

## Transformación Sostenible de Residuos Urbanos en Energía: Una Evaluación de la Producción de Metano en Puyo, Pastaza

### Sustainable Transformation of Urban Waste to Energy: An Assessment of Methane Production in Puyo, Pastaza

### Transformação sustentável de resíduos urbanos em energia: uma avaliação da produção de metano em Puyo, Pastaza

Cazares-Carrión, Karem Yael  
Universidad Estatal Amazónica

[kcazares@uea.edu.ec](mailto:kcazares@uea.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-8415-7723>



Peñañiel-Arcos, Pedro  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

[pedro.penafiela@epoch.edu.ec](mailto:pedro.penafiela@epoch.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-8723-1041>



Herrera-Feijoo, Robinson J.  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

[rherreraf2@uteq.edu.ec](mailto:rherreraf2@uteq.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-3205-2350>



Reyes-Villacrés, Janeth  
Secretaría Técnica de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica

[alejareyes0407@gmail.com](mailto:alejareyes0407@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0009-6832-3854>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/301>

#### Como citar:

Cazares-Carrión, K. Y., Peñañiel-Arcos, P., Herrera-Feijoo, R. J., & Reyes-Villacrés, J. (2024). Transformación Sostenible de Residuos Urbanos en Energía: Una Evaluación de la Producción de Metano en Puyo, Pastaza. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(E3), 29–48.

**Recibido:** 10/02/2024

**Aceptado:** 15/03/2024

**Publicado:** 30/04/2024

## Resumen

La descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) en rellenos sanitarios genera biogás con alto contenido en metano ( $\text{CH}_4$ ), un subproducto con gran potencial energético. La valorización de este biogás mediante combustión o purificación en biometano reduce emisiones de gases invernadero y genera electricidad y calor renovables. Esta investigación cuantificó la generación de RSU y su potencial de aprovechamiento energético mediante la evaluación de la formación de metano en el relleno sanitario de Puyo, ubicado en la Amazonía ecuatoriana, aplicando el modelo LandGEM desarrollado por la Agencia Medioambiental de los Estados Unidos. Se determinó una producción per cápita promedio en la localidad de 0.644 kg/hab/día y una acumulación total de 361.152,9 toneladas de RSU en el relleno sanitario, en el periodo 2022-2041, el cual se consideró como el intervalo de análisis. El modelo LandGEM estimó una generación acumulada de 33 millones de  $\text{m}^3$  de metano, permitiendo una producción eléctrica máxima de 3687 MWh/año, suficiente para abastecer a 1653 hogares. Los resultados resaltan el alto potencial de los RSU como fuente de energía renovable, en países en vías de desarrollo o bajo condiciones de escasez de generación. Se requiere mayor investigación para refinar las predicciones a largo plazo e integrar tecnologías avanzadas de valorización. Esta valorización de residuos mejoraría la sostenibilidad de ciudades amazónicas al reducir emisiones y generar beneficios socioeconómicos.

**Palabras clave:** Biogás, Rellenos sanitarios, LandGEM, Valorización energética, Sostenibilidad ambiental

## Abstract

Anaerobic decomposition of the organic fraction of municipal solid waste (MSW) in landfills generates biogas with a high methane ( $\text{CH}_4$ ) content, a by-product with great energy potential. The valorisation of this biogas by combustion or purification into biomethane reduces greenhouse gas emissions and generates renewable electricity and heat. This research quantified MSW generation and its energy potential by assessing methane formation in the Puyo landfill, located in the Ecuadorian Amazon, using the LandGEM model developed by the US Environmental Agency. An average local per capita production of 0.644 kg/inhab/day and a total accumulation of 361,152.9 tonnes of MSW in the landfill was determined for the period 2022-2041, which was considered as the analysis interval. The LandGEM model estimated a cumulative generation of 33 million  $\text{m}^3$  of methane, allowing a maximum electricity production of 3687 MWh/year, enough to supply 1653 households. The results highlight the high potential of MSW as a renewable energy source, in developing countries or under conditions of generation shortages. Further research is needed to refine long-term predictions and integrate advanced valorisation technologies. Such waste valorisation would improve the sustainability of Amazonian cities by reducing emissions and generating socio-economic benefits.

**Keywords:** Biogas, Landfill, LandGEM, Energy recovery, Environmental sustainability

## Resumo

A decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários gera biogás com um elevado teor de metano ( $\text{CH}_4$ ), um subproduto com grande potencial energético. A valorização deste biogás por combustão ou purificação em biometano reduz as emissões de gases com efeito de estufa e gera eletricidade e calor renováveis. Esta investigação quantificou a produção de RSU e o seu potencial energético, avaliando a formação de metano no aterro sanitário de Puyo, localizado na Amazônia equatoriana, utilizando o modelo LandGEM desenvolvido pela Agência Ambiental dos EUA. Foi determinada uma

produção média per capita na localidade de 0,644 kg/hab/dia e uma acumulação total de 361.152,9 toneladas de RSU no aterro para o período 2022-2041, que foi considerado como o intervalo de análise. O modelo LandGEM estimou uma produção cumulativa de 33 milhões de m<sup>3</sup> de metano, permitindo uma produção máxima de eletricidade de 3687 MWh/ano, suficiente para abastecer 1653 agregados familiares. Os resultados sublinham o elevado potencial dos RSU como fonte de energia renovável nos países em desenvolvimento ou em condições de escassez de produção. É necessária mais investigação para aperfeiçoar as previsões a longo prazo e integrar tecnologias avançadas de valorização. Esta valorização dos resíduos melhoraria a sustentabilidade das cidades amazónicas, reduzindo as emissões e gerando benefícios socioeconómicos.

**Palavras-chave:** Biogás, Aterro sanitário, LandGEM, Recuperação de energia, Sustentabilidade ambiental

## Introducción

El biogás generado en los rellenos sanitarios a partir de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, es una fuente de energía renovable con un alto potencial que ha comenzado a usarse en los últimos lustros (Callegari et al., 2020; Chrispim et al., 2021). La composición típica de este biogás es de un 40-60% de metano, 30-50% de dióxido de carbono y trazas de otros gases (Patinvoh & Taherzadeh, 2019; Tsui & Wong, 2019), por lo cual el poder calorífico del metano le confiere un importante valor energético. Además, el aprovechamiento del biogás previene su liberación directa a la atmósfera, reduciendo así su efecto como gas de efecto invernadero (Abanades et al., 2021; Patel et al., 2021). Existen diversas tecnologías para el aprovechamiento energético eficiente del biogás, desde la combustión directa para obtener calor y energía eléctrica, hasta el procesamiento para enriquecerlo en metano y utilizarlo como sustituto del gas natural (Dabe et al., 2019; Parashar et al., 2020). Todas estas condiciones han generado la necesidad de profundizar el estudio de la producción de biogás a partir de la degradación de residuos sólidos urbanos.

Dentro de este contexto, los modelos matemáticos se han convertido en una herramienta indispensable para estimar la generación de biogás y el potencial energético de los rellenos sanitarios. Estos modelos intentan representar la compleja dinámica bioquímica de la

descomposición de los residuos bajo condiciones anaeróbicas dentro de los rellenos sanitarios (Gollapalli & Kota, 2018; Hosseini et al., 2018). Entre los modelos más ampliamente utilizados destaca el LandGEM desarrollado por la EPA de Estados Unidos, que modela la generación de metano a partir de datos históricos de disposición de residuos y utilizando constantes cinéticas empíricas (Fallahizadeh et al., 2019a). Otro modelo relevante es el IPCC, que utiliza factores por defecto según el nivel de actividad y tipo de residuo (Moghadam et al., 2021). Estudios comparativos entre modelos han revelado diferencias significativas en sus estimaciones, impulsando así la continua refinación y validación de estos enfoques mediante la confrontación con datos empíricos. Además, la integración de la modelación matemática con técnicas avanzadas como la simulación numérica y el análisis de sensibilidad ha permitido una evaluación más robusta y detallada de los potenciales energéticos del biogás (Alam et al., 2022). Sin embargo, aún existen desafíos, como la necesidad de mejorar la comprensión de la cinética de descomposición de residuos a largo plazo y el efecto de prácticas de manejo sobre la generación de biogás. La comunidad científica continúa trabajando en la estandarización de metodologías y en el desarrollo de modelos más flexibles y adaptativos que puedan responder a las dinámicas cambiantes de los rellenos sanitarios y a las políticas ambientales globales. (Heiker et al., 2021; Rodrigo-Illari & Rodrigo-Clavero, 2020).

En Ecuador, la aplicación de modelos matemáticos para estimar el potencial de generación de biogás y recuperación de energía en rellenos sanitarios es aún incipiente. Solo unos pocos estudios reportan el uso de estas herramientas. Por ejemplo, (Ambuludi-Paredes et al., 2022a) utilizaron el modelo LandGEM para estimar la generación de metano del relleno sanitario de los cantones Pelileo y Patate en la provincia de Tungurahua, en donde se expone que la electricidad total estimada de 2011 a 2032 oscila entre 17693 MWh y 53385 MWh, lo cual podría suministrar los requerimientos propios del relleno sanitario y otras prestaciones. Otro estudio de (Poma et al., 2021) también aplica LandGEM para evaluar la producción

histórica y futura de biogás de los rellenos sanitarios de Cuenca y Guayaquil, en donde se manifiesta que la generación eléctrica a partir del biogás producido podría suplir las demandas energéticas de hasta 5083 y 45825 domicilios, respectivamente. Si bien estos trabajos constituyen esfuerzos aislados, demuestran el potencial de los modelos matemáticos para caracterizar el desempeño bioquímico de rellenos sanitarios ecuatorianos (Barragán-Escandón et al., 2020; Corozo, 2021). Se evidencia la necesidad de más investigación para validar y calibrar estos modelos con datos locales, a fin de obtener estimaciones confiables del recurso energético derivado de residuos sólidos urbanos en el país (Hernández et al., 2018; Pontón et al., 2019).

En este sentido, el objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial de producción de biogás del relleno sanitario de la ciudad de Puyo, ubicado en la Amazonía ecuatoriana, mediante la aplicación de modelo LandGEM con el fin de estimar la capacidad de generación eléctrica, dentro de un contexto de sostenibilidad. Además, los resultados pueden servir de apoyo para evaluar las políticas de reducción de GEI en los futuros esfuerzos del país e informar a los gobiernos municipales sobre la importancia de la gestión de residuos y desechos sólidos urbanos (RSU) y la construcción de sistemas de aprovechamiento de biogás.

## Metodología

### *Localización*

La investigación se llevó a cabo en el relleno sanitario de la ciudad de Puyo, la cabecera cantonal del cantón Pastaza y la capital de la Provincia de Pastaza. Esta localidad, situada a 930 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima lluvioso tropical con una temperatura promedio de 21.1 °C. Su economía principal se sustenta en el comercio, el turismo y la agricultura, lo que incide significativamente en la generación creciente de residuos sólidos urbanos. El relleno sanitario ha estado operativo durante 18 años, funcionando como un

botadero controlado. A lo largo de este período, ha expandido su área de influencia hasta alcanzar una extensión total de 2.5 hectáreas, incluyendo zonas destinadas a construcción. Este complejo está situado al Este de la ciudad de Puyo, abarcando un lote de aproximadamente 46 hectáreas bajo la responsabilidad del Municipio de Pastaza.

### Modelo LandGEM

Para evaluar el contenido de metano en el biogás generado en el relleno sanitario de Puyo, se aplicó el modelo matemático LandGEM. Este modelo trabaja en función de diversos factores, como condiciones climáticas, niveles de precipitación, humedad, volumen de residuos, producción per cápita (PPC) y la proporción de residuos orgánicos e inorgánicos (Ghosh et al., 2019a).

Para calcularlo, se requieren diversas variables esenciales, como el área y la capacidad del relleno sanitario, la cantidad anual de residuos recibidos, la constante de tasa de generación de metano ( $k$ ), el potencial de generación de metano ( $L_0$ ) y el número total de años de operación del relleno sanitario. Asimismo, se tomó en cuenta un 55% como contenido de metano en el biogás de acuerdo a (Ambuludi-Paredes et al., 2022b).

LandGEM se basa en una ecuación de descomposición con cinética de primer orden para estimar la generación de biogás, se estima en función del contenido de metano del biogás, con el tiempo, expresada así:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n * \sum_{j=0.1}^1 k * L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) * e^{-kT_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

- $Q_{CH_4}$ : es la generación anual de  $CH_4$  en el año del cálculo, [ $m^3/año$ ]
- $i$ : es el incremento de tiempo de 1 año,
- $j$ : es el incremento de tiempo de 0.1 años,
- $n$ : es el (año de cálculo) (año inicial de aceptación de residuos),
- $k$ : es la constante general de  $CH_4$  (año 1),

- $L_0$ : es la capacidad potencial de generación de  $\text{CH}_4$  [ $\text{m}^3/\text{t}$ ],
- $M_i$ : es la cantidad de residuos recibidos en el año  $i$  [t],
- $T_{ij}$ : es la edad de la sección  $j$  de cantidad de residuos  $M_i$  aceptado en el año  $i$ .

Para la determinación de  $k$  y  $L_0$ , existen valores determinados para rellenos sanitarios convencionales, en este caso el modelo LandGEM se adaptó a las condiciones climáticas de la zona en estudio variando los valores de  $k$  y  $L_0$  (AGUILAR-VIRGEN et al., 2012).

Para la estimación del potencial de generación de metano ( $L_0$ ) se basó en la siguiente ecuación:

$$L_0 = 1000 * \text{MCF} * \text{DOC} * \text{DOC}_F * F * \frac{16}{12} \quad (2)$$

Donde:

- $L_0$ : potencial de generación de metano [ $\text{m}^3/\text{ton}$ ],
- MCF: factor de corrección de metano,
- DOC: factor de ajuste de la composición de los residuos,
- $\text{DOC}_F$ : factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás,
- $F$ : fracción de metano contenido en biogás, se asume típicamente 0.5,
- El factor  $\frac{16}{12}$  corresponde a la constante estequiométrica.

Para estimar el índice de generación de metano ( $k$ ), se llevó a cabo una caracterización de los RSU mediante el método de cuarteo (Cantanhede et al., 2005). Esta metodología implicó la recolección aleatoria y limitada de residuos durante 7 días, además de un día de operación de purga de caracterización. Se seleccionaron distintos tipos de desechos, clasificándolos en categorías como residuos de degradación lenta, moderada y rápida, así como residuos a granel.

El proceso de cuarteo consistió en homogeneizar y dividir la muestra recolectada en cuatro partes iguales (A, B, C, D), eliminando las partes opuestas para garantizar una muestra representativa. Luego, se separaron los distintos tipos de residuos según la categoría deseada. Posteriormente, se determinó el porcentaje de cada tipo de residuo obtenido. Se adquirieron valores referenciales de " $k$ " según el tipo de residuo y el clima de la zona de estudio. Estos

valores se multiplicaron por los porcentajes de residuos correspondientes, y la suma total proporcionó un valor final de "k"(Tabla 1). Este valor se incorporó al modelo LandGEM para la estimación de emisiones de metano (Castro, 2020).

**Tabla 1.**

*Valores de tasa de generación de metano por defecto recomendados (k) bajo el nivel*

| Tipo de residuo                  |   | Zona climática                 |           |                        |           |                         |           |                                   |            |
|----------------------------------|---|--------------------------------|-----------|------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-----------------------------------|------------|
|                                  |   | Frío y templado<br>(mat ≤20°C) |           |                        |           | Tropical<br>(mat ≥20°C) |           |                                   |            |
|                                  |   | Seco<br>(map/pet <1)           |           | Húmedo<br>(map/pet >1) |           | Seco<br>(map <1000 mm)  |           | Húmedo y mojado<br>(map ≥1000 mm) |            |
|                                  |   | Defecto                        | Rango     | Defecto                | Rango     | Defecto                 | Rango     | Defecto                           | Rango      |
| Residuos de degradación lenta    | Residuos de papel/ textiles   | 0.04                           | 0.03-0.05 | 0.06                   | 0.05-0.07 | 0.045                   | 0.04-0.06 | 0.07                              | 0.06-0.085 |
|                                  | Residuos de madera/paja   | 0.02                           | 0.01-0.03 | 0.03                   | 0.02-0.04 | 0.025                   | 0.02-0.04 | 0.035                             | 0.03-0.05  |
| Residuos de degradación moderada | Otros residuos orgánicos putrescibles (no alimentarios) / de jardines y parques | 0.05                           | 0.04-0.06 | 0.1                    | 0.06-0.1  | 0.065                   | 0.05-0.08 | 0.17                              | 0.15-0.2   |
|                                  | Residuos de degradación rápida  | 0.06                           | 0.05-0.08 | 0.185                  | 0.1-0.2   | 0.085                   | 0.07-0.1  | 0.4                               | 0.17-0.7   |
|                                  | Residuos a granel   | 0.05                           | 0.04-0.06 | 0.09                   | 0.08-0.1  | 0.065                   | 0.05-0.08 | 0.17                              | 0.15-0.2   |

**Fuente:** 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

La Tabla 2 muestra tanto el índice de generación de metano (k) como el índice de potencial del metano (Lo), centrándose en las características climáticas específicas del vertedero sanitario de Puyo, como la precipitación.

**Tabla 2.**

*Valores de k y Lo para el relleno sanitario de Puyo utilizados en el modelo LandGEM*

| Precipitación (mm/año) | k   | Lo |
|------------------------|-----|----|
| >1000                  | 0.7 | 96 |

En el caso del vertedero sanitario de Puyo, la precipitación anual promedio es de 2.500 mm. Según la tabla, esto corresponde a un índice de generación de metano (k) de 0,7 y un

índice de potencial del metano (Lo) de 96. Esto significa que, en el vertedero sanitario de Puyo, se espera que se generen 0,7 metros cúbicos de metano por cada metro cúbico de residuos sólidos depositados. Además, se espera que el metano generado tenga un contenido de metano del 96%.

### Condiciones climáticas

En relación con las variables climáticas, la precipitación y la humedad se obtuvieron a partir de información suministrada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), con datos extraídos en colaboración con la estación Hidrológica ubicada en la parroquia Veracruz - Pastaza. Además, se consideraron aspectos adicionales como las características topográficas y el tipo de vegetación para determinar el piso climático correspondiente (INAMHI, Recolección de datos hidrológicos y meteorológicos, 2023). La información sobre aspectos como el área del relleno sanitario, el número de celdas existentes y otros datos relevantes para el desarrollo del estudio fue proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Pastaza, en colaboración con su Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDyOT), proveniente de la administración anterior (GADMP, 2020). Esta colaboración facilitó datos esenciales que respaldaron la ejecución del estudio.

### Producción per cápita

Para calcular la producción per cápita (PPC) de residuos, se puede obtener usando la siguiente ecuación:

$$PPC = \frac{W}{P} \quad (3)$$

Donde:

- PPC: Producción per cápita de residuos sólidos, [kg/hab.día]
- W: Peso generado de residuos sólidos en un día, [kg]
- P: Población que generó esos residuos sólidos en un día, [hab]

Para proyectar la población futura del cantón de Pastaza, se toma en cuenta la tasa de crecimiento poblacional y la población actual inicial recopilada por el INEC. Además, se emplea la siguiente ecuación:

$$P_f = P_i * (1 + r)^t \quad (4)$$

Donde:

- Pf: Población futura
- Pi: Población inicial
- r: tasa de crecimiento
- t: tiempo en años a los que se va a proyectar

Se llevó a cabo una proyección de los residuos sólidos urbanos generados en el relleno sanitario de la ciudad de Puyo, en el periodo 2022-2041. Se tomó como dato inicial el año 2022, ya que a partir de ese periodo entró en funcionamiento la última celda de acumulación de residuos sólidos del relleno sanitario de la ciudad, proyectando una vida útil de la locación de 20 años.

### Determinación del potencial de generación de electricidad

La capacidad de generar electricidad se puede determinar mediante la contabilización de la producción de metano, cuyo alto contenido energético lo convierte en una fuente aprovechable de energía renovable, especialmente proveniente de cantidades significativas de residuos.

La ecuación a continuación ilustra cómo calcular el potencial de generación de electricidad en sistemas de captación de biogás en rellenos sanitarios:

$$EAG = \frac{Q_{CH_4} * 37.2 * EGe * ER * 0.9 * C}{\phi} \quad (5)$$

Donde:

- EAG: electricidad anual generada [MWh],
- $Q_{CH_4}$ : metano generado [ $m^3/año$ ],
- 37.2 (MJ/ $m^3$ ): valor de calentamiento más bajo de metano,
- EGe: eficiencia de generación de electricidad del dispositivo de conversión, según

- varios autores se puede considerar de 35%,
- ER: eficiencia de recolección de metano, se consideró de 75%,
  - 0.9: factor de oxidación del relleno sanitario,
  - C: factor de capacidad, y se considera como 85%,
  - $\emptyset$ : factor de conversión de MJ a MWh.

## Resultados

### *PPC estimada de la ciudad de Puyo*

La cuantificación de los RSU generados en la ciudad de Puyo para los años 2020 – 2022, y posteriormente destinados al relleno sanitario, se expone de manera detallada en la Tabla 3. Este registro abarca una variedad de residuos, incluyendo aquellos provenientes de domicilios, instituciones, y actividades comerciales, proporcionando así un panorama integral de la magnitud y composición de la problemática de gestión de residuos en la localidad. La información contenida en la tabla refleja la cantidad y tipología de RSU que requieren ser gestionados de manera efectiva para abordar los desafíos ambientales y sanitarios asociados con la disposición final de estos materiales.

**Tabla 3.**

### *Gestión de RSU de la ciudad de Puyo*

| Años  | 2020  | 2021    | 2022  |
|---|-------|---------|-------|
| Población atendida (hab)                        | 64633 | 66830   | 67024 |
| Generación per cápita (kg/hab.día)              | 0,654 | 0,634   | 0,643 |
|   |       | Ton/día |       |
| Gestión diaria de desechos                      | 42,31 | 42,39   | 43,09 |
| Desechos orgánicos recuperados                  | 0,15  | 1,9     | 1,4   |
| Desechos inorgánicos recuperados para reciclaje | 0,55  | 0,52    | 0,56  |
| Confinado en celda                              | 41,61 | 39,97   | 41,13 |

**Fuente:** Autores (2024)

La PPC de RSU de la ciudad de Puyo se ha mantenido prácticamente constante entre los años 2020, 2021 y 2022. Este parámetro depende de una serie de factores que varían según la demografía, la cultura, el nivel de desarrollo económico y otros elementos específicos de la comunidad (del Consuelo Hernández-Berriel et al., 2016). El valor promedio de PPC de la localidad es de 0,644 kg/hab/día, un valor mayor al promedio nacional (0,57 kg/hab/día) (Ministerio del Ambiente, 2023).

Por otro lado, la Tabla 2 muestra que la recuperación de residuos orgánicos en Puyo ha aumentado ligeramente en los últimos tres años. En 2020, la recuperación de residuos orgánicos fue de 0,15 toneladas por día, lo que equivale a un 3,5% de los residuos sólidos generados. En 2021, la recuperación de residuos orgánicos aumentó a 1,9 toneladas por día, lo que equivale a un 7,2% de los residuos sólidos generados. En 2022, la recuperación de residuos orgánicos aumentó a 1,4 toneladas por día, lo que equivale a un 5,4% de los residuos sólidos generados. Este aumento en la recuperación de residuos orgánicos es positivo, ya que indica que la ciudad de Puyo está avanzando en la gestión de sus residuos sólidos. Sin embargo, todavía hay margen de mejora. La recuperación de residuos orgánicos en Puyo sigue siendo baja en comparación con otras ciudades del país. Por ejemplo, en la ciudad de Quito la recuperación es de 15,2%. (Ministerio del Ambiente, 2023).

### **Proyección de los residuos sólidos**

La Tabla 4 presenta la proyección de los RSU acumulados en el relleno sanitario de la ciudad del Puyo hasta el año 2041. Se tomó como dato inicial el año 2022, ya que a partir de ese periodo entró en funcionamiento la última celda del relleno sanitario de la ciudad, proyectando una vida útil de la locación de 20 años. Esta proyección resulta en una acumulación total de RSU estimada en 361.152,9 toneladas.

Tabla 4.

*Proyección de residuos sólidos acumulados en el relleno sanitario de Puyo*

| Año   | Proyección poblacional | RSU                         | RSU                          | RSU                          |
|-------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
|       |                        | acumulados diarios (kg/día) | acumulados diarios (ton/día) | acumulados anuales (ton/año) |
| 2022  | 67024                  | 41130,0                     | 41,1                         | 15012,5                      |
| 2023  | 69310                  | 41911,5                     | 41,9                         | 15297,7                      |
| 2024  | 71673                  | 42707,8                     | 42,7                         | 15588,3                      |
| 2025  | 74117                  | 43519,2                     | 43,5                         | 15884,5                      |
| 2026  | 76644                  | 44346,1                     | 44,3                         | 16186,3                      |
| 2027  | 79258                  | 45188,7                     | 45,2                         | 16493,9                      |
| 2028  | 81961                  | 46047,3                     | 46,0                         | 16807,3                      |
| 2029  | 84756                  | 46922,2                     | 46,9                         | 17126,6                      |
| 2030  | 87646                  | 47813,7                     | 47,8                         | 17452,0                      |
| 2031  | 90634                  | 48722,1                     | 48,7                         | 17783,6                      |
| 2032  | 93725                  | 49647,9                     | 49,6                         | 18121,5                      |
| 2033  | 96921                  | 50591,2                     | 50,6                         | 18465,8                      |
| 2034  | 100226                 | 51552,4                     | 51,6                         | 18816,6                      |
| 2035  | 103644                 | 52531,9                     | 52,5                         | 19174,1                      |
| 2036  | 107178                 | 53530,0                     | 53,5                         | 19538,5                      |
| 2037  | 110833                 | 54547,1                     | 54,5                         | 19909,7                      |
| 2038  | 114612                 | 55583,5                     | 55,6                         | 20288,0                      |
| 2039  | 118521                 | 56639,6                     | 56,6                         | 20673,4                      |
| 2040  | 122562                 | 57715,7                     | 57,7                         | 21066,2                      |
| 2041  | 126741                 | 58812,3                     | 58,8                         | 21466,5                      |
| TOTAL |                        |                             |                              | 361152,9                     |

**Fuente:** Autores (2024)**Producción de metano mediante el método LandGEM**

La generación de biogás en vertederos se lleva a cabo a través de un proceso conocido como digestión anaeróbica. La composición típica del biogás comprende aproximadamente entre un 55% y un 70% de metano (CH<sub>4</sub>) en volumen, un 30% a 45% de dióxido de carbono

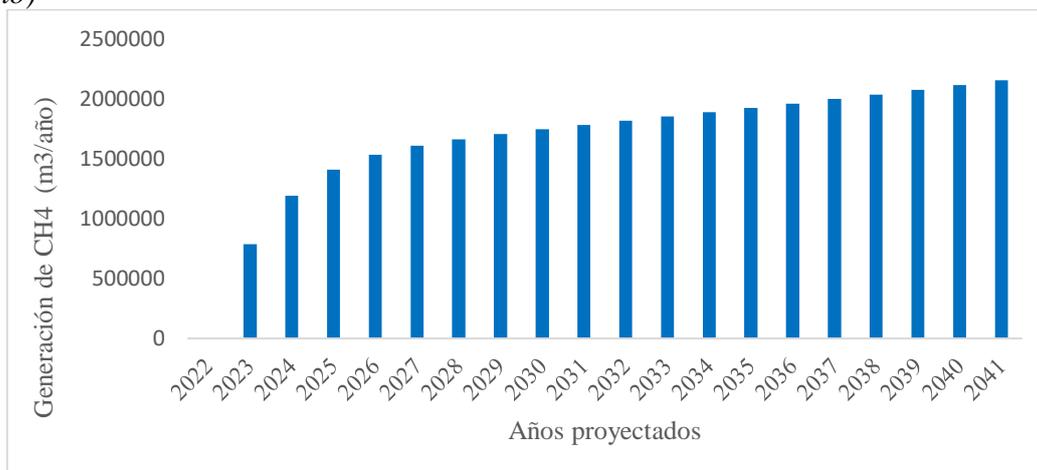
(CO<sub>2</sub>), alrededor de 80 a 100 partes por millón en volumen (ppmV) de amoníaco (NH<sub>3</sub>), entre 1000 y 3000 ppmV de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), y otros hidrocarburos en cantidades menores a 100 ppmV (Leonzio, 2016).

Cuando se introducen los residuos sólidos urbanos (RSU) en un vertedero, los componentes orgánicos inician una serie de reacciones químicas. En las capas superficiales del vertedero, en presencia de aire atmosférico, los componentes orgánicos naturales experimentan una oxidación aeróbica, dando como resultado la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). No obstante, la reacción predominante en los vertederos es la anaeróbica, que conduce a la generación de metano (CH<sub>4</sub>) (Santos et al., 2020).

En base a ello, se procedió a estimar la producción de metano (CH<sub>4</sub>) en el relleno sanitario de la ciudad de Puyo mediante la metodología LandGEM, resultando en un volumen total de 33,248,656.2 m<sup>3</sup> en el periodo analizado. Esto se puede apreciar en la Figura 3 del presente artículo.

### Figura 1.

*Producción de CH<sub>4</sub> anual del relleno sanitario de la ciudad de Puyo, en el periodo 2022-2041 (m<sup>3</sup>/año)*



Se observa que la producción máxima de metano ocurre en el último año de operaciones, y es altamente probable que este índice siga aumentando durante al menos dos años después de su cierre. Este patrón es bastante similar al identificado en el estudio realizado por (Ambuludi-Paredes et al., 2022b), donde la producción alcanzó su punto máximo un año

después del cierre técnico. Sin embargo, de manera consistente, la producción de biogás disminuye significativamente en los años posteriores (Wang et al., 2023).

Asimismo, según German et al. (2023), la producción anual de metano en el relleno sanitario más grande de Montería, Colombia, registró un promedio de 2997923 m<sup>3</sup>/año.

De manera similar a los hallazgos de la presente investigación, se observa un incremento en la producción anual de metano. Este aumento se relaciona directamente con el crecimiento de la población, y, consecuentemente, con el aumento en la generación de residuos sólidos, lo que contribuye al aumento de la emisión de gases (Fallahizadeh et al., 2019b). La producción de CH<sub>4</sub> está vinculada a la velocidad con la que la población microbiana biodegrada o descompone los sustratos (Sil et al., 2014). La cantidad total de metano emitido desde un vertedero al aire libre está condicionada por la totalidad de residuos depositados en el lugar y sus propiedades (Chandra & Ganguly, 2023).

### **Determinación del potencial de generación de electricidad del biogás**

Finalmente, se calculó el potencial de generación de electricidad del biogás (Tabla 5), obteniendo un total de 53,628.5 MWh durante el periodo de análisis. Sorprendentemente, este resultado nos indica que al segundo año podríamos abastecer de energía a 279 hogares con un consumo máximo de 2007.84 kWh/año, considerando un perfil de hogares de bajo consumo. En el estudio llevado a cabo por German et al. (2023), se observa una tendencia similar a los resultados presentados en este estudio, donde se evidencia que a medida que aumenta el contenido de metano, la generación de biogás y, por ende, la producción de energía eléctrica, también se incrementa (Ghosh et al., 2019b). Este incremento anual también se puede visualizar en la Figura 4. La evaluación previa señala que, al utilizar la energía proveniente de los vertederos, se logra no solo disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, sino que también sirve como una fuente alternativa de energía para los hogares ubicados en las proximidades del vertedero (Ramprasad et al., 2022).

**Tabla 5.**

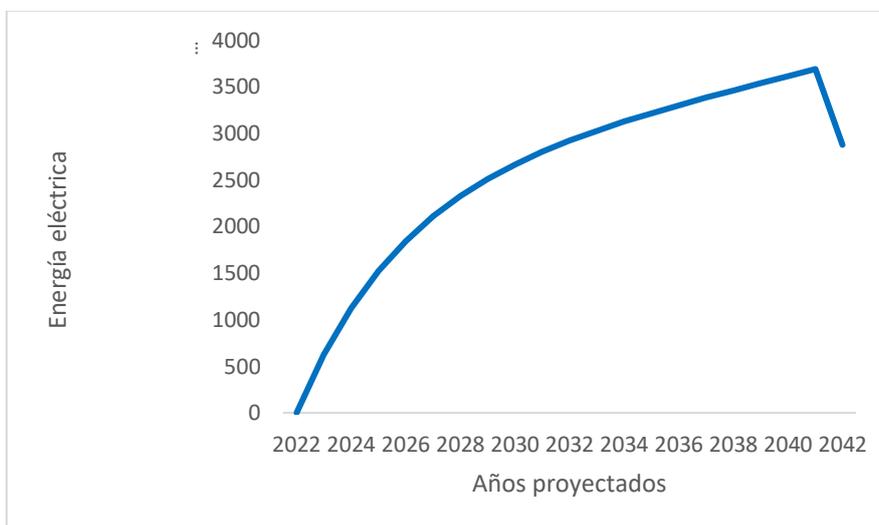
*Proyección de la generación de energía eléctrica a partir del biogás producido*

| Year | Biogás (m3/year) | Energía eléctrica (MWh/año) | No. De casas suministradas al año |
|------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 2022 | 0                | 0                           | 0                                 |
| 2023 | 295269,065       | 623                         | 279                               |
| 2024 | 530834,956       | 1120                        | 502                               |
| 2025 | 720010,56        | 1519                        | 681                               |
| 2026 | 873165,991       | 1843                        | 826                               |
| 2027 | 998379,564       | 2107                        | 944                               |
| 2028 | 1101944,78       | 2325                        | 1042                              |
| 2029 | 1188765,16       | 2509                        | 1124                              |
| 2030 | 1262661,77       | 2665                        | 1194                              |
| 2031 | 1326612,67       | 2800                        | 1255                              |
| 2032 | 1382939,44       | 2918                        | 1308                              |
| 2033 | 1433452,45       | 3025                        | 1356                              |
| 2034 | 1479563,96       | 3122                        | 1400                              |
| 2035 | 1522376,26       | 3213                        | 1440                              |
| 2036 | 1562750,23       | 3298                        | 1478                              |
| 2037 | 1601358,84       | 3379                        | 1515                              |
| 2038 | 1638728,72       | 3458                        | 1550                              |
| 2039 | 1675272,61       | 3535                        | 1585                              |
| 2040 | 1711314,58       | 3611                        | 1619                              |
| 2041 | 1747109,7        | 3687                        | 1653                              |
| 2042 | 1360650,4        | 2871                        | 1287                              |

**Fuente:** Autores (2024)

**Figura 2.**

*Generación eléctrica a partir de biogás obtenido del relleno sanitario de la ciudad de Puyo, desde el año 2022-2041*



**Fuente:** Autores (2024)

## Conclusiones

En el estudio realizado se determinó que la PPC promedio diaria en la ciudad de Puyo es de 0,644 kg/hab/día. Con este resultado se proyecta una acumulación total de residuos en el relleno sanitario de 378.286 toneladas, en el periodo 2022-2041. A su vez, esto determina una generación total estimada de 33,248,656.2 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.

Por otro lado, la capacidad de generación eléctrica estimada llega a su valor pico de 3687 MW/año, en el 2041, año de cierre proyectado del relleno sanitario. De igual manera, la generación total eléctrica calculada fue de 53628 MWh en el periodo analizado. Esta generación permitiría abastecer de energía eléctrica a un máximo de 1653 viviendas.

Este tipo de investigaciones permiten visibilizar la importancia de la valoración energética de los residuos sólidos urbanos, dentro de un contexto de sostenibilidad y lucha contra el cambio climático, ofreciendo una oportunidad valiosa a las municipalidades de la región y el país para demostrar que están en la línea de la Agenda 2030 y de la conservación ambiental

## Referencias bibliográficas

- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmaeilion, F., El Haj Assad, M., Hajilounezhad, T., Jamali, D. H., & Hmida, A. (2021). A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–24.
- AGUILAR-VIRGEN, Q., OJEDA-BENÍTEZ, S., TABOADA-GONZÁLEZ, P., & QUINTERO-NÚÑEZ, M. (2012). Estimación de las constantes k Y L<sub>0</sub> de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28, 45–51.
- Alam, A., Chaudhry, M. N., Ahmad, S. R., Ullah, R., Batool, S. A., Butt, T. E., Alghamdi, H. A., & Mahmood, A. (2022). Application of LandGEM mathematical model for the estimation of gas emissions from contaminated sites. A case study of a dumping site in Lahore, Pakistan. *Environment Protection Engineering*, 48(1).
- Ambuludi-Paredes, R. R., Carvajal-Padilla, V. P., & Diéguez-Santana, K. (2022a). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(1), 67–78.

- Ambuludi-Paredes, R. R., Carvajal-Padilla, V. P., & Diéguez-Santana, K. (2022b). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(1), 67–78.
- Barragán-Escandón, A., Olmedo Ruiz, J. M., Curillo Tigre, J. D., & Zalamea-León, E. F. (2020). Assessment of power generation using biogas from landfills in an equatorial tropical context. *Sustainability*, 12(7), 2669.
- Callegari, A., Bolognesi, S., Ceconet, D., & Capodaglio, A. G. (2020). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(4), 384–436.
- Cantanhede, Á., Sandoval, L., Monge, G., & Caicho, C. (2005). Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de residuos sólidos.
- Castro, E. A. (2020). Guía para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos. *Inventum*, 15(29), 76–94.
- Chandra, S., & Ganguly, R. (2023). Assessment of landfill gases by LandGEM and energy recovery potential from municipal solid waste of Kanpur city, India. *Heliyon*, 9(4), e15187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15187>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. In *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.25>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023b). Prácticas de laboratorio y cuestionario sobre biotecnología ambiental. In *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.18>
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103033.
- Corozo, J. P. M. (2021). Comportamiento dinámico del biogas en el relleno sanitario del cantón Gonzalo Pizarro, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 11291–11301.
- Dabe, S. J., Prasad, P. J., Vaidya, A. N., & Purohit, H. J. (2019). Technological pathways for bioenergy generation from municipal solid waste: Renewable energy option. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(2), 654–671.
- del Consuelo Hernández-Berriel, M., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., & Buenrostro-Delgado, O. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 11–22.
- Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. (2019a). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *MethodsX*, 6, 391–398.
- Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. (2019b). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *MethodsX*, 6, 391–398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>
- German, S. J. S., Torres, J. D. A., Garcés, A. R., & Oviedo, M. E. D. (2023). Evaluación energética de la formación de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario mediante el modelo LandGEM. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11(2), 16–27.
- Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K., & Thakur, I. S. (2019a). Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid

- waste landfills of Delhi, India. *Bioresource Technology*, 272, 611–615.
- Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K., & Thakur, I. S. (2019b). Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. *Bioresource Technology*, 272, 611–615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.069>
- Gollapalli, M., & Kota, S. H. (2018). Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models. *Environmental Pollution*, 234, 174–180.
- Guamán-Rivera, S. A., Herrera-Feijoo, R. J., Paredes-Peralta, A. V., Ruiz-Sánchez, C. I., Bonilla-Morejón, D. M., Samaniego-Quiguiri, D. P., Paredes-Fierro, E. J., Fernández-Vélez, C. V., Almeida-Blacio, J. H., & Rivadeneira-Moreira, J. C. (2023). Sinergia Científica: Integrando las Ciencias desde una Perspectiva Multidisciplinaria. In *Sinergia Científica: Integrando las Ciencias desde una Perspectiva Multidisciplinaria*. <https://doi.org/10.55813/egaea.1.2022.33>
- Guamán-Rivera, S. A., Herrera-Feijoo, R. J., Paredes-Peralta, A. V., & Ruiz-Sánchez, C. I. (2023). Respuestas productivas de cuyes (*Cavia porcellus*) a la suplementación con harina de amaranto (*Amaranthus caudatus*) y curcuma (*Curcuma longa*): Un enfoque innovador para la cuyicultura sostenible. In *Sinergia Científica: Integrando las Ciencias desde una Perspectiva Multidisciplinaria*. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.20>
- Heiker, M., Kraume, M., Mertins, A., Wawer, T., & Rosenberger, S. (2021). Biogas plants in renewable energy systems—A systematic review of modeling approaches of biogas production. *Applied Sciences*, 11(8), 3361.
- Herrera-Feijoo, R. J. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33–56.
- Herrera-Feijoo, R. J., Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., & Andrade, J. C. (2023). Análisis bibliométrico como una herramienta en la biotecnología ambiental. In *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.17>
- Hosseini, S. S., Yaghmaeian, K., Yousefi, N., & Mahvi, A. H. (2018). Estimation of landfill gas generation in a municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), 493–506.
- Leonzio, G. (2016). Upgrading of biogas to bio-methane with chemical absorption process: simulation and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 131, 364–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.020>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. del Ecuador. (2023). Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Moghadam, M. A., Feizi, R., Panahi Fard, M., Haghghi Fard, N. J., Omidinasab, M., Faraji, M., & Shenavar, B. (2021). Estimating greenhouse emissions from sanitary landfills using Land-GEM and IPCC model based on realistic scenarios of different urban areas: a case study of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 819–830.
- Parashar, C. K., Das, P., Samanta, S., Ganguly, A., & Chatterjee, P. K. (2020). Municipal solid wastes—a promising sustainable source of energy: a review on different waste-to-energy conversion technologies. *Energy Recovery Processes from Wastes*, 151–163.
- Patel, R., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Conversion of municipal solid waste to biofuels. *Progressive Thermochemical Biorefining Technologies*, 43–61.
- Patinvoh, R. J., & Taherzadeh, M. J. (2019). Challenges of biogas implementation in developing countries. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 30–37.
- Poma, P., Usca, M., Polanco, M., Toulkeridis, T., & Mestanza-Ramón, C. (2021). Estimation of biogas generated in two landfills in south-central Ecuador. *Atmosphere*, 12(10), 1365.

- Ramprasad, C., Teja, H. C., Gowtham, V., & Vikas, V. (2022). Quantification of landfill gas emissions and energy production potential in Tirupati Municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *MethodsX*, 9, 101869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101869>
- Rodrigo-Illarri, J., & Rodrigo-Clavero, M.-E. (2020). Mathematical modeling of the biogas production in msw landfills. Impact of the implementation of organic matter and food waste selective collection systems. *Atmosphere*, 11(12), 1306.
- Ruiz Sánchez, C. I., Herrera Feijoo, R. J., Correa Salgado, M. de L., & Peñafiel Arcos, P. A. (2023). Fundamentos Teóricos de Química Inorgánica. In *Fundamentos Teóricos de Química Inorgánica*. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.19>
- Ruiz-Sánchez, C. I., Herrera-Feijoo, R. J., Correa-Salgado, M. de L., & Hidalgo-Hugo, L. D. (2023). Principios Básicos de Bioquímica para Agroecología. In *Principios Básicos de Bioquímica para Agroecología*. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.23>
- Ruiz-Sanchez, C. I., Herrera-Feijoo, R. J., Guamán-Rivera, S. A., & Fernández-Vélez, C. V. (2023). Enfoque innovador en el diseño de revestimientos para cunetas: material compuesto de polímeros reciclados. In *Sinergia Científica: Integrando las Ciencias desde una Perspectiva Multidisciplinaria*. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.22>
- Santos, I. F. S., Barros, R. M., & Filho, G. L. T. (2020). Biogas Production From Solid Waste Landfill. In S. Hashmi & I. A. Choudhury (Eds.), *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 11–19). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10585-5>
- Sil, A., Kumar, S., & Wong, J. W. C. (2014). Development of correction factors for landfill gas emission model suiting Indian condition to predict methane emission from landfills. *Bioresource Technology*, 168, 97–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.035>
- Tsui, T.-H., & Wong, J. W. C. (2019). A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1, 151–167.
- Wang, D., Yuan, W., Xie, Y., Fei, X., Ren, F., Wei, Y., Jiao, G., & Li, M. (2023). Simulating CH<sub>4</sub> emissions from MSW landfills in China from 2003 to 2042 using IPCC and LandGEM models. *Heliyon*, 9(12), e22943. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22943>.