruano con subsidios para insertarlos en la red del SEIN se puede aprovechar el biogás como fuente de energía y por lo tanto, fomentar la construcción de futuros rellenos sanitarios con la infraestructura de tuberías y tecnología adecuada para el aprovechamiento del biogás; sin embargo queda claro que no todos los rellenos sanitarios tienen las mismas condiciones y es por ello que se tendrían que hacer cálculos de recuperación de la inversión, calidad del biogás, condiciones atmosféricas de la zona y sostenibilidad en el tiempo de las toneladas de residuos sólidos depositados.

V. CONCLUSIONES

- El relleno sanitario Portillo Grande ofrece un gran potencial de biogás que se puede aprovechar para generar energía eléctrica, si tenemos en cuenta el volumen de los residuos sólidos confinados (más de 16 000 000 ton) y el alto porcentaje de materia orgánica (más del 50%) que contienen; se estima que podría generar 67 586 MWh/año de energía eléctrica obteniendo un valor de \$5 204 123 anuales, pudiendo recuperarse la inversión inicial en 2.6 a 3 años y luego de ello la ganancia sería neta; inversión que se podría replicar a futuros rellenos sanitarios construidos desde un inicio con infraestructura para capturar y aprovechar dicho biogás.
- La valorización energética del biogás acumulado en el relleno, previa eliminación de impurezas y gases trazas, se convierte en una fuente de

energía segura, confiable, oportuna y accesible a todos los sectores económicos y sociales del país. Asimismo, contribuirá con la mitigación de gases GEI causantes del calentamiento global, que tanto daño hacen al planeta.

- En las referencias bibliográficas de autores extranjeros existe abundante investigación sobre la valorización energética del biogás, pero muy poca sobre la valorización de residuos sólidos de un relleno sanitario; mientras que de autores nacionales es limitada la investigación en ambos temas.
- Es indispensable continuar con la investigación y desarrollo de la producción del biogás, como fuente energética con el impulso de la inversión privada apoyada por una decisión política de Estado para su financiamiento como subsidios para insertarlos dentro del SEIN, o como fuente de energía alterna para otros sectores de producción.
- El Perú debe mantener su buena imagen ante la comunidad internacional como un país respetuoso del medio ambiente y de los acuerdos establecidos como el de París y el Protocolo de Kioto, contribuyendo con su cuota de mitigación de GEI y el cambio progresivo de su matriz energética con fuentes de energías renovables; así como cumplir con el ODS 7, establecido por las Naciones Unidas.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por su apoyo en la elaboración de este artículo. Al Ing William Segura por su colaboración para obtener los datos técnicos. A la Dra Silvia Iglesias por su asesoramiento permanente.

VII. REFERENCIAS

- Ardolino, F. & Arena, U. (2019) *Biowaste-to-biomethane: an LCA study on biogas and syngas roads*. *Waste Manag*, 87, (pp. 441 – 453), <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.030>
- Ayala, R., Ramírez, J., Rey, J. y Taxa, M. (2017) *Desarrollo de un modelo de negocio de compostaje de residuos sólidos orgánicos para la comercialización de abono orgánico*. [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17724>
- Bhatt, A.H. & Tao, L. (2020) *Economic perspectives of biogas production via anaerobic digestion*. *Bioengineering*, 7 (3) p. 74. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7030074>
- Chin, K. F., Wan, C., Li, Y., Alaimo, C. P., Green, P. G., Young, T. M., & Kleeman, M. J. (2020). *Statistical analysis of trace contaminants measured in biogas*. *Science of The Total Environment*, 729, 138702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138702>
- COP 21 (s/f) Acuerdo de París. <https://cop23.unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- EPA (2016). Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Inf. téc. EPA-Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. <https://bit.ly/2Tlw84S>
- Escamilla, E. (2019). *Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios*. *La Granja*. Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 29(1) (pp. 32- 44). <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.03>
- Ghasemian, S., Faridzad, A., Abbaszadeh, P., Taklif, A., Ghasemi, A., & Hafezi, R. (2020). *An overview of global energy scenarios by 2040: identifying the driving forces using cross-impact analysis method*. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02738-5>
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., Wu, J., & Li, F. (2017). *Energy Self-sufficient Wastewater Treatment Plants: Feasibilities and Challenges*. *Energy Procedia*, 105, 3741–3751. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.868>
- Hosseini, S. S., & Denayer, J. F. M. (2022). *Biogas upgrading by adsorption processes: Mathematical modeling, simulation and optimization approach – A review*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107483. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107483>
- IEA (2020) *Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth*, IEA, Paris, Francia. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- Imán, I. (2021) *Potencial energético de la biomasa residual pecuaria en el campus de la UNALM* [Tesis de Bachiller]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4692>
- Informe de estado global de energías renovables 2016 (2016) Red de Políticas de Energía Renovable para el siglo XXI <http://www.ren21.net/resources/publications/>
- Innova Ambiental (2023) Relleno sanitario Portillo Grande. Entrevista con el Ing. Néstor Mancilla, Gerente de Operaciones.
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., & Luczkiewicz, A. (2021). *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
- Kormi, T., Ali, NBH, Abichou, T. & Green, R. (2017) *Estimación de emisiones de metano de vertederos mediante métodos de búsqueda estocástica*. *Investigación sobre la contaminación atmosférica*, v. 8, n. 4 (pp. 597-605). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.12.020>
- MINEM (2022) Balance Nacional de energía, 2019. Dirección General de Eficiencia Energética Área de Planeamiento Energético. (p. 119) <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/1902937-balance-nacional-de-energia-2019>
- Moreira, F. G. dos S., Guedes, M. J. F., Monteiro, V. E. D., & Melo, M. C. de. (2020). *Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro*

sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 25(2), 247–258. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020189648>

- Nascimento, M. C. B., Freire, E. P., Dantas, F. de A. S., & Giansante, M. B. (2019). *Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil*. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(1), 143–155. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019171125>
- Osinermin (2017) *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático. Tecnologías de RER y nuevas tendencias energéticas* (pp. 51-53) ISBN: 978-612-47350-2-8. Lima, Perú. (Archivo PDF). https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinermin-Energia-Renovable-Peru-10anos.pdf
- Osinermin (2022) *Fichas técnicas Proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación. CT Huaycoloro II, La Gringa y Huaycoloro I.* (pp 203-206) (Archivo PDF). https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/generacion/1.Fichas_Tecnicas_Centrales_Operacion.pdf
- Patinvoh, R. J., & Taherzadeh, M. J. (2019). *Challenges of biogas implementation in developing countries*. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.006>
- Petramás (2020) Central térmica Huaycoloro. Entrevista al Ing Adamo Meléndez, administrador del relleno sanitario Huaycoloro.
- Rodríguez, D., Serrano, H.A., Delgado, A., Nolasco, D. & Saltiel, G. (2020) *From waste to resource - shifting paradigms for smarter wastewater interventions in Latin America and the Caribbean*. World Bank, Washington, DC <https://doi.org/10.1596/33385>
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). *Biogas: Developments and perspectives in Europe*. *Renewable Energy*, 129, 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Senamhi (2022) Estación Meteorológica Von Humbolt <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Sibilio, S., Rosato, A., Ciampi, G., Scorpio, M., & Akisawa, A. (2017). *Building-integrated trigeneration system: Energy, environmental and economic dynamic performance assessment for Italian residential applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 920–933. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.011>
- Sigersol (2022) Sistema de Información de Gestión de Residuos Sólidos <https://sigersol.minam.gob.pe/>
- Tait, S., Harris, P. W., & McCabe, B. K. (2021). *Biogas recovery by anaerobic digestion of Australian agro-industry waste. A review*. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126876>
- Tchobanoglous, G., Stensel, HD., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M. & Bowden, G. (2015) *Metcalf & Eddy / AECOM: Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. (5a ed.), AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil.
- UN General Assembly (2015) *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development*. A/RES/70/1. <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>
- Vásquez, A., De la Cruz, R., Llerena, M. e Isla, M. (2016) *La política de introducción de los biocombustibles en el Perú: una evaluación desde un enfoque de equilibrio general computable*. Reporte de Análisis Económico Sectorial – Sector Hidrocarburos Líquidos. Vol 7, diciembre. Osinermin. Lima, Perú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1400805/RAES-Hidrocarburos-A%C3%B1o%205-N%C2%BA%207.pdf?v=1603672774>

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.