



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

DECANATO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL, MENCIÓN EN SANEAMIENTO
AMBIENTAL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
Y/O DESARROLLO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER
EN INGENIERÍA AMBIENTAL, MENCIÓN EN SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN: ESTIMACIÓN DE LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN
PASTAZA, A TRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS, PARA SU USO Y
APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

AUTOR: CARLOS ANDRÉS SANIPATÍN CEDEÑO, Ing.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN: PAÚL MARCELO
MANOBANDA PINTO, MSc.**

PUYO – ECUADOR

2022



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
DECANATO DE POSGRADO
FORMATO DP-UT-013A

FORMATO DP-UT-013A: DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, SANIPATÍN CEDEÑO CARLOS ANDRÉS, con cédula de identidad 160045954-7, declaro ante las autoridades educativas de la Universidad Estatal Amazónica, que el contenido del Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o desarrollo titulado “Estimación de la producción de biogás en el Relleno Sanitario del cantón Pastaza, a través de modelos matemáticos, para su uso y aprovechamiento como fuente de energía eléctrica”, es absolutamente original, auténtico y personal.

En tal virtud y según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente, certifico libremente que los criterios y opiniones que constan en el Proyecto de titulación son de exclusiva responsabilidad de la autora; y que los resultados expuestos pertenecen a la Universidad Estatal Amazónica.

SANIPATÍN CEDEÑO CARLOS ANDRÉS
c.c. 160045954-7



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
DECANATO DE POSGRADO
FORMATO DP-UT-013B

**FORMATO DP-UT-013B: CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE
EVALUACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE TITULACIÓN**

EL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE TITULACIÓN

CERTIFICA QUE:

El presente trabajo ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA, A TRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS, PARA SU USO Y APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA bajo la responsabilidad del/la maestrante CARLOS ANDRÉS SANIPATÍN CEDEÑO, ha sido meticulosamente revisado, autorizando su presentación:

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

DR. REINALDO DEMESIO ALEMÁN PEREZ
PRESIDENTE DE TRIBUNAL EVALUADOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DR. SEGUNDO BENEDICTO VALLE RAMIREZ
MIEMBRO 1

MGS. SANDRA LUISA SORIA RE
MIEMBRO 2



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
DECANATO DE POSGRADO
FORMATO DP-UT-011

FORMATO DP-UT-011: AVAL DEL DIRECTOR DE TRABAJO TITULACIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL MENCIÓN EN SANEAMIENTO AMBIENTAL

COHORTE: I

FECHA ELABORACIÓN: 04/10/2022

INFORME FINAL Y AVAL

Quien suscribe, **PAÚL MARCELO MANOBANDA PINTO** portador de la cédula de identidad número: **1803229499**, en calidad de Director del trabajo de titulación denominado: **ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA, A TRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS, PARA SU USO Y APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, opción Proyecto de trabajo de titulación con componentes de investigación aplicada y/o desarrollo, a cargo del maestrante **CARLOS ANDRÉS SANIPATÍN CEDEÑO**, portador del número de cédula de identidad: **1600459547**, certifico haber acompañado y revisado el documento entregado a mi persona, considero que cumple con los objetivos planteados, los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución.

Por lo antes expuesto se avala el trabajo de titulación para que sea presentado para la sustentación correspondiente.

ELABORADO POR:

PAÚL MARCELO MANOBANDA PINTO
CI:1803229499

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
DECANATO DE POSGRADO
FORMATO DP-UT-013C

FORMATO DP-UT-013C: CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD EN EL SISTEMA ANTIPLAGIO

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD EN EL SISTEMA ANTIPLAGIO

Quien suscribe el presente MSc. Paúl Marcelo Manobanda Pinto con CI: 1803229499, certifica que el Proyecto final de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA, A TRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS, PARA SU USO Y APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA”** ha sido examinado a través del sistema Antiplagio URKUND y presenta un porcentaje de similitud del 5%.

En el cantón Pastaza, a los 04 días del mes de noviembre del 2022.



Firmado electrónicamente por:
**PAUL MARCELO
MANOBANDA PINTO**

MSc. Paúl Marcelo Manobanda Pinto
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

Incluir la primera hoja del reporte de similitud de la herramienta antiplagio.

Document Information

Analyzed document	ESTIMACIÓN_PRODUCCIÓN_BIOGÁS_RELLENO_SANITARIO_CANTÓN_PAS TAZA.pdf (D148490490)
Submitted	11/3/2022 3:58:00 AM
Submitted by	MANOBANDA PINTO PAUL MARCELO
Submitter email	pmanobanda@uea.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	pmanobanda.uea@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://rellenosanitarios.wordpress.com/ Fetched: 11/3/2022 3:59:00 AM	 1
SA	UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Práctica 5. Determinación de la producción de lixiviados y gas de un relleno sanitario.pdf Document Práctica 5. Determinación de la producción de lixiviados y gas de un relleno sanitario.pdf (D142595087) Submitted by: ra.cunguang@uea.edu.ec Receiver: ppenafiel.uea@analysis.arkund.com	 3
SA	UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Práctica 5. Determinación de la producción de lixiviados y gas de un relleno sanitario.pdf Document Práctica 5. Determinación de la producción de lixiviados y gas de un relleno sanitario.pdf (D142594245) Submitted by: jb.andyg@uea.edu.ec Receiver: ppenafiel.uea@analysis.arkund.com	 1
SA	UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / PROYECTO Victor-Robinson Urkund.docx Document PROYECTO Victor-Robinson Urkund.docx (D78373273) Submitted by: kdieguez@uea.edu.ec Receiver: kdieguez.uea@analysis.arkund.com	 2
SA	Tesis.docx Document Tesis.docx (D25791817)	 1
SA	Proyecto_de_investigación_Tatiana_Espinosa.docx Document Proyecto_de_investigación_Tatiana_Espinosa.docx (D144330164)	 1
SA	submission.docx Document submission.docx (D136646677)	 4

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la vida y la posibilidad de culminar esta etapa personal y profesional de mi andar.

A mis padres: Efraín y Meryury, por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y sacrificio, y sobre todo el amor por la familia.

A la compañera de mi vida: Jenniffer, por su presencia y apoyo incondicional.

A la Universidad Estatal Amazónica, al Decanato de Posgrados, a mis docentes, en especial al MSc. Paúl Manobanda, por creer en los profesionales amazónicos, por su guía y conocimientos compartidos.

A mis familiares y amigos, que, con sus consejos y palabras de aliento, hacen de mí una mejor persona.

A todos, ¡gracias!

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi padre y su memoria, a mi madre y su fortaleza, quienes nunca sueltan mi mano desde el lugar en el que se encuentren.

A mi amada familia: Jenniffer, Isaías y Lucas, quienes aportaron sacrificando su tiempo, nuestro tiempo, y así poder llegar a este momento.

Esto es de ustedes.

Carlos

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVE

Los rellenos sanitarios comprenden una fuente importante en la emisión de biogás a la atmósfera, que aporta a la emisión de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global, y sus consecuencias en el planeta. Varios estudios han determinado la factibilidad de este biogás para ser aprovechado de distintas maneras. La presente investigación permitió estimar la generación de biogás de una celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza, mediante el uso de modelos matemáticos diseñados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA), y modificado para las condiciones particulares del Ecuador, con los cuales se calculó la producción de biogás causada por la degradación de los desechos sólidos urbanos vertidos en la celda. Para lograr este objetivo se consideró el análisis detallado de los desechos depositados en el relleno sanitario desde el año 2 019 hasta el 2 024, año que se prevé el cierre de la misma, que en promedio asciende a unas 14 000 toneladas al año. Según los resultados conseguidos, se determinó que en el cantón Pastaza cada habitante genera 0,6 kg de desechos por día, lo cual permite proyectar que hasta el año del cierre de la celda del relleno sanitario se depositarán unas 87 758 toneladas de desechos. Con los valores calculados para los parámetros “tasa de generación de metano”, y “potencial de generación de metano”, específicos para cada modelo aplicado, el modelo LandGEM (US EPA) estimó una tasa mayor de generación de biogás que el modelo ecuatoriano, sin embargo, ambos modelos coinciden en que la producción de biogás llegará a su pico máximo un año después del cierre de la celda de disposición final, con 1 137 445,78 m³/año de biogás en el 2025 según LandGEM, y 976 784 m³/año según el modelo ecuatoriano, para luego descender en sus valores de generación, hasta el año 2 050, conforme al presente estudio. Sin embargo, se espera que con la producción de biogás y su recuperación estimada de 382 450,87 m³/año, se logre una potencia eléctrica de 86 kW, y poder aprovecharlo en la generación eléctrica a través de microturbinas, como mejor opción, debido al bajo flujo del biogás.

Palabras clave: biogás, modelo LandGEM, modelo ecuatoriano, relleno sanitario

ABSTRACT AND KEY WORD

Landfills are an important source of biogas emissions into the atmosphere, which contributes to the emission of greenhouse gases that cause global warming and its consequences on the planet. Several studies have determined the feasibility of using this biogas in different ways. The present research allowed estimating the generation of biogas from a final disposal cell of the landfill of Pastaza canton, by using mathematical models designed by the Environmental Protection Agency of the United States of America (US EPA), and modified for the particular conditions of Ecuador, with which the production of biogas caused by the degradation of urban solid waste dumped in the cell was calculated. To achieve this objective, a detailed analysis of the waste deposited in the landfill from 2009 to 2024, when the landfill is expected to be closed, which averages about 14,000 tons per year, was considered. According to the results obtained, it was determined that in the Pastaza canton each inhabitant generates 0.6 kg of waste per day, which makes it possible to project that until the year the landfill cell closes, some 87,758 tons of waste will be deposited. With the values calculated for the parameters "methane generation rate" and "methane generation potential", specific for each model applied, the LandGEM model (US EPA) estimated a higher rate of biogas generation than the Ecuadorian model, however, both models coincide in the fact that the biogas generation rate of the LandGEM model is higher than that of the Ecuadorian model, both models coincide in that biogas production will reach its maximum peak one year after the closure of the final disposal cell, with 1 137 445.78 m³/year of biogas in 2025 according to LandGEM, and 976 784 m³/year according to the Ecuadorian model, and then decrease in its generation values until 2050, according to the present study. However, it is expected that with the production of biogas and its estimated recovery of 382,450.87 m³/year, an electrical power of 86 kW will be achieved, and it will be possible to use it in the generation of electricity through microturbines, as the best option, due to the low flow of biogas.

Keywords: biogas, LandGEM, landfill

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	13
PROBLEMA CIENTÍFICO	14
HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	15
OBJETIVOS	15
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
Los desechos sólidos urbanos	16
Los rellenos sanitarios	16
Biogás de relleno sanitario.....	18
Modelos matemáticos para la estimación de producción de biogás	20
Modelo LandGEM	21
Modelo Ecuatoriano	28
Extracción y tratamiento del biogás.....	31
Generación de energía a partir del biogás.....	31
Estimación de la producción de energía eléctrica.....	33
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	35
Localización del área de estudio	35
Tipo de investigación.....	40
Métodos de investigación	40
Tratamiento de datos.....	41
Cantidad de desechos sólidos que se disponen en el relleno sanitario del cantón Pastaza.....	41
Cálculo de parámetros para el modelo LandGEM	43
Determinación de parámetros para el modelo ecuatoriano	45
Recursos humanos y materiales	48
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
Estimación de producción de biogás, modelo LandGEM.....	50
Estimación de producción de biogás, modelo ecuatoriano	53
Comparación de resultados	56
Caudal de biogás recuperable.....	57
Energía y potencia disponible	57
Conclusiones	59
Recomendaciones	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación por tipo de residuos y/o desechos sólidos	16
Tabla 2.	Composición gases y trazas en rellenos sanitarios.....	18
Tabla 3.	Valores para la Tasa de generación de metano (k).....	24
Tabla 4.	Velocidad de degradación de algunos materiales	24
Tabla 5.	Valores para la tasa de generación de metano.....	25
Tabla 6.	Valores para el Potencial de Generación de Metano (L_0)	26
Tabla 7.	Valores para el MCF	27
Tabla 8.	Valores para L_0 y k para el modelo ecuatoriano.....	30
Tabla 9.	Valores sugeridos de eficiencia de recolección de biogás para rellenos sanitarios en Ecuador ³⁰	
Tabla 10.	Información típica de tecnologías de aprovechamiento de biogás.....	32
Tabla 11.	Estimación de eficiencia de recuperación del biogás.....	33
Tabla 12.	Propiedades de combustión del metano y gas natural.....	34
Tabla 13.	Proporción de la generación de desechos sólidos del cantón Pastaza.....	39
Tabla 14.	Estimación de la población atendida con el servicio de recolección de desechos sólidos en el cantón Pastaza	40
Tabla 15.	Pesos por tipo de desechos recolectados en el mes de mayo de 2022	41
Tabla 16.	Pesos de desechos recolectados y dispuestos en la celda de disposición final activa del Relleno Sanitario del cantón Pastaza	42
Tabla 17.	Pesos de desechos dispuestos en la celda de disposición final activa del Relleno Sanitario del cantón Pastaza	43
Tabla 18.	Resultados de la estimación de biogás de los modelos LandGEM y ecuatoriano para el año de estudio	47
Tabla 19.	Determinación de la Producción per cápita de desechos sólidos	49
Tabla 20.	Cálculo del volumen total de desechos sólidos para la vida útil de la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza	49
Tabla 21.	Resultados de la estimación de producción de gas del relleno sanitario del cantón Pastaza, modelo LandGEM	51
Tabla 22.	Resultados de la estimación de producción de gas del relleno sanitario del cantón Pastaza, modelo ecuatoriano.....	54
Tabla 23.	Características de Microturbinas Capstone	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de un relleno sanitario	17
Figura 2. Estructura de un pozo de venteo o chimenea de un relleno sanitario	18
Figura 3. Generación de biogás después de la eliminación de desechos.....	19
Figura 4. Presentación de la hoja de cálculo LandGEM	22
Figura 5. Interfaz de la hoja de cálculo LandGEM	22
Figura 6. Características del relleno sanitario.....	23
Figura 7. Parámetros para el cálculo de generación de biogás.....	23
Figura 8. Presentación de la hoja de cálculo Modelo de Biogás de Ecuador	29
Figura 9. Interfaz de la hoja de cálculo Modelo de Biogás de Ecuador	29
Figura 10. Tratamiento de biogás según el equipo electrogénico	32
Figura 11. Ubicación del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza	36
Figura 12. Fotografía aérea del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza.....	37
Figura 13. Actividades del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza.....	38
Figura 14. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo LandGEM 45	
Figura 15. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo Ecuatoriano.....	46
Figura 16. Comparativa de las emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según los Modelos LandGEM y ecuatoriano	46
Figura 17. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo LandGEM	50
Figura 18. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo Ecuatoriano.....	53
Figura 19. Generación de biogás según los modelos aplicados.....	56
Figura 20. Sistema de Cogeneración con 3 Microturbinas Capstone C65, Hotel City Express, Ciudad de México.....	58

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La disposición de la basura generada en ciudades y centros poblados se ha convertido en tema crítico a nivel mundial, debido a que los desechos que se producen generan costos sociales y económicos significativos a los gobiernos, y altos costos ambientales a la población y al planeta. Son varias las técnicas que permiten la eliminación de los residuos sólidos municipales; sin embargo, pocas ayudan a tratarlos y disponerlos adecuadamente (Arvizu Fernández et al., 2006).

Según Kaza et al. (2018), la región de América Latina y el Caribe (ALC) generó cerca de 231 millones de toneladas de residuos en el año 2016, a un promedio de 0,99 kilogramos por persona, cada día, región en la que los sistemas de eliminación o disposición final de estos desechos son variados, de acuerdo al nivel de ingresos. En ALC predomina como método de eliminación de residuos los botaderos a cielo abierto, los cuales están íntimamente relacionados con temas de salud y medio ambiente, y los rellenos sanitarios (Hettiarachchi et al., 2018).

En Ecuador, los rellenos sanitarios se han convertido en la técnica más utilizada para disponer la basura. Esta técnica se basa en la disposición de capas de basura compactadas sobre un suelo previamente impermeabilizado, y recubiertas por capas de material pétreo (Ulloa, 2006). Para el año 2020, según cifras del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2021), en el Ecuador se recolectaron 12 613 toneladas de residuos y desechos por día, los cuales se suman a los millones de toneladas confinadas ya bajo suelo, que están emitiendo gases a la atmósfera.

Los principales gases que se emiten desde las celdas de disposición final de los rellenos sanitarios son el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), considerados como gases de efecto invernadero (GEI), cuyo potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) están en el orden de 21 y 310, respectivamente, conforme lo estableció el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) (Houghton et al., 1998).

Gases como el CH_4 , N_2O y CO_2 se producen a partir de la biodegradación aeróbica y anaeróbica de los residuos sólidos urbanos. El metano producido en los vertederos es la más grande fuente de gases de efecto invernadero, representando entre el 1 y 2 % de las emisiones

totales de GEI. La segunda fuente más importante son las emisiones de metano y óxido nítrico producidos en los sistemas de tratamientos de lixiviados (Zhang et al., 2019).

El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2012 de Ecuador reportó que las emisiones del país ascienden a 80 627,16 Gg de CO₂ eq, de los cuales el sector Residuos representa el 4,19% de las emisiones del país (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

En este inventario se contabilizaron emisiones de metano (CH₄) en el orden de 11 724,12 Gg de CO₂ eq, en donde el sector Residuos aportó con el 26,33% del total de emisiones de este gas (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

Como lo señalan Arvizu Fernández et al. (2006), la posibilidad técnica de convertir estos gases (biogás) en electricidad está plenamente probada, la tecnología para ello existe comercialmente, pero la práctica de aplicarla en un determinado entorno socio-político-económico no está difundida en nuestro país.

El relleno sanitario del cantón Pastaza, recibe aproximadamente entre 40 y 47 toneladas diarias de desechos comunes, y son aislados y confinados en una celda profunda, y recubiertos con material pétreo (Cuichan et al., 2020). Los gases producidos en la descomposición de los desechos no son aprovechados, y únicamente se realiza la destrucción térmica controlada, contribuyendo al incremento de las emisiones de estos GEI.

El uso y aprovechamiento de este biogás como fuente de energía eléctrica, aportaría en al menos 2 aspectos desde el punto de vista ambiental a la mitigación de la generación de GEI: una a través de la captura de metano y la segunda por la sustitución de combustibles fósiles para la generación de electricidad (Blanco et al., 2017), lo que constituye un control en las emisiones de gases de efecto invernadero, y su eventual contribución a la disminución de los efectos del cambio climático y el calentamiento global.

PROBLEMA CIENTÍFICO

El relleno sanitario del cantón Pastaza, administrado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza, ha venido operando por más de 20 años, y paulatinamente ha mejorado la gestión de los residuos sólidos. No obstante, no se ha

contemplado alternativas tecnológicas para el tratamiento de sus emisiones y el aprovechamiento de los gases que se generan.

Ante esto, y considerando que las instalaciones de este centro, requiere energía eléctrica para el desarrollo de sus actividades administrativas y operativas se plantea la pregunta: ¿La tasa de generación de biogás producido en el relleno sanitario del cantón Pastaza, es suficiente para generar energía eléctrica, y autoabastecer de este servicio a sus instalaciones?

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La estimación de la generación de biogás en el relleno sanitario del cantón Pastaza, a través de modelos matemáticos, permitirá determinar que se produce suficiente biogás para generar energía eléctrica que permita satisfacer la demanda de este servicio en las instalaciones del mismo relleno sanitario.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estimar el potencial de aprovechamiento energético del biogás producido en el relleno sanitario del cantón Pastaza, a través de modelos matemáticos, para su utilización como suministro de energía eléctrica en las instalaciones del relleno sanitario del cantón Pastaza.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la cantidad de desechos sólidos que se disponen en el relleno sanitario del cantón Pastaza.
- Definir los parámetros a ser utilizados para la estimación de la producción y recuperación de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza.
- Valorar la producción de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza, y la energía eléctrica disponible para su aprovechamiento.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los desechos sólidos urbanos

Según Mosquera Espinosa y Caro Moreno (2019) cuando se habla de residuos y/o desechos, nos referimos a cualquier materia o sustancia sobrante de un producto que se ha transformado como consecuencia del consumo o uso en las industrias, el comercio e incluso en las labores domésticas, y que el propietario o consumidor arroja o entrega. Estos residuos se pueden utilizar de diversas formas modificando el material para crear, en algunos casos, un nuevo bien económico.

Estos se dividen en dos categorías, como se muestra en la Tabla 1:

- a) Residuos y/o desechos peligrosos: todos aquellos con características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, bio-infecciosas.
- b) Residuos y/o desechos no peligrosos: se dividen en tres categorías.

Tabla 1.

Clasificación por tipo de residuos y/o desechos sólidos

Categoría		Criterio
Residuos y/o desechos peligrosos		Corrosivo, Reactivo, Tóxico, Inflamable, Bioinfeccioso
Residuos y/o desechos no peligrosos	Aprovechables	Papel, cartón, vidrio, etc.
	No aprovechables	
	Biodegradables	Orgánicos

Los rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es un mecanismo de disposición final de residuos y/o desechos sólidos que usa bases de la ingeniería para aislar la basura en áreas estrechas, recubrirlos con capas de tierra y compactarlos para disminuir su volumen (Anónimo, 2014).

Para Jaramillo (2002) “En la actualidad, el relleno sanitario moderno se refiere a una instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con

elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control”.

Un relleno sanitario debe cumplir con ciertos requisitos técnicos que garanticen su funcionamiento ambientalmente seguro al momento de recibir los desechos sólidos, entre los que destacan el control de aguas superficiales y gestión de lixiviados, la protección del suelo y de las aguas, combinando una barrera geológica y un revestimiento artificial, y el control de gases (Röben, 2002). La Figura 1 muestra una representación general de un relleno sanitario con sus requisitos y funcionalidades.

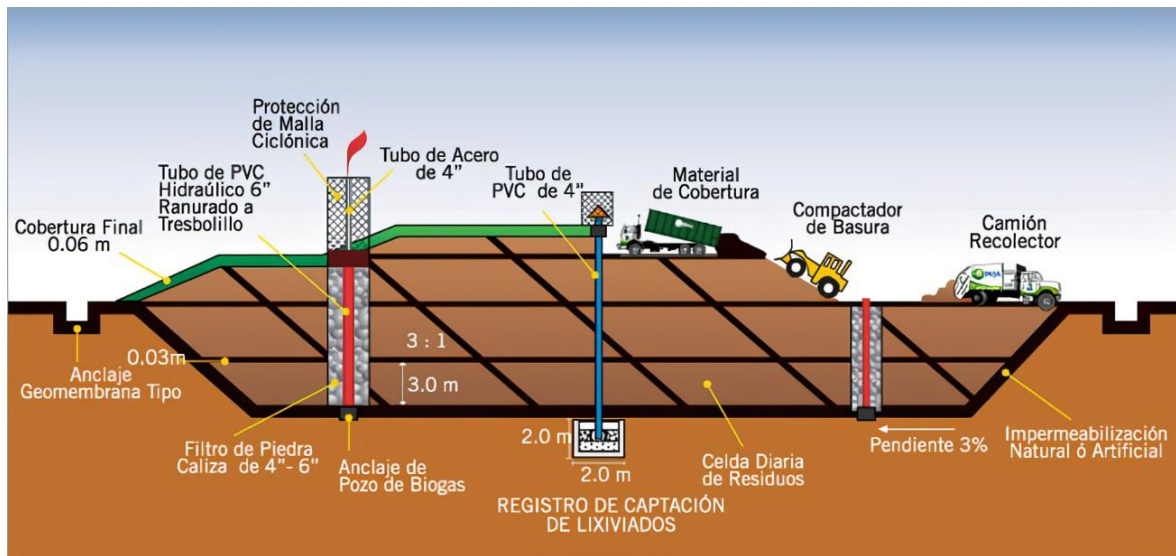


Figura 1. Estructura general de un relleno sanitario (Tito, 2021)

La liberación de los gases se realiza de manera localizada, a través de pozos de venteo, o chimeneas, representados en la Figura 2, las cuales están instaladas en varios puntos del relleno sanitario y facilitan la fuga del biogás a la atmósfera, lo que favorece para la eficiencia en el drenaje de líquidos y gases (Jaramillo, 2002).

Generalmente los gases son incinerados en quemadores localizados al final de los pozos (Guevara Torres, 2021).

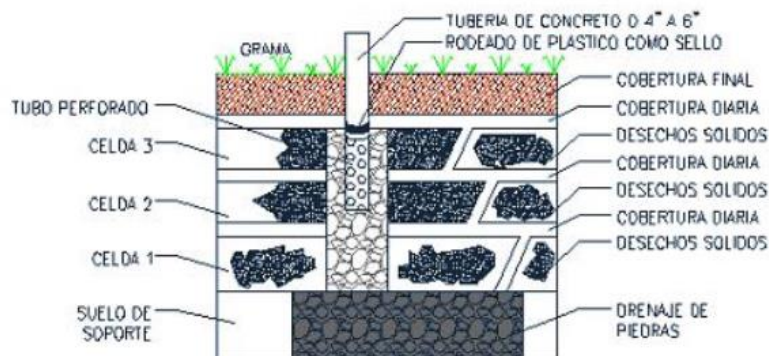


Figura 2. Estructura de un pozo de venteo o chimenea de un relleno sanitario (Crisanto, 2013)

Biogás de relleno sanitario

El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros compuestos producidos por microorganismos que degradan la materia orgánica de origen vegetal o animal en ausencia de aire, lo que se conoce como digestión anaerobia (Arellano et al., 2017). Su composición está caracterizada principalmente por metano (CH₄) en un promedio del 50%, dióxido de carbono (CO₂) en una proporción del 42%, y otros gases en un porcentaje mínimo (Terraza & Willumsen, 2009) (Tabla 2). Algunos de estos gases son considerados como Gases de Efecto Invernadero (GEI) que contribuyen con el fenómeno del Calentamiento Global.

Tabla 2.

Composición gases y trazas en rellenos sanitarios (Terraza & Willumsen, 2009)

Gas	Nomenclatura química	Variación	Promedio
Metano (combustible)	CH ₄	40-60 %	50%
Dióxido de carbono	CO ₂	25-50 %	42%
Nitrógeno	N ₂	3-15%	7%
Oxígeno	O ₂	0-4%	1%
Hidrógeno (combustible)	H ₂	0-1%	0,5%
Argón	Ar	0-0,4%	0,1%
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0-200 ppm	30 ppm
Cloro total	Cl	0-200 ppm	20 ppm
Flúor total	F	0-100 ppm	20 ppm

La generación de gases de relleno sanitario es un proceso biológico, con una importante actividad microbiana. El biogás se genera como producto de la biodegradación del carbono orgánico en los desechos. Aproximadamente se produce 1,87 m³ de biogás por kilogramo de carbono orgánico degradado (con un contenido del 50% de CH₄) (Terraiza & Willumsen, 2009).

La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América (US EPA, 2021) sostiene que la materia orgánica de los residuos se descompone en cuatro fases principales (Figura 3):

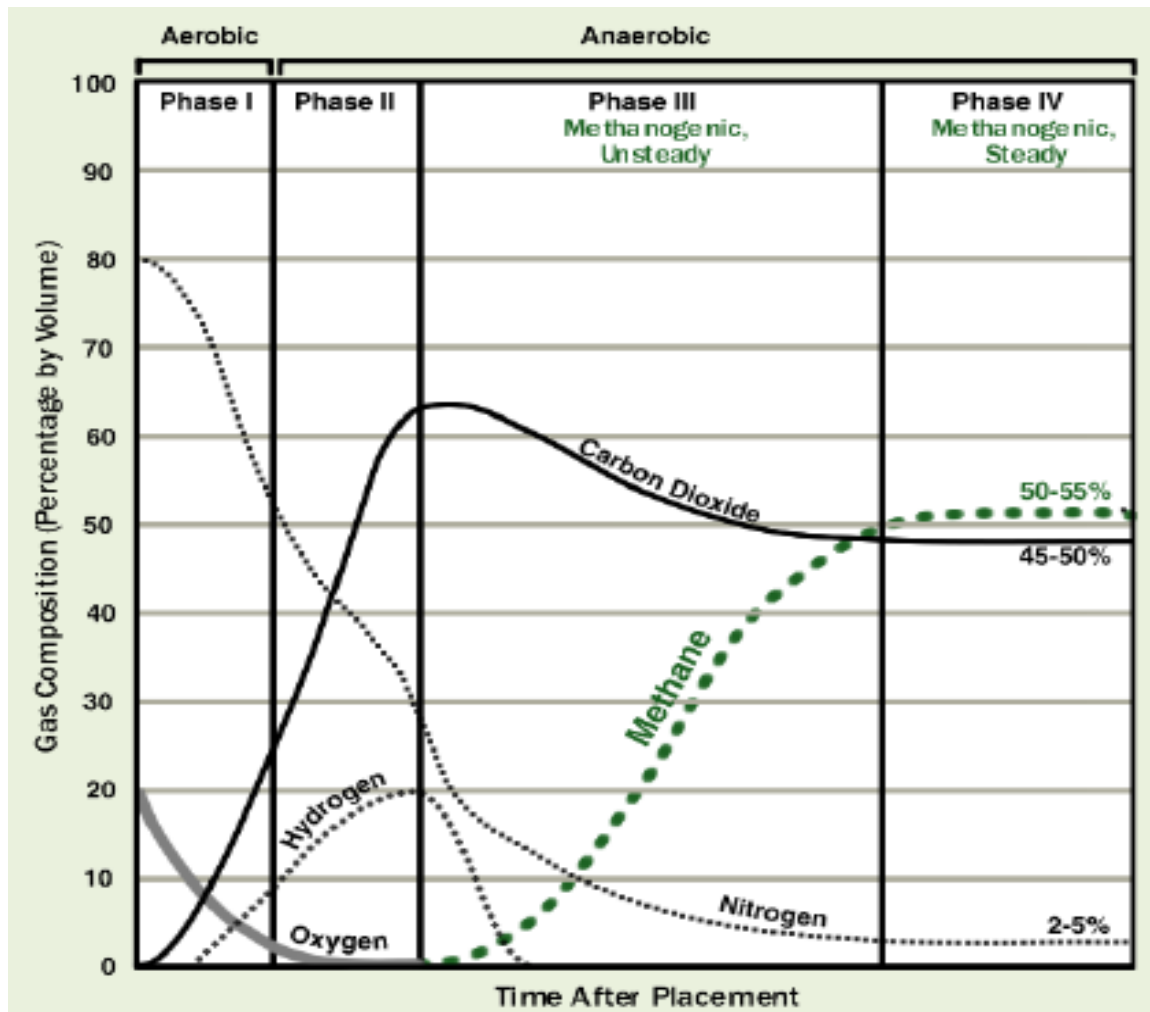


Figura 3. Generación de biogás después de la eliminación de desechos (US EPA, 2021)

Fase I. Descomposición Aeróbica – Las bacterias aeróbicas consumen oxígeno mientras descomponen las largas cadenas moleculares de carbohidratos complejos, proteínas y lípidos que componen los desechos orgánicos. El principal subproducto de este proceso es el dióxido de carbono. La fase I continúa hasta que se agota el oxígeno disponible.

Fase II. Descomposición Anaeróbica no-metanogénica – Utilizando un proceso anaeróbico las bacterias convierten los compuestos creados por las bacterias aeróbicas en ácidos acético, láctico y fórmico y alcoholes como el metanol y el etanol. A medida que los ácidos se mezclan con la humedad presente en el vertedero y se consume nitrógeno, se producen dióxido de carbono e hidrógeno.

Fase III. Descomposición Anaeróbica Metanogénica, inestable – Las bacterias anaeróbicas consumen los ácidos orgánicos producidos en la Fase II y forman acetato, un ácido orgánico. Este proceso hace que el vertedero se convierta en un entorno más neutral en el que se establecen las bacterias productoras de metano al consumir el dióxido de carbono y el acetato.

Fase IV. Descomposición Anaeróbica Metanogénica, estable – La composición y las tasas de producción de biogás se mantienen relativamente constantes. El biogás generalmente contiene aproximadamente 50-55 % de metano por volumen, 45-50 % de dióxido de carbono y 2-5 % de otros gases, como sulfuros. El biogás se produce a un ritmo estable en la Fase IV, normalmente durante unos 20 años.

La producción de biogás varía considerablemente de una planta a otra, dependiendo de las particularidades de cada vertedero o relleno sanitario, la tasa de producción (m^3 de biogás / Ton x h o año) depende de los siguientes parámetros (Terraiza & Willumsen, 2009):

1. Temperatura del vertedero
2. Contenido de humedad de los residuos
3. Composición de los residuos
4. Edad de los residuos
5. Estructura de los residuos
6. Cobertura del vertedero

Modelos matemáticos para la estimación de producción de biogás

La generación de biogás en los vertederos o rellenos sanitarios es un aspecto que no requiere discusión, pues la degradación de los compuestos orgánicos de los desechos sólidos lo favorece. Esto hace que sea necesario conocer la cantidad de gas que se genera, ya sea para fines estadísticos, o de aprovechamiento energético para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Zhang et al., 2019).

Modelo LandGEM

Para Alexander et al. (2005), el Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) es una herramienta de estimación automatizada, desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), que puede ser utilizada con el fin de estimar las tasas de emisión del biogás total, metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos distintos del metano y contaminantes individuales del aire de los vertederos de residuos sólidos municipales.

El modelo LandGEM está basada en la ecuación (1), y fue diseñado con valores estandarizados para las variables k y L_0 , basados en la composición promedio de los desechos en Estados Unidos, por lo que no es aplicable mundialmente, a menos que estos parámetros se calculen con datos propios del sitio (García Alcalde, 2019).

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

En donde:

Q_{CH_4} : Generación anual de metano en el año n calculado, [m³/año].

i : Incremento de tiempo de 1 año.

j : Incremento de tiempo de 0,1 año.

n : Diferencia entre año del cálculo y año que empieza a recibir residuos.

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

L_0 : Potencial de generación de metano, [m³ de CH₄/ ton de RSU].

M_i : Cantidad de residuos dispuestos en el año i [ton].

t_{ij} : Año de la “ j ” sección de los residuos acumulados en el año “ i ”.



Figura 4. Presentación de la hoja de cálculo LandGEM

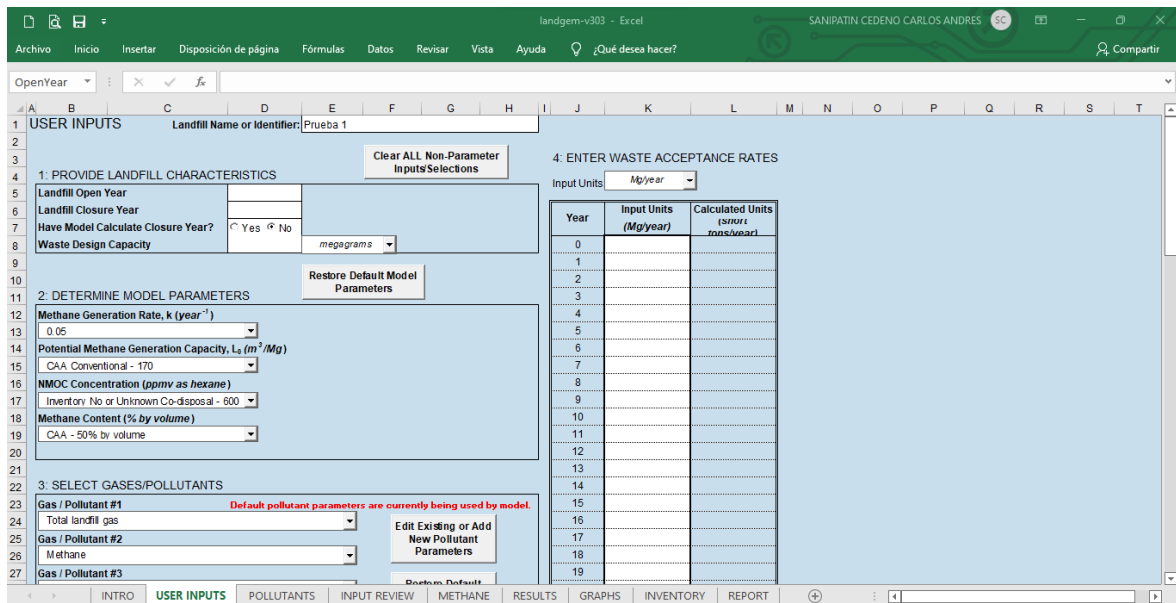


Figura 5. Interfaz de la hoja de cálculo LandGEM

Para el desarrollo de este modelo se toma en cuenta los siguientes datos del relleno sanitario:

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections
Landfill Open Year	<input type="text"/>	
Landfill Closure Year	<input type="text"/>	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity	<input type="text" value="megagrams"/>	

Figura 6. Características del relleno sanitario

Donde:

- Año de apertura del relleno sanitario
- Año de cierre del relleno sanitario
- ¿Cuenta con un año de cierre?
- Capacidad de desechos de diseño

Los parámetros a considerar para definir el potencial de generación de biogás son:

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS	Restore Default Model Parameters
Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)	<input type="text" value="0.05"/>
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)	<input type="text" value="CAA Conventional - 170"/>
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)	<input type="text" value="Inventory No or Unknown Co-disposal - 600"/>
Methane Content ($\%$ by volume)	<input type="text" value="CAA - 50% by volume"/>

Figura 7. Parámetros para el cálculo de generación de biogás

Donde:

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

L_0 : Potencial de generación de metano, [m^3 de CH_4 / ton de RSU].

NMOC: Concentración de compuestos orgánicos no metanogénicos.

Methane Content: Contenido de metano del biogás

***k*: Tasa de generación de metano**

La tasa de generación de metano k , describe el índice con el cual los residuos sólidos se degradan y producen metano (Olmedo & Curillo, 2019), con la premisa que mientras mayor sea el valor k , mayor será la rapidez con la que los residuos sólidos se degraden, y esta decae con el tiempo (Alexander et al., 2005).

Los valores utilizados por LandGEM se muestran en la Tabla 3, y están definidos por la US EPA y CAA (Clean Air Act).

Tabla 3.

Valores para la Tasa de generación de metano (k) (Alexander et al., 2005)

Tipo predeterminado	Tipo de relleno sanitario	k
CAA	Convencional	0,05 (predeterminado)
CAA	Zona Árida	0,02
Inventario	Convencional	0,04
Inventario	Zona Árida	0,02
Inventario	Húmedo (biorreactor)	0,7

Para el Ecuador es necesario calcular el valor k , en función de la precipitación media anual, pH, temperatura, tipo de degradación y composición de los desechos sólidos. Estos dos últimos se relacionan conforme la Tabla 4.

Tabla 4.

Velocidad de degradación de algunos materiales (Olmedo & Curillo, 2019)

Tipo de degradación	Materiales
Muy lenta	Madera, elastómeros, restos de piel y hueso
Moderadamente lenta	Papel, cartón y textiles
Moderadamente rápida	Papel higiénico, residuos vegetales, poda de jardines o parques
Rápida	Residuos alimenticios, orgánicos y un 20% de pañales

Tabla 5.*Valores para la tasa de generación de metano (Olmedo & Curillo, 2019)*

Tipo de clima	Precipitación media anual (mm/año)	Tipo de degradación			
		Muy lenta	Moderadamente lenta	Moderadamente rápida	Rápida
Seco	500	0,01	0,02	0,05	0,1
Moderadamente seco	500 - 999	0,018	0,036	0,09	0,18
Moderadamente húmedo	1 000 – 1 499	0,024	0,048	0,12	0,26
Húmedo	1 500 – 1 999	0,03	0,06	0,15	0,34
Excesivamente húmedo	> 2 000	0,035	0,07	0,17	0,4

A partir de la Tabla 5 se puede calcular el valor de la tasa de generación de metano k , según la ubicación geográfica, precipitación media anual y tipo de degradación de los desechos sólidos (Guevara Torres, 2021), con la ecuación (2):

$$k = \frac{\sum \text{valores de tipo de degradación}}{N} \quad (2)$$

En donde:

k : Tasa de generación de metano, [1/año]

N : Número de valores que se tomen

L₀: Tasa de generación de metano

Se define como la capacidad potencial de generación de metano (Ambuludi-Paredes et al., 2021), y depende del tipo y composición de los desechos sólidos dispuestos en el relleno sanitario (Alexander et al., 2005).

Los valores que utiliza LandGEM son los que se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6.*Valores para el Potencial de Generación de Metano (L0) (Alexander et al., 2005)*

Tipo de emisiones	Tipo de relleno sanitario	L₀
CAA	Convencional	170 (predeterminado)
CAA	Zona Árida	170
Inventario	Convencional	100
Inventario	Zona Árida	100
Inventario	Húmedo (biorreactor)	96

Al igual que el valor de la tasa de generación de metano, el valor para la estimación del potencial de generación de metano, en Ecuador, debe ser calculado en función de las características propias del sitio donde se encuentre el relleno sanitario en estudio. Según el IPCC, L₀ se puede estimar a partir de la ecuación (3):

$$L_0 = 1000 * MCF * DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12} \quad (3)$$

En donde:

L₀: Potencial de generación de metano, [m³/Tn]

MCF: Factor de corrección de metano

DOC: Carbono orgánico degradable

DOC_F: Fracción de Carbono orgánico degradable

F: Fracción de metano contenido en biogás, se asume típicamente 0,5

El factor $\frac{16}{12}$ corresponde a una constante estequiométrica (cociente de pesos moleculares entre el CH₄ y C)

El factor de corrección de metano (MCF) está relacionado al tipo de manejo de los residuos sólidos y a las características de los rellenos sanitarios, así:

Tabla 7.*Valores para el MCF (Olmedo & Curillo, 2019)*

Tipo de relleno sanitario	Definición	MCF
Gestión anaeróbica	Sitio cumple con requisitos técnicos y con colocación controlada de los desechos	1
Gestión semi-aeróbica	Cumple con material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviados, estanques de regulación y ventilación de gases	0,5
No gestionado profundo (>5m)	No cumple con requisitos técnicos. Se ubica cerca de aguas fluviales superficiales	0,8
No gestionado poco profundo (<5m)	No cumple con requisitos técnicos.	0,4
Relleno sanitario no categorizado	No se puede categorizar	0,6

El factor de carbono orgánico degradable (DCO) se refiere a la composición de los desechos orgánicos, y se lo calcula con la ecuación (4):

$$DOC = 0,4 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,3 * D \quad (4)$$

En donde:

A: Porcentaje de residuos que conforman papel, cartón y textiles.

B: Porcentaje de residuos de jardinería, orgánicos (excluidos los alimentos).

C: Porcentaje de residuos de alimentos.

D: Porcentaje de residuos de madera y paja.

La fracción de carbono orgánico biodegradable (DOC_f) es el factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás (Ecuación 5).

$$DOC_f = 0,014 * T + 0,28 \quad (5)$$

En donde:

T: Temperatura del relleno sanitario (°C)

Modelo Ecuatoriano

El modelo ecuatoriano de estimación biogás es una variación del modelo mexicano, desarrollado por SCS Engineers en correspondencia con la U.S. EPA en el año 2003 (Guevara Torres, 2021), a través de la ecuación (6) para estimar la cantidad de biogás.

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\%vol} * k * M * L_0 * e^{-k(t-t_{lag})} \quad (6)$$

En donde:

Q : Cantidad total de biogás generado, [m³/año].

n : Número total de años modelado.

$\%vol$: Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

M : Cantidad de residuos dispuestos en el año i [ton].

L_0 : Potencial de generación de metano, [m³ de CH₄/ ton de RSU].

t : Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de desechos.

t_{lag} : Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.



Figura 8. Presentación de la hoja de cálculo Modelo de Biogás de Ecuador

Año	Toneladas Disponibles (ton/año)	Toneladas Acumuladas (ton)	Toneladas Masa Disponibles	Eficiencia del Sistema de Recolección	Recuperación Actual (m³/h)
2003	248 000	240000	65%	80%	
2004	480 000	720000	65%	80%	
2005	500 000	1220000	65%	80%	
2006	510 000	1730000	65%	80%	
2007	515 100	2245100	65%	80%	
2008	520 251	2765351	65%	80%	
2009	525 454	3290805	65%	80%	
2010	530 708	3821513	65%	80%	
2011	536 015	4357528	65%	80%	
2012	541 375	4898903	65%	80%	
2013	546 789	5445692	65%	80%	
2014	552 257	5997949	65%	80%	
2015	557 778	6555728	65%	80%	
2016	563 357	7119085	65%	80%	
2017	568 991	7688076	65%	80%	

Precipitación (mm/año)	k	L0	L
0-249	0.04	0.043	60
250-499	0.05	0.053	80
500-999	0.065	0.69	84
1000 - 1999 o Saturado	0.08	0.085	84
2000+ o Saturado	0.08	0.085	84

Figura 9. Interfaz de la hoja de cálculo Modelo de Biogás de Ecuador

Los valores para k y L_0 , fueron obtenidos de ensayos de bombeo de gas de Pichacay y Las Iguanas en 2007, y para el modelo ecuatoriano de estimación de biogás vienen dados por defecto:

Tabla 8.*Valores para L_0 y k para el modelo ecuatoriano (Siliezar & Urquizo, 2009)*

Precipitaciones (mm/año)	k		L_0	
	Contenido medio de residuos de comida ($\leq 50\%$)	Contenido alto de residuos de comida ($\geq 60\%$)	Contenido medio de residuos de comida ($\leq 50\%$)	Contenido alto de residuos de comida ($\geq 60\%$)
0	0,04	0,043	60	62
250	0,05	0,053	80	83
500	0,065	0,069	84	87
1 000 / Saturado	0,08	0,085	84	87
2 000 / Saturado	0,08	0,085	84	87

La eficiencia de la recolección de biogás está condicionada a la estructura del vertedero y al nivel de lixiviados dentro del mismo, así como al diseño de los pozos de recolección. Para el modelo ecuatoriano se demostró que, a pesar de los altos niveles de lixiviados en los desechos, se podía lograr una alta eficiencia de recolección de biogás (Siliezar & Urquizo, 2009).

Tabla 9.*Valores sugeridos de eficiencia de recolección de biogás para rellenos sanitarios en Ecuador*

Técnica de recolección	Capa de cobertura	
	Arcilla saturada / Geomembrana	Arcilla no saturada
Pozos verticales de gas perforados o colectores horizontales	80 %	70%
Pozos de venteo pasivos convertidos / modificados (existentes)	60 %	40 %

Extracción y tratamiento del biogás

Según Guevara Torres, (2021), los proyectos de aprovechamiento energético de biogás de rellenos sanitarios se apoyan en sistemas de extracción de biogás, que permiten dirigir el biogás a un generador de energía, previo a un proceso de tratamiento, limpieza y elevación del poder calorífico del metano. Los sistemas para la extracción del biogás pueden ser pasivos o activos, lo cual marca la diferencia en la eficiencia de extracción.

Los sistemas pasivos son los más utilizados por sus bajos costos de implementación, aunque esto repercute en su efectividad. Los sistemas activos de extracción utilizan equipos que permiten controlar el flujo del biogás del interior del vertedero, y son los más recomendables para efectos de aprovechamiento energético.

Por otro lado, los procesos de tratamiento del biogás buscan purificarlo previo a su aprovechamiento energético, eliminando excesos de humedad, impurezas y removiendo CO₂, siloxanos y sulfurados (Asensio et al., 2019), mediante adsorción, absorción, separación por membrana y/o métodos biológicos (Crisanto, 2013).

Con esto se consigue elevar el poder calorífico, y consecuentemente, garantiza el rendimiento de la explotación energética. Posterior a la extracción y purificación del biogás, este puede ser utilizado en la generación de energía; la proporción de CH₄ contenido en el biogás determinará su uso en la producción energética (Guevara Torres, 2021).

Generación de energía a partir del biogás

El caudal de biogás generado puede ser consumido como combustible, en función del contenido de metano que este posea, siendo lo ideal, una generación mayor al 40% del gas (Crisanto, 2013). Esto servirá, además, para elegir el elemento generador.

Las tecnologías más frecuentes en la generación de energía eléctrica a partir de biogás son los motores de combustión interna (MCI), turbinas y microturbinas (Olmedo & Curillo, 2019). En la Tabla 10 se señalan las diferencias entre estas tecnologías que aprovechan el biogás como fuente de energía.

Tabla 10.

Información típica de tecnologías de aprovechamiento de biogás (Romo Millares et al., 2012); (Blanco et al., 2017)

Tecnología	Rango típico de flujos (m ³ /min)	Tamaño sugerido de la planta	Eficiencia eléctrica neta
Motor de combustión interna	8 - 30	800 KW – 3 MW	25% - 35%
Turbinas de gas	> 40	3 MW – 5 MW	20% - 28%
Microturbinas de gas	< 8	30 KW – 250 KW	25% - 30%

Las microturbinas se caracterizan por requerir menores flujos de gas que los motores de combustión interna, se puede usar biogás con un porcentaje de metano más bajo (35%), sus emisiones de óxidos de nitrógeno son bajas, su interconexión es relativamente fácil debido a la menor capacidad de generación, y permiten la posibilidad de agregar y eliminar unidades (US EPA, 2021).

En la Figura 10 se distingue el tipo de generador eléctrico que se puede utilizar, partiendo del tipo de tratamiento que se le da al biogás

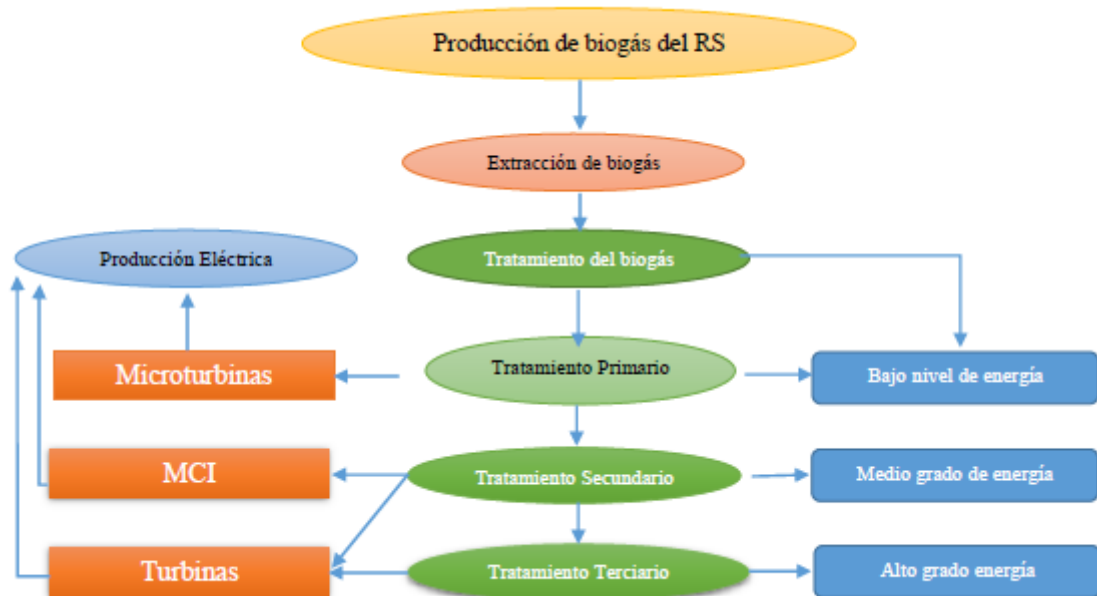


Figura 10. Tratamiento de biogás según el equipo electrogénico (Olmedo & Curillo, 2019)

Estimación de la producción de energía eléctrica

El caudal del biogás lo facilitan los modelos matemáticos de estimación de biogás o de alguna medición in situ, con el fin de precisar el total de metano por hora y con la que operará el equipo electrógeno (Garcia Alcalde, 2019).

El caudal de biogás recuperable final obtenido después de las etapas de extracción se calcula mediante la ecuación (7).

$$Q_{b,r} = \gamma * Q_{biogás} \quad (7)$$

En donde:

$Q_{b,r}$: Biogás recuperable [m³/año].

γ : Eficiencia de recuperación de biogás.

$Q_{biogás}$: Caudal de biogás generado en el relleno sanitario.

La eficiencia de recuperación de biogás se basará en el diseño, sistema de extracción del biogás y características del relleno sanitario:

Tabla 11.

Estimación de eficiencia de recuperación del biogás

Eficiencia de recuperación	Estimación de eficiencia %
Baja	30 – 50
Media	60 – 80
Alta	80 – 95

El cálculo de la energía eléctrica que podría brindar el relleno sanitario de estudio se lo hace bajo la ecuación (8), dicha ecuación considera la transformación del biogás en forma de energía útil, en calor y en electricidad (Olmedo & Curillo, 2019).

$$E. disp = Q_{b,r} * m * PCS_{metano} * \eta_e \quad (8)$$

En donde:

E_{disp} : Energía eléctrica disponible [kWh/año].

$Q_{b,r}$: Biogás recuperable [m³/año].

m : Fracción de metano en el biogás.

PCS_{metano} : Poder calorífico superior del metano, [kWh/m³].

η_e : Eficiencia eléctrica del grupo electrógeno (%).

Con la premisa que el CH₄ será el combustible que liberará energía, se exponen algunas propiedades de combustión del metano y del gas natural (Guevara Torres, 2021):

Tabla 12.

Propiedades de combustión del metano y gas natural

Propiedad	Metano	Gas natural
Densidad	0,67 kg/m ³	0,828 kg/m ³
Porcentaje máximo de CO ₂	9,506%	12,06%
Poder calorífico superior volumétrico	37,5 MJ/m ³	43,12 MJ/m ³
Poder calorífico inferior volumétrico	33,7 MJ/m ³	39 MJ/m ³
Límite inferior de inflamabilidad		5
Límite superior de inflamabilidad		15

El poder calorífico del biogás dependerá del tratamiento previo que se le dé al biogás.

Finalmente, la potencia del elemento generador puede ser determinada a partir de la ecuación (9):

$$P_{E.G} = \frac{E_{disp}}{8760 \text{ horas} * f.p} \quad (9)$$

En donde:

$P_{E.G}$: Potencia del elemento generador [kWh/año].

$f.p$: Factor de planta (80% – 90%)

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El relleno sanitario del cantón Pastaza está ubicado en la parroquia Diez de Agosto del cantón y provincia de Pastaza, a la altura del kilómetro 3 de la vía Puyo – Arajuno, en un predio de 40 hectáreas, de propiedad del Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Pastaza, a unos 6 kilómetros de la cabecera parroquial, y 5 km de la ciudad de Puyo, capital de la provincia (Figura 11).

Este sitio de disposición final de desechos sólidos ha venido funcionando de manera técnica, aproximadamente, desde al año 2 000, y cuenta con varias celdas de disposición final que ya han sido cerradas, es decir, han cumplido con su cometido de recoger los residuos sólidos del cantón Pastaza, hasta cubrir el volumen para el cual fueron diseñadas.

El sitio donde se implanta la zona de estudio se caracteriza por su ecosistema de bosque siempreverde premontano del norte de la cordillera de los Andes, y su clima tropical muy húmedo. La temperatura media anual es de 26°C (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza [GADMP], 2020), y la precipitación anual registra un promedio de 4 600 mm.

En la actualidad, aproximadamente 20 hectáreas están ocupadas por varias áreas operativas del relleno sanitario: entre celdas de desechos cerradas y operativas, planta de tratamiento de lixiviados, cobertizo, albergue canino y áreas administrativas, distribuidas como se observa en la Figura 12. Cuichán (2019) señala que el relleno sanitario del cantón Pastaza recibe entre 40 y 47 toneladas diarias de desechos sólidos urbanos, que son recolectadas de la zona urbana, así como de las cabeceras parroquiales que cuentan con acceso terrestre.

La celda activa que recibe los desechos comunes del cantón, es una estructura tipo zanja, de 80 m de ancho, 135 m de largo, y una profundidad de 7 m. Esta celda inició su operación en enero de 2019 y se prevé que tenga una vida útil de 4 años (Cuichan et al., 2020).

Esta celda está separada del terreno natural a través de una geomembrana que impide el contacto de los desechos con el suelo. Tiene un diseño para la evacuación de lixiviados que aplica la técnica de “espina de pescado”, y cunetas perimetrales. Asimismo, cuenta con un sistema de extracción pasiva de los gases que se generan en la descomposición de los desechos, por medio de pozos de venteo.

RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Mapa de ubicación

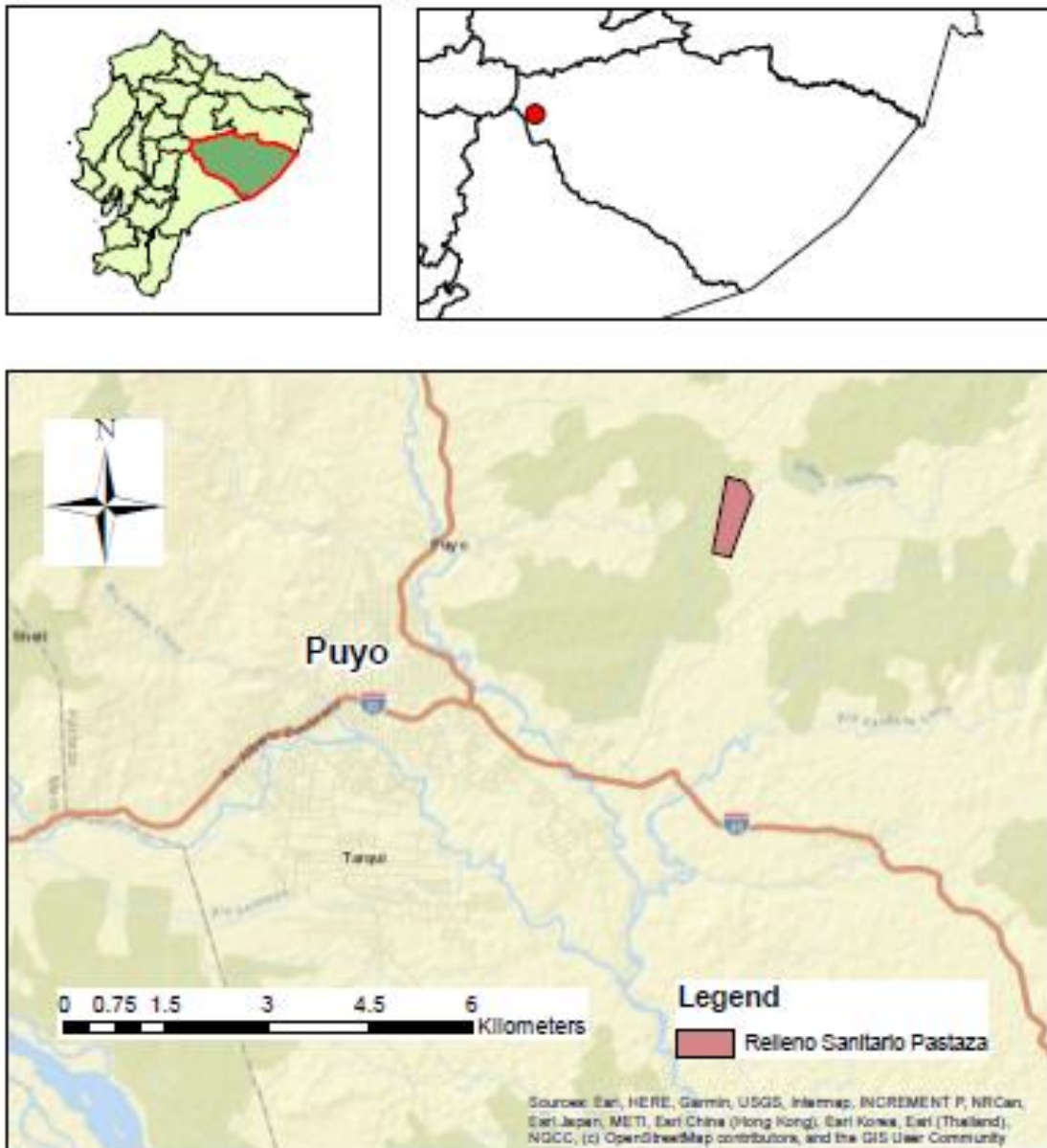


Figura 11. Ubicación del Relleño Sanitario del Cantón Pastaza



Figura 12. Fotografía aérea del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza (Cuichan et al., 2020)

Las distintas áreas del relleno sanitario del cantón Pastaza, y sus procesos se muestran en la Figura 13:



Figura 13. Actividades del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza

La composición de los desechos sólidos urbanos fue determinada en el proyecto “Innovación en el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos domésticos, dirigida a la producción agroecológica en el cantón Pastaza” desarrollado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza, Cooperación Española, la Alianza por la Solidaridad y Aid Volunteers de la Unión Europea en el año 2016, y los resultados se evidencian en la Tabla 13.

Tabla 13.

Proporción de la generación de desechos sólidos del cantón Pastaza (GADMP, 2016)

Categoría	Fracción	(%)	Total (%)
Orgánico aprovechable		-	46,1
Orgánico no aprovechable		-	16,8
Inorgánico no aprovechable	Fundas de plástico no aprovechable	4,0	22,6
	Otros no aprovechables	18,6	
Papel	Papel mixto	4,1	6,4
	Cartón	1,8	
	Tetra pack	0,5	
Plástico	Plástico fino (LDPE)	2,4	4,8
	Plástico grueso (HDPE)	1,5	
	Botellas de Plástico	0,9	
Vidrio (mixto)		-	0,9
Metal y aluminio (mixto)		-	1,2
Ropa, zapatos		-	1,0
Material electrónico		-	0,2
Total		-	100

Por otro lado, el servicio de recolección de desechos sólidos del cantón Pastaza consta de 11 rutas, distribuidas en los diferentes barrios de la ciudad, sitios de interés y parroquias rurales.

En lo que respecta a la población atendida con el servicio de recolección de desechos sólidos urbanos en el cantón Pastaza, la Unidad de Servicios Municipales usando la información

catastral del GAD Municipal de Pastaza ha calculado la cobertura del servicio que se presenta en la Tabla 14:

Tabla 14.

Estimación de la población atendida con el servicio de recolección de desechos sólidos en el cantón Pastaza

Año	Población atendida
2019	63 610
2020	66 600
2021	69 730
2022	73 000

Tipo de investigación

La investigación realizada fue de tipo descriptiva, pues se analiza la composición del biogás que se genera en el relleno sanitario del cantón Pastaza, y se lo caracterizó y cuantificó para determinar su potencial de aprovechamiento como fuente de energía.

Métodos de investigación

Si bien es cierto, la investigación tuvo su apoyo en la exploración documental, los datos que se utilizaron para la discusión de resultados fueron obtenidos a partir de mediciones en campo y la aplicación de software de estimaciones, por lo que se establece que se utilizó el método de investigación de modelación, ya que así se conoció el comportamiento futuro que tendrá la generación de biogás en el relleno sanitario del cantón Pastaza.

Tratamiento de datos

Cantidad de desechos sólidos que se disponen en el relleno sanitario del cantón Pastaza

La investigación inició con una cuantificación de los desechos sólidos que ingresan semanalmente al relleno sanitario, a través del pesaje de los camiones recolectores. Seguidamente, se revisó la documentación que recoge datos históricos de los desechos que han sido depositados en años anteriores y se estableció su composición, por tipo de desechos.

Durante el mes de mayo de 2022 se recogió los datos de pesos de los vehículos recolectores de desechos sólidos del GAD Municipal de Pastaza, obteniendo las cantidades detalladas en las Tablas 15 y 16:

Tabla 15.

Pesos por tipo de desechos recolectados en el mes de mayo de 2022 (kg)

Relleno Sanitario del cantón Pastaza	
Subtotal de residuos sólidos comunes recolectados	1 326 130
Subtotal de residuos sólidos hospitalarios recolectados	13 680
Total de residuos y desechos recolectados en el cantón Pastaza	1 339 810
Total de material reciclado/recuperado inorgánico	17 505
Total de residuos orgánicos recuperados	49 400
Total de desechos sólidos comunes depositados en la celda de disposición final	1 272 905
Total de desechos hospitalarios en la celda de disposición final	13 680
Total de desechos depositados en el relleno sanitario de la ciudad de Puyo	1 286 585

Tabla 16.

Pesos de desechos recolectados y dispuestos en la celda de disposición final activa del Relleno Sanitario del cantón Pastaza (kg)

Mes	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Enero	1 435 483	1 179 991	1 222 265	1 183 089
Febrero	1 099 723		1 111 288	1 123 685
Marzo	1 201 217		1 267 661	1 287 101
Abril	1 246 272		1 190 977	1 127 698
Mayo	1 269 762		1 274 630	1 272 905
Junio	1 157 411		1 147 999	
Julio	1 188 208		1 192 697	
Agosto	1 146 958	1 439 098	1 271 238	
Septiembre	1 156 394	1 375 486	976 212	
Octubre	1 139 264	1 071 114	1 209 222	
Noviembre	1 197 236	1 451 702	1 367 539	
Diciembre	1 199 671	1 232 390	1 285 798	
Total	14 437 599	7 749 781	14 517 526	5 994 478

Entre los meses de febrero y julio de 2020, no se cuenta con información de los desechos recolectados y dispuestos en la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza, debido a la emergencia sanitaria provocada por el virus del SARS-COVID 19.

Sin embargo, con la información de los desechos recolectados en el año 2021 y la población atendida en el mismo año, se puede calcular la Producción Per Cápita (PPC) de desechos; esto con la finalidad de proyectar la generación de desechos sólidos para los años en que la celda de disposición final esté activa.

Esta PPC se calcula a partir de la generación de desechos por cada habitante, cada día. En el Ecuador, en el sector urbano, se produce en promedio 0,83 kg de residuos sólidos por habitante por día, y en la provincia de Pastaza 0,6 (INEC, 2021).

A partir de los datos de las Tablas 13 y 15 se obtiene que la producción per cápita de desechos sólidos en el cantón Pastaza, durante el año 2021 fue de 0,57.

Así, aplicando un cálculo del volumen de desechos sólidos depositados durante la vida útil de la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza, se obtiene los datos de la Tabla 17:

Tabla 17.

Pesos de desechos dispuestos en la celda de disposición final activa del Relleno Sanitario del cantón Pastaza (kg)

Año	Población (hab)	Cantidad de desechos (Ton / año)	Observación
2019	63 610	14 438	Medido
2020	66 600	14 585	Proyectado
2021	69 730	14 518	Medido
2022	73 000	13 980	Proyectado
2023	76 400	14 724	Proyectado
2024	80 000	15 513	Proyectado

Nótese que a partir del año 2021 decrece la cantidad de desechos depositados en la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza. Esto se debe a que a partir de ese año se inicia con actividades de recuperación de desechos sólidos aprovechables, en el orden de las 5 toneladas diarias de residuos orgánicos, y 0,5 toneladas diarias de residuos inorgánicos, según la Dirección de Servicios Municipales del GAD Municipal del cantón Pastaza.

Cálculo de parámetros para el modelo LandGEM

Como primer parámetro a calcular se consideró a la tasa de generación de metano k , a partir de la precipitación anual y los valores para la tasa de generación de metano considerando el tipo de degradación de los desechos que se depositan en la celda, valores que se encuentran en la Tabla 5, de las cuales se seleccionaron moderadamente lenta, moderadamente rápida y rápida. Con estos datos se obtuvo el valor k , aplicando la ecuación (2):

$$k = \frac{\sum \text{valores de tipo de degradación}}{N} \quad (2)$$

$$k = \frac{0,07 + 0,17 + 0,4}{3}$$

$$k = 0,213 \frac{1}{\text{año}}$$

El potencial de generación de metano L_0 fue determinado mediante la ecuación (3), para lo cual fue necesario determinar los valores de los parámetros que los componen:

- MCF – Factor de corrección de metano. Al ser un relleno sanitario con una gestión anaeróbica de los desechos sólidos, y según la Tabla 7, se le asigna el valor de 1

$$MCF = 1$$

- DOC – Carbono orgánico degradable. Este valor se lo calcula desde la ecuación (4) con los datos de la Tabla 12, así:

$$DOC = 0,4 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,3 * D \quad (4)$$

$$DOC = 0,4 * 0,064 + 0,17 * 0,168 + 0,15 * 0,461 + 0,3 * 0$$

$$DOC = 0,12331$$

- DOC_f – Fracción de carbono orgánico biodegradable. Calculado desde la ecuación (5), y considerando la temperatura media de la zona que es de 26°C:

$$DOC_f = 0,014 * T + 0,28 \quad (5)$$

$$DOC_f = 0,014 * 26 + 0,28$$

$$DOC_f = 0,644$$

- F – Fracción de metano contenido en gas. Se asume el valor de 50%, por recomendación de LandGEM

Con los valores ahora conocidos, se aplica la ecuación (3)

$$L_0 = MCF * DOC * DOC_f * F * \frac{16}{12} \quad (3)$$

$$L_0 = 1 * 0,12331 * 0,644 * 0,5 * \frac{16}{12} * 1\ 000$$

$$L_0 = 52,941 \frac{m^3 CH_4}{Ton\ de\ RSU}$$

Determinación de parámetros para el modelo ecuatoriano

Como se fijó anteriormente, los valores de k y L_0 para el modelo ecuatoriano de estimación de biogás, se seleccionan de la Tabla 8, considerando la precipitación anual de la zona de estudio y el contenido medio de residuos de comida:

$$k = 0,08 \frac{1}{\text{año}}$$

$$L_0 = 84 \frac{m^3 CH_4}{\text{Ton de RSU}}$$

Una vez definidos los parámetros antes señalados, se procedió a estimar la producción de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza, aplicando los modelos matemáticos de estimación, para lo cual se utilizó el Modelo LandGEM de estimación de emisiones de gases, y el modelo ecuatoriano, y se los comparó. Las gráficas de estas estimaciones se encuentran en las Figuras 14, 15, y la comparación entre estos modelos, en la Figura 16.

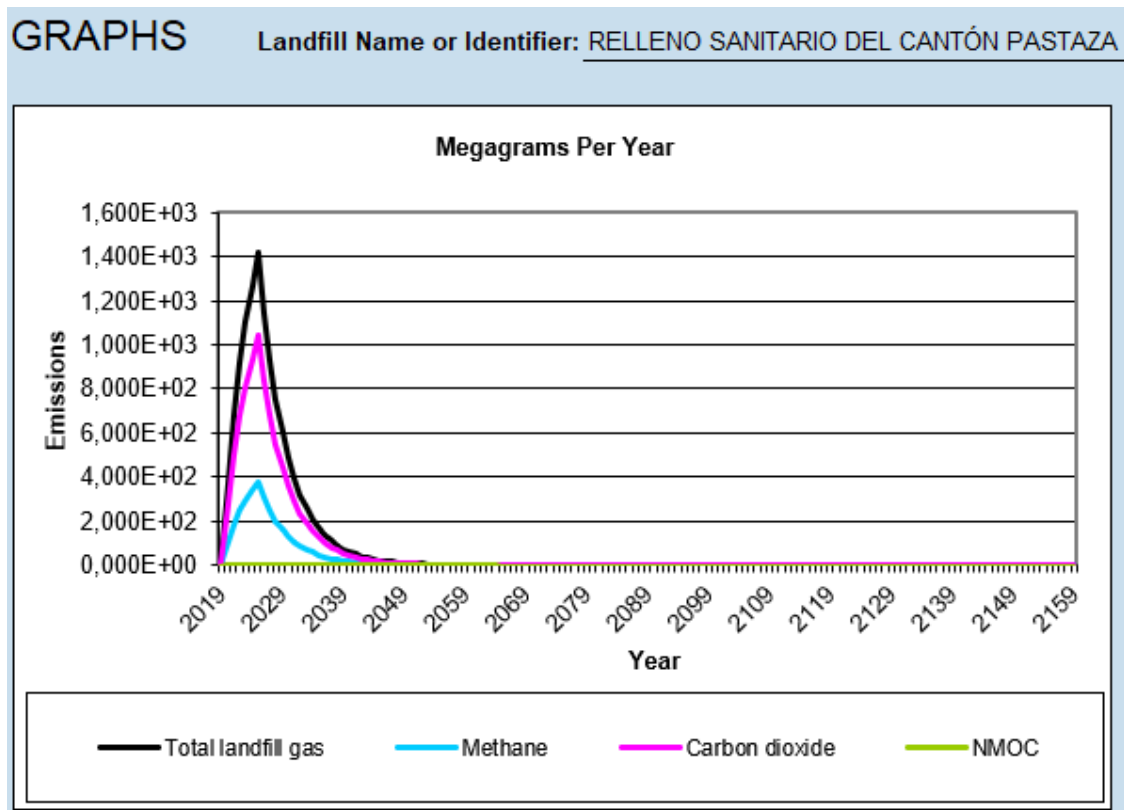


Figura 14. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo LandGEM

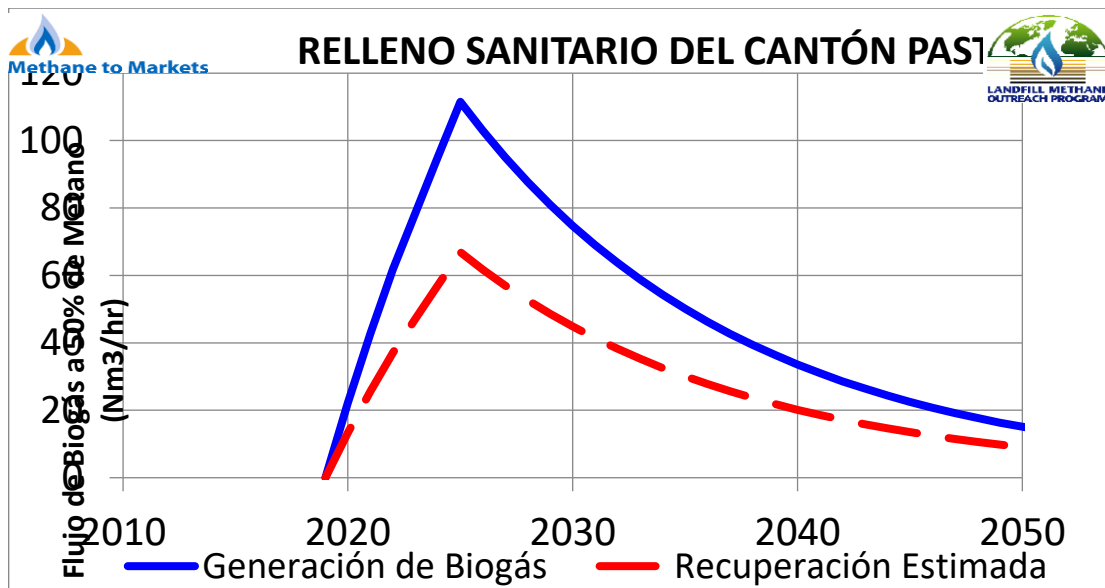


Figura 15. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo Ecuatoriano

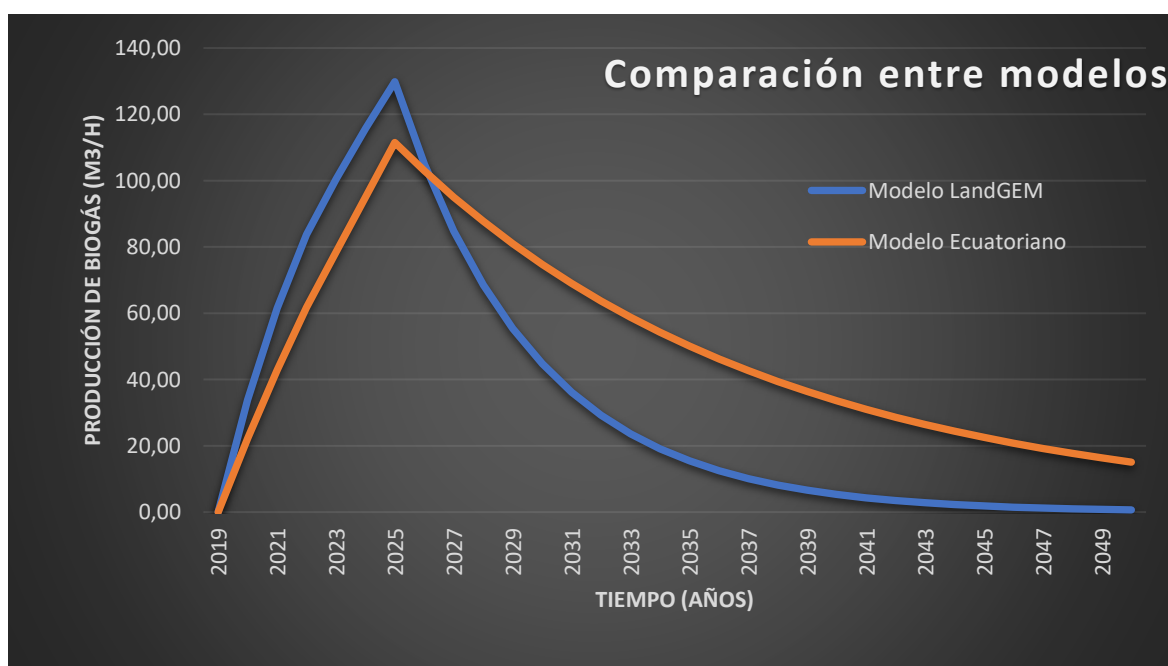


Figura 16. Comparativa de las emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según los Modelos LandGEM y ecuatoriano

La Tabla 18 presenta los resultados de los modelos aplicados para la estimación de producción de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza, en el año de estudio (2022).

Tabla 18.

Resultados de la estimación de biogás de los modelos LandGEM y ecuatoriano para el año de estudio

Año	Modelo LandGEM		Modelo Ecuatoriano		Promedio	
	m ³ /h	m ³ /año	m ³ /h	m ³ /año	m ³ /h	m ³ /año
2022	83,75	733 629,22	62	541 207	72,88	637 418,11

- Valorar la producción de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza, y su caudal de recuperación.

Finalmente se determinó el caudal aprovechable del biogás final, calculado mediante la ecuación (7), y se determinó la energía eléctrica que podría disponer el relleno sanitario del cantón Pastaza, a través de la ecuación (8), la cual contempla la transformación del biogás en forma de energía útil, en calor y electricidad.

Las características del relleno sanitario del cantón Pastaza, con los criterios de la Tabla 11 sugieren que la eficiencia de recuperación de biogás se encuentra en torno al 60%

$$Q_{b.r} = \gamma * Q_{biogás} \quad (7)$$

$$Q_{b.r} = 60\% * 637\ 418,11$$

$$Q_{b.r} = 382\ 450,87 \frac{m^3}{año}$$

$$E. disp = Q_{b.r} * m * PCS_{metano} * \eta_e \quad (8)$$

$$E. disp = 382\ 450,87 \frac{m^3}{año} * 50\% * 37,5 \frac{MJ}{m^3} * \frac{0,28 kWh}{1 MJ} * 30\%$$

$$E. disp = 602\ 360,11 \frac{kWh}{año}$$

Recursos humanos y materiales

Se entiende a los recursos humanos como las personas que participan, contribuyen o colaboran en el proyecto de investigación, y que son necesarias para conseguir los objetivos planteados. En la presente investigación fueron necesarios los recursos que se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.

Recursos humanos de la investigación

Denominación	Cantidad	Actividad
Investigador principal	1	Levantamiento de información en campo, revisión documental, sistematización de información, redacción del documento final
Personal de apoyo (funcionarios del GAD Municipal de Pastaza)	2	Levantamiento de información en campo, recolección de información documental

En cuanto a materiales, se refiere a los equipos, accesorios, insumos, materiales, entre otros, necesarios para llevar a cabo la investigación, y se evidencian en la Tabla 20.

Tabla 20.

Recursos materiales de la investigación

Recurso	Cantidad	Utilidad
Casco	3	Equipo de protección personal
Gafas de protección	3	Equipo de protección personal
Mascarilla con filtro biológico	3	Equipo de protección personal
Chaleco reflectivo	3	Equipo de protección personal
Botas de seguridad	3	Equipo de protección personal
Computadora personal	1	Sistematización de datos, redacción de informes
Cámara fotográfica	1	Toma de evidencias fotográficas
GPS	1	Sistema de posicionamiento global

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Dirección de Servicios Municipales del Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Pastaza es la entidad encargada de la administración del Relleno Sanitario del cantón. Cuentan con información sobre la población atendida con el servicio de recolección de desechos sólidos, así como las cantidades depositadas en la celda de disposición final, que inició sus operaciones en el año 2019.

Para el mes de mayo de 2022, el servicio de recolección de desechos sólidos llegaba a aproximadamente 73 000 habitantes del cantón Pastaza, incluyendo la zona urbana y rural del cantón Pastaza, y se determinó que ingresaron 1 339 810 kg de desechos, con lo cual se calculó la producción per cápita, que llega a los 0,6 kg de desechos, por habitante, por día, como se exhibe en la Tabla 21.

Tabla 21.

Determinación de la Producción per cápita de desechos sólidos del cantón Pastaza

Población atendida	Desechos recolectados	Producción per cápita (PPC)
73 000 hab	1 339 810 kg	0,6 kg/hab/día

Considerando las poblaciones atendidas en los años 2020, 2021 y 2022, se pudo determinar una tasa de crecimiento del 4,7%, a partir de lo cual se consiguió proyectar la cobertura del servicio en el año 2019, 2023 y 2024, que es cuando se prevé cerrar la celda de disposición final que actualmente se encuentra en operaciones, así como la generación de desechos. Cabe resaltar que, a partir del año 2021 se empezó a recuperar los desechos sólidos orgánicos e inorgánicos aprovechables que llegan al relleno sanitario, como se muestra en la Tabla 22:

Tabla 22.

Cálculo del volumen total de desechos sólidos para la vida útil de la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza

Año	Población (hab)	Producción total (Ton/año)	Produc desechos orgánicos (Ton/día)	Recupera desechos orgánicos (Ton/día)	Produc desechos inorgánicos (Ton/día)	Recupera desechos inorgánicos (Ton/día)	Desechos en relleno sanitario por año
2019	63 610	14 438	24,0064	0	5,5341	0	13 930,6
2020	66 600	14 585	25,1348	0	5,7942	0	14 585,4
2021	69 730	14 518	26,3161	5	6,0666	0,5	13 263,4

2022	73 000	13 980	27,5502	5	6,3510	0,5	13 979,5
2023	76 400	14 724	28,8333	5	6,6468	0,5	14 724,1
2024	80 000	15 513	30,1920	5	6,9600	0,5	15 512,5
Total							85 995,5

Estimación de producción de biogás, modelo LandGEM

La estimación de la generación de biogás en el relleno sanitario del cantón Pastaza, en el modelo LandGEM fue posible gracias a los parámetros k y L_0 calculados previamente. Se adoptó el valor de 0,213 / año en lo que corresponde a la tasa de generación de metano, y 52,941 m³ de metano por cada tonelada de desechos sólidos urbanos como potencial de generación de metano.

Como se evidencia en la Figura 17, el flujo de biogás producido en la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza incrementa su valor a partir del primer año de estudio, con 296 410,86 m³/año, llega a su punto máximo de producción de biogás en el año 2025 con 1 137 445,78 m³/año, y empieza a decrecer, luego de su cierre. El detalle de los resultados se presentan en la Tabla 23.

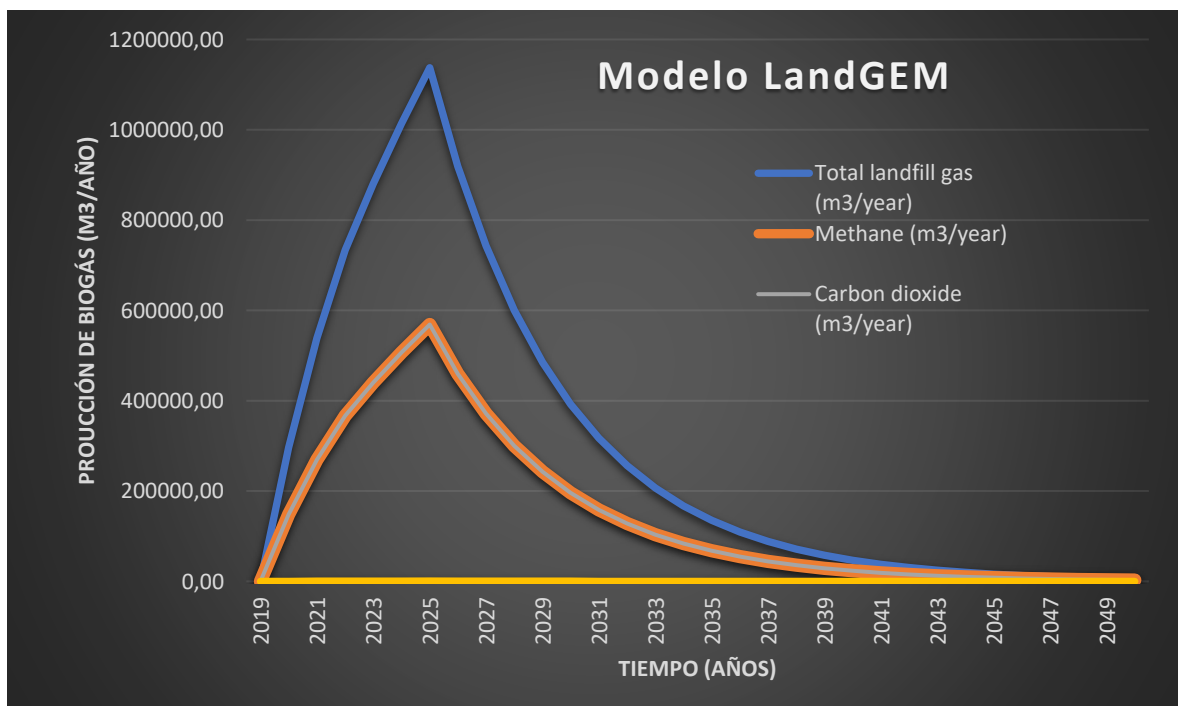


Figura 17. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo LandGEM

Tabla 23.*Resultados de la estimación de producción de gas del relleno sanitario del cantón Pastaza, modelo LandGEM*

Year	Waste Accepted	Waste-In-Place	Total landfill gas		Methane		Carbon dioxide	
	(Ton/year)	Ton	(Ton/year)	(m ³ /year)	(Ton/year)	(m ³ /year)	(Ton/year)	(m ³ /year)
2019	14 438	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2020	14 585	14 438	370,16	296410,86	98,88	148205,43	271,29	148205,43
2021	14 518	29 023	673,08	538975,01	179,79	269487,51	493,30	269487,51
2022	13 980	43 541	916,17	733629,22	244,72	366814,61	671,45	366814,61
2023	14 724	57 521	1098,83	879895,11	293,51	439947,56	805,32	439947,56
2024	15 513	72 245	1265,53	1013375,05	338,04	506687,52	927,49	506687,52
2025	0	87 758	1420,47	1137445,78	379,42	568722,89	1041,05	568722,89
2026	0	87 758	1147,96	919233,79	306,63	459616,89	841,33	459616,89
2027	0	87 758	927,73	742884,43	247,81	371442,21	679,92	371442,21
2028	0	87 758	749,75	600366,61	200,27	300183,30	549,49	300183,30
2029	0	87 758	605,92	485189,96	161,85	242594,98	444,07	242594,98
2030	0	87 758	489,68	392109,24	130,80	196054,62	358,88	196054,62
2031	0	87 758	395,73	316885,49	105,70	158442,75	290,03	158442,75
2032	0	87 758	319,81	256092,95	85,43	128046,48	234,39	128046,48
2033	0	87 758	258,46	206963,09	69,04	103481,55	189,42	103481,55
2034	0	87 758	208,88	167258,49	55,79	83629,25	153,08	83629,25

2035	0	87 758	168,80	135170,98	45,09	67585,49	123,72	67585,49
2036	0	87 758	136,42	109239,26	36,44	54619,63	99,98	54619,63
2037	0	87 758	110,25	88282,37	29,45	44141,19	80,80	44141,19
2038	0	87 758	89,10	71345,94	23,80	35672,97	65,30	35672,97
2039	0	87 758	72,01	57658,66	19,23	28829,33	52,77	28829,33
2040	0	87 758	58,19	46597,20	15,54	23298,60	42,65	23298,60
2041	0	87 758	47,03	37657,81	12,56	18828,91	34,47	18828,91
2042	0	87 758	38,01	30433,39	10,15	15216,70	27,85	15216,70
2043	0	87 758	30,71	24594,93	8,20	12297,47	22,51	12297,47
2044	0	87 758	24,82	19876,55	6,63	9938,27	18,19	9938,27
2045	0	87 758	20,06	16063,35	5,36	8031,68	14,70	8031,68
2046	0	87 758	16,21	12981,70	4,33	6490,85	11,88	6490,85
2047	0	87 758	13,10	10491,24	3,50	5245,62	9,60	5245,62
2048	0	87 758	10,59	8478,56	2,83	4239,28	7,76	4239,28
2049	0	87 758	8,56	6852,00	2,29	3426,00	6,27	3426,00
2050	0	87 758	6,92	5537,49	1,85	2768,74	5,07	2768,74

Estimación de producción de biogás, modelo ecuatoriano

En el caso del modelo ecuatoriano de estimación de biogás, los valores asumidos para k y L_0 se tomaron de la Tabla 8, considerando la elevada precipitación anual de la zona de estudio y que el contenido medio de residuos de comida es menor al 50% del total de residuos.

Los valores asumidos son 0,08 / año como tasa de generación de metano, y 84 m³ de metano por cada tonelada de desechos sólidos urbanos como potencial de generación de metano.

Aplicando el modelo ecuatoriano para la estimación de producción de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 18, donde se observa que el biogás generado empieza a fluir al primer año de operaciones de la celda de disposición final con 193 967 m³/año, y su punto máximo de producción de biogás es el año 2025, con 976 784 m³/año, para iniciar su fase de decrecimiento luego de su cierre. Los datos que arrojó el modelo aplicado están en la Tabla 24.

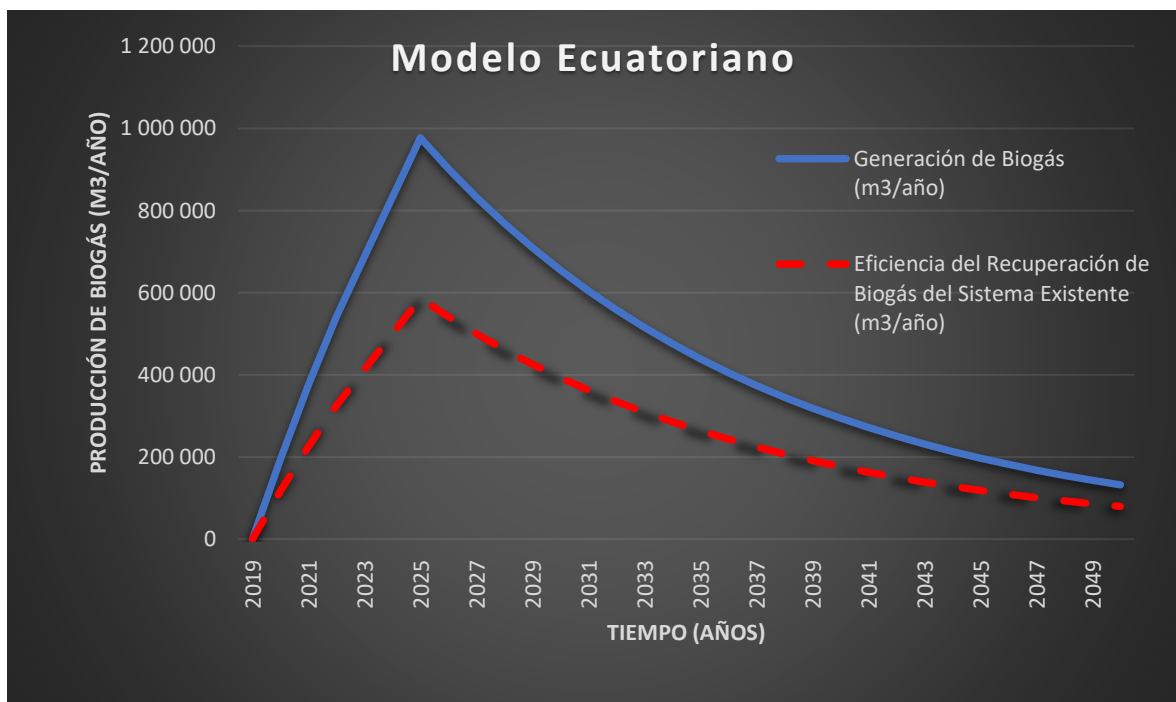


Figura 18. Emisiones de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza según Modelo Ecuatoriano

Tabla 24.*Resultados de la estimación de producción de gas del relleno sanitario del cantón Pastaza, modelo ecuatoriano.*

Year	Índice de disposición	Peso acumulado	Biogás		Recuperación de biogás del sistema existente	
	(Ton/año)	Ton	(m ³ /año)	(m ³ /hora)	(m ³ /año)	(m ³ /hora)
2019	14 438	14 438	0	0	0	0
2020	14 585	29 023	193 967	22	116 380	13
2021	14 518	43 541	374 996	43	224 998	26
2022	13 980	57 521	541 207	62	324 724	37
2023	14 724	72 245	687 412	78	412 447	47
2024	15 513	87 758	832 370	95	499 422	57
2025	0	87 758	976 784	112	586 070	67
2026	0	87 758	901 685	103	541 011	62
2027	0	87 758	832 361	95	499 416	57
2028	0	87 758	768 366	88	461 019	53
2029	0	87 758	709 291	81	425 575	49
2030	0	87 758	654 758	75	392 855	45
2031	0	87 758	604 418	69	362 651	41
2032	0	87 758	557 948	64	334 769	38
2033	0	87 758	515 051	59	309 031	35

2034	0	87 758	475 452	54	285 271	33
2035	0	87 758	438 897	50	263 338	30
2036	0	87 758	405 153	46	243 092	28
2037	0	87 758	374 004	43	224 402	26
2038	0	87 758	345 249	39	207 149	24
2039	0	87 758	318 705	36	191 223	22
2040	0	87 758	294 202	34	176 521	20
2041	0	87 758	271 582	31	162 949	19
2042	0	87 758	250 702	29	150 421	17
2043	0	87 758	231 427	26	138 856	16
2044	0	87 758	213 634	24	128 181	15
2045	0	87 758	197 209	23	118 326	14
2046	0	87 758	182 047	21	109 228	12
2047	0	87 758	168 051	19	100 830	12
2048	0	87 758	155 130	18	93 078	11
2049	0	87 758	143 203	16	85 922	10
2050	0	87 758	132 193	15	79 316	9

Comparación de resultados

Los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos de estimación de producción de biogás: LandGEM y el modelo ecuatoriano, presentaron diferencias en el comportamiento del flujo del biogás, como se muestra en la Figura 19.

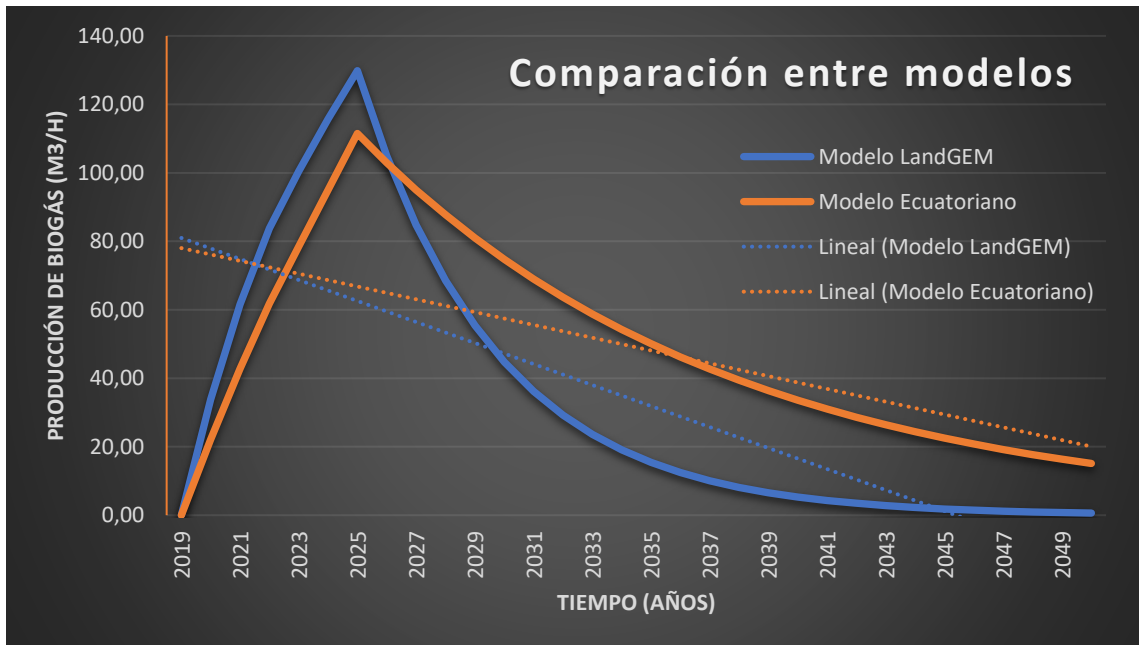


Figura 19. Generación de biogás según los modelos aplicados

El modelo LandGEM estimó una tasa mayor de generación de biogás que el modelo ecuatoriano, por lo que, para determinar el flujo del biogás con el que se trabajará, se realizará un promedio de los dos modelos, para el año de estudio.

$$Q_{prom} = \frac{Q_{LandGEM} + Q_{Ecuatoriano}}{2} \quad (10)$$

$$Q_{prom} = \frac{83,75 + 62}{2}$$

$$Q_{prom} = 72,88 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{prom} = 637\,418,11 \frac{m^3}{año}$$

Caudal de biogás recuperable

El caudal aprovechable del biogás es calculado mediante la ecuación (7). Las características del relleno sanitario del cantón Pastaza sugieren que la eficiencia de recuperación de biogás se encuentra en torno al 60%.

$$Q_{b.r} = \gamma * Q_{biogás} \quad (7)$$
$$Q_{b.r} = 60\% * 637\,418,11$$
$$Q_{b.r} = 382\,450,87 \frac{m^3}{año}$$

Energía y potencia disponible

La energía eléctrica que dispone la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza, se determina con la ecuación (8), la cual contempla la transformación del biogás en forma de energía útil, en calor y electricidad.

$$E. disp = Q_{b.r} * m * PCS_{metano} * \eta_e \quad (8)$$
$$E. disp = 382\,450,87 \frac{m^3}{año} * 50\% * 37,5 \frac{MJ}{m^3} * \frac{0,28 kWh}{1 MJ} * 30\%$$
$$E. disp = 602\,360,11 \frac{kWh}{año}$$

Finalmente, la potencia del elemento generador se definió a partir de la ecuación (9):

$$P_{E.G} = \frac{E_{disp}}{8760 \text{ horas} * f.p} \quad (9)$$
$$P_{E.G} = \frac{602\,360,11 \frac{kWh}{año}}{8760 \frac{h}{año} * 80\%}$$
$$P_{E.G} = 85,95 kW$$

Con estos resultados, la planta generadora de electricidad propuesta, generaría una potencia eléctrica mínima de 86 kW, por lo que, conforme se fijó en la Tabla 10 (Romo Millares et

al., 2012) y (Blanco et al., 2017), la tecnología adecuada sería el uso de microturbinas de gas.

Existen en el mercado varias marcas de microturbinas, sin embargo, se ha considerado las de la marca Capstone, tipo C65 ICHP y C30 HP, que juntas superarían la potencia eléctrica mínima establecida para la planta, considerando las características que se despliegan en la Tabla 25.

Tabla 25.

Características de Microturbinas Capstone (Capstone Turbine Corporation, 2010)

Model	Power output (kW)	Electrical Efficiency (%)	Exhaust Gas Flow (kg/s)	Exhaust Temp (C°)	Net Heat Rate (MJ/kWh)	Dimensions (m)
C30 HP	28	25	0,31	275	13,8	0,76x1,5x1,8
C65 ICHP	65	29	0,49	309	12,4	0,76x2,2x2,4

Un modelo de planta de generación se muestra en la Figura 20, que representa a un sistema de microturbinas instalado en Ciudad de México.



Figura 20. Sistema de Cogeneración con 3 Microturbinas Capstone C65, Hotel City Express, Ciudad de México (Sandoval Rodríguez, 2010)

Conclusiones

- El Relleno Sanitario del cantón Pastaza receipta, en promedio, 14 500 toneladas de desechos sólidos al año, en su celda de disposición final activa, valor que aumenta cada año debido al crecimiento poblacional. Esta cantidad corresponde a la fracción no aprovechada de la totalidad de desechos generados en las zonas urbana y rurales del cantón.
- Los parámetros para la estimación de producción de biogás para la aplicación del modelo LandGEM, en función a las características climáticas de la zona y del relleno sanitario, están calculados en 0,21 l/año para la tasa de generación de metano, y el potencial de generación de metano en 52,94 m³ por tonelada de desechos sólidos. Estos valores están en función de las características climáticas y del relleno sanitario en estudio.
- Para la aplicación del modelo ecuatoriano de biogás, los valores determinados para los parámetros necesarios corresponden a una tasa de generación de metano de 0,08 l/año, y el potencial de generación de metano en 84 m³ por tonelada de desechos sólidos, valores tomados de las tablas utilizadas por el mismo modelo en función de las precipitaciones de la zona y el contenido de los residuos.
- La producción de biogás en la celda de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza que se encuentra activa en el año de estudio (2022), determinó una generación de 83,75 m³/hora, y una producción máxima de 129,5 m³/ hora en el 2025 aplicando el modelo LandGEM, mientras que el modelo ecuatoriano de biogás estimó una generación de 62 m³/hora, y un máximo de 112 m³/hora en el año 2025. A partir de este año, la generación decaerá de manera gradual.
- La energía disponible del biogás, partiendo del promedio de los caudales recuperados de los 2 modelos utilizados, fue calculado en 602 360,11 kWh/año, de lo cual se desprende que la celda activa del relleno sanitario posee un potencial eléctrico capaz de generar es de 86 kW en el año de estudio, y un máximo de 143 kW en el año 2025.

- Se planteó la propuesta del uso de tecnología de aprovechamiento energético, a través de microturbinas, debido al bajo flujo de biogás, y a la facilidad que ofrece para agregar y/o eliminar unidades de generación eléctrica.
- El aprovechamiento adecuado de biogás de los rellenos sanitarios contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que repercute en el cuidado del medio ambiente, y el cumplimiento de los distintos compromisos adquiridos a nivel mundial por parte de los países, en materia ambiental.

Recomendaciones

- Es importante definir el modelo matemático a utilizar para las estimaciones de emisiones de gases en los rellenos sanitarios, ya que la geografía del Ecuador hace que las condiciones climáticas sean diversas, por lo que se debe poner atención en la determinación de los parámetros necesarios para que los resultados de la aplicación de los modelos de estimación de biogás sean efectivos.
- Un estudio posterior en el que se defina la viabilidad económica de la presente propuesta, permitiría determinar las ventajas del uso de esta tecnología para el aprovechamiento energético de las emisiones de biogás del relleno sanitario, frente a las otras opciones disponibles.
- Una ampliación de este estudio, que evalúe la producción de biogás en las celdas de disposición final del relleno sanitario del cantón Pastaza, que ya se encuentran cerradas, permitirá valorar la factibilidad de aprovechar el biogás que se está generando en ellas.
- Para las próximas celdas de disposición final a utilizarse, los sistemas de extracción de biogás deberán ser construidos con mejores prestaciones, y es necesario que se implanten sistemas de recuperación de biogás que permitan incrementar la eficiencia de estos sistemas, y contar con mayor caudal de estos gases.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, A., Burklin, C., & Singleton, A. (2005). Landfill gas emissions model. United States Environmental Protection Agency, Version 3.02 user's guide. *U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, May, 48*.
<http://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
- Ambuludi-Paredes, R. R., Carvajal-Padilla, V. P., & Diéguez Santana, K. (2021). 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*, 67–78. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5413>
- Anónimo. (2014). *Relleno sanitario. Problema Ambiental*.
<https://rellenosanitarios.wordpress.com/>
- Arellano, L., Dorado, A. D., Fortuny, M., Gabriel, D., Gamisans, X., González- Sánchez, A., Hernández, S., Lafuente, J., Monroy, O., Mora, M., Revah, S., & Sierra, H. (2017). *Purificación y usos del biogás* (D. Gabriel & H. Sierra (eds.); Primera ed, Issue June 2020). Universitt Autònoma de Barcelona.
- Arvizu Fernández, J. L., Huacuz Villamar, J. M., & Saldaña Méndez, J. L. (2006). Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. *Aidis, 1*(1), 14.
<http://132.247.253.81/index.php/aidis/article/view/14446/13781>
- Asensio, G., Campana, M., González, T., Sebático, X., Skubic, T., & Sosa, M. (2019). *Instalación de una planta de producción de energía eléctrica a partir de biogás de relleno sanitario*. <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1942>
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico. *División de Energía, 52*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Generación-de-electricidad-a-partir-de-biogás-capturado-de-residuos-sólidos-urbanos-Un-análisis-teórico-práctico.pdf>
- Capstone Turbine Corporation. (2010). *Catalog Capstone.pdf*.
<https://pdf.directindustry.com/pdf/capstone-turbine/product-catalog/22062-460767.html>

- Crisanto, L. (2013). Estudio De Factibilidad Para Implementar Una Central Eléctrica Aprovechando El Biogás Generado Por El Relleno Sanitario Del Inga. In *Dspace*. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Cuichan, S., Duque, J., & Zurita, F. (2020). *Auditoria Ambiental de Cumplimiento del proyecto “Manejo de desechos sólidos de la ciudad de Puyo en el sitio del relleno sanitario ubicado en la provincia de Pastaza” periodo 2015-2017.*
- GADMP. (2016). *Memoria de proyecto “ Innovación en el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos domésticos , dirigida a la producción agroecológica en el Cantón Pastaza ” Tomo 3.*
- GADMP. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Pastaza 2020 - 2030.*
- García Alcalde, J. P. (2019). *Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir de biogás producido en rellenos sanitarios en Chile.* <https://hdl.handle.net/11673/49121>
- Guevara Torres, A. J. (2021). *Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del biogás residual generado por el relleno sanitario complejo ambiental Chasinato de la EPM-GIDSA. 1996, 6.*
- Hettiarachchi, H., Ryu, S., Caucci, S., & Silva, R. (2018). Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: Issues and potential solutions from the governance perspective. *Recycling, 3*(2). <https://doi.org/10.3390/recycling3020019>
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., & Maskell, K. (1998). Climate Change 1995. The Science of Climate Change. In *Cambridge University Press* (Vol. 4, Issue 3). <https://doi.org/10.1071/pc980275>
- INEC. (2021). *Boletín Técnico No 04-2020-GAD Municipales. Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Gestión de Residuos Sólidos* (Issue 04). <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales: una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en*

pequeñas poblaciones. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55275>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tat, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In *Syria Studies* (Vol. 7, Issue 1). https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil_wars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). *Resumen del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador. Serie temporal 1994-2012*.

Mosquera Espinosa, A. T., & Caro Moreno, L. J. (2019). *Alternativas para el manejo de reiduso sólidos y su integración en el montaje de una huerta agroecológica*.

Olmedo, J., & Curillo, J. (2019). Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala. In *Universidad Politecnica Salesiana*.

Röben, E. (2002). *Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales*. 1–151. www.ded.org.ec

Romo Millares, C. A., Medrano Vaca, C., Romero Tehuitzil, H., Arvizu Fernández, J. L., Huacuz Villamar, J. M., & Beltrán Adán, J. (2012). *Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*.

Sandoval Rodríguez, C. (2010). *Manual práctico de sistemas de microgeneración a base de microturbinas*. Instituto Politécnico Nacional.

Siliezar, C., & Urquizo, R. (2009). *User's Manual Ecuador Landfill Gas Model Version 1.0*.

Terraza, H., & Willumsen, H. (2009). Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization. *IDB Infrastructure and Environment Sector-No.108, 108*.

Tito, B. (2021). *Importancia de los Rellenos sanitarios: Tipos, características*. <https://ingenieriaambiental.net/rellenos-sanitarios/>

Ulloa, J. (2006). Los Rellenos Sanitarios. *La Granja. Revista de Ciencias de La Vida*, 4(ISSN: 1390-3799), 2–17.

US EPA. (2021). LFG Energy Project Development Handbook. In *Landfill Methane Outreach Program*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-07/documents/pdf_full.pdf

Zhang, C., Xu, T., Feng, H., & Chen, S. (2019). Greenhouse gas emissions from landfills: A review and bibliometric analysis. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su11082282>

ANEXOS

Anexo 1. Reporte del modelo LandGEM

Anexo 2. Reporte del modelo ecuatoriano de estimación de biogás

Anexo 3. Catálogo de equipos generadores de energía a partir de biogás

INTRODUCTION

LandGEM - Landfill Gas Emissions Model, Version 3.03

U.S. Environmental Protection Agency

Model Design:

Worksheet Name	Function
<u>INTRO</u>	Contains an overview of the model and important notes about using LandGEM
<u>USER INPUTS</u>	Allows users to provide landfill characteristics, determine model parameters, select up to four gases/pollutants (total landfill gas, methane, carbon dioxide, NMOC, and 46 air pollutants), and enter waste acceptance rates
<u>POLLUTANTS</u>	Allows users to edit air pollutant concentrations and molecular weights for existing pollutants and add up to 10 new pollutants
<u>INPUT REVIEW</u>	Allows users to review and print model inputs
<u>METHANE</u>	Calculates methane emission estimates using the first-order decomposition rate equation
<u>RESULTS</u>	Shows tabular emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user's choice of a third unit of measure (average cubic feet per minute, cubic feet per year, or short tons per year)
<u>GRAPHS</u>	Shows graphical emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user's choice of a third unit of measure (selected in the RESULTS worksheet)
<u>INVENTORY</u>	Displays tabular emission estimates for all gases/pollutants for a single year specified by users
<u>REPORT</u>	Allows users to review and print model inputs and outputs in a summary report

IMPORTANT NOTES!

The following user inputs MUST be completed in the USER INPUTS worksheet:

- Landfill open year
- Landfill closure year or Waste design capacity
- Annual waste acceptance rates from open year to current year or closure year

Other Important Notes:

- LandGEM is based on the gas generated from anaerobic decomposition of landfilled waste which has a methane content between 40 and 60 percent.
- When using LandGEM to comply with the CAA, the methane content of the landfill gas must remain fixed at 50% by volume (the model default value).
- Default pollutant concentrations used by LandGEM have already been corrected for air infiltration, as stated in AP-42. If a user-specified value for NMOC concentration is used based on site-specific data, then it must be corrected for air infiltration.
- When comparing results from LandGEM with measurements of extracted gas collected at a site, the landfill owner/operator must adjust for air infiltration prior to any comparisons.
- One megagram is equivalent to one metric ton.

About LandGEM:

LandGEM is based on a first-order decomposition rate equation for quantifying emissions from the decomposition of landfilled waste in municipal solid waste (MSW) landfills. The software provides a relatively simple approach to estimating landfill gas emissions. Model defaults are based on empirical data from U.S. landfills. Field test data can also be used in place of model defaults when available. Further guidance on EPA test methods, Clean Air Act (CAA) regulations, and other guidance regarding landfill gas emissions and control technology requirements can be found at <http://www.epa.gov/ttnatw01/landfill/landflpg.html>

LandGEM is considered a screening tool — the better the input data, the better the estimates. Often, there are limitations with the available data regarding waste quantity and composition, variation in design and operating practices over time, and changes occurring over time that impact the emissions potential. Changes to landfill operation, such as operating under wet conditions through leachate recirculation or other liquid additions, will result in generating more gas at a faster rate. Defaults for estimating emissions for this type of operation are being developed to include in LandGEM along with defaults for conventional landfills (no leachate or liquid additions) for developing emission inventories and determining CAA applicability. Refer to the Web site identified above for future updates.

USER INPUTS

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Clear ALL Non-Parameter
Inputs/Selections

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2019	
Landfill Closure Year	2024	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity		<i>megagrams</i> ▼

Restore Default Model
Parameters

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)	User-specified k value should be based on site-specific data and determined	
User-specified ▼	User-specified value:	0,213 by EPA Method 2E.
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)	User-specified L_0 value should be based on site-specific	
User-specified ▼	User-specified value:	53 data and determined by waste type and composition.
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)		
Inventory No or Unknown Co-disposal - 600 ▼		
Methane Content (% by volume)		
CAA - 50% by volume ▼		

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1	Default pollutant parameters are currently being used by model.	
Total landfill gas ▼		Edit Existing or Add New Pollutant Parameters
Gas / Pollutant #2		
Methane ▼		Restore Default Pollutant Parameters
Gas / Pollutant #3		
Carbon dioxide ▼		
Gas / Pollutant #4		
NMOC ▼		

Clear ALL Non-Parameter
Inputs/Selections

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2019	
Landfill Closure Year	2024	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	

Description/Comments:

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: ▼

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2019	14 438	15 882
2020	14 585	16 044
2021	14 518	15 970
2022	13 980	15 378
2023	14 724	16 196
2024	15 513	17 064
2025		
2026		
2027		
2028		
2029		
2030		
2031		
2032		
2033		
2034		
2035		
2036		
2037		
2038		
2039		
2040		
2041		
2042		
2043		
2044		
2045		

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2046		
2047		
2048		
2049		
2050		
2051		
2052		
2053		
2054		
2055		
2056		
2057		
2058		

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2059		
2060		
2061		
2062		
2063		
2064		
2065		
2066		
2067		
2068		
2069		
2070		
2071		
2072		
2073		
2074		
2075		
2076		
2077		
2078		
2079		
2080		
2081		
2082		
2083		
2084		
2085		

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2086		
2087		
2088		
2089		
2090		
2091		
2092		
2093		
2094		
2095		
2096		
2097		
2098		

POLLUTANTS

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Enter New Pollutant Parameters

Edit Existing Pollutant Parameters

Default parameters will be used by model unless alternate parameters are entered.

Enter User-specified Pollutant Parameters for Existing Pollutants:

		Gas / Pollutant Default Parameters:			Enter User-specified Pollutant Parameters for Existing Pollutants:	
Compound		Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Notes	Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Gases	Total landfill gas		30,03			
	Methane		16,04			
	Carbon dioxide		44,01			
	NMOC	600	86,18			
Pollutants	1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	0,48	133,41	A		
	1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	1,1	167,85	A, B		
	1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride) - HAP/VOC	2,4	98,97	A, B		
	1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	0,20	96,94	A, B		
	1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	0,41	98,96	A, B		
	1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	0,18	112,99	A, B		
	2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	50	60,11	B		
	Acetone	7,0	58,08			
	Acrylonitrile - HAP/VOC	6,3	53,06	A, B		
	Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	1,9	78,11	A, B		
	Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	11	78,11	A, B		
	Bromodichloromethane - VOC	3,1	163,83	B		
	Butane - VOC	5,0	58,12	B		
	Carbon disulfide - HAP/VOC	0,58	76,13	A, B		
	Carbon monoxide	140	28,01			
	Carbon tetrachloride - HAP/VOC	4,0E-03	153,84	A, B		
	Carbonyl sulfide - HAP/VOC	0,49	60,07	A, B		
	Chlorobenzene - HAP/VOC	0,25	112,56	A, B		
	Chlorodifluoromethane	1,3	86,47			
	Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	1,3	64,52	A, B		
	Chloroform - HAP/VOC	0,03	119,39	A, B		
	Chloromethane - VOC	1,2	50,49	B		
	Dichlorobenzene - (HAP for para isomer/VOC)	0,21	147	B, C		
	Dichlorodifluoromethane	16	120,91			
	Dichlorofluoromethane - VOC	2,6	102,92	B		
	Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	14	84,94	A		
	Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	7,8	62,13	B		
	Ethane	890	30,07			
	Ethanol - VOC	27	46,08	B		
	Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	2,3	62,13	B		
	Ethylbenzene - HAP/VOC	4,6	106,16	A, B		
	Ethylene dibromide - HAP/VOC	1,0E-03	187,88	A, B		
	Fluorotrichloromethane - VOC	0,76	137,38	B		
	Hexane - HAP/VOC	6,6	86,18	A, B		
	Hydrogen sulfide	36	34,08			
	Mercury (total) - HAP	2,9E-04	200,61	A		
	Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	7,1	72,11	A, B		
	Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	1,9	100,16	A, B		
	Methyl mercaptan - VOC	2,5	48,11	B		
	Pentane - VOC	3,3	72,15	B		
Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	3,7	165,83	A			
Propane - VOC	11	44,09	B			
t-1,2-Dichloroethene - VOC	2,8	96,94	B			
Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	39	92,13	A, B			
Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	170	92,13	A, B			
Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	2,8	131,40	A, B			
Vinyl chloride - HAP/VOC	7,3	62,50	A, B			
Xylenes - HAP/VOC	12	106,16	A, B			
Enter New Compound		Enter Concentration (ppmv)	Enter Molecular Weight			

Return to USER INPUTS

A. Hazardous air pollutants (HAP) listed in Title III of the 1990 Clean Air Act Amendments.
 B. Considered volatile organic compounds (VOC), as defined by U.S. EPA in 40 CFR 51.100(s).
 C. Source tests did not indicate whether this compound was the para- or ortho- isomer. The para- isomer is a Title III-listed HAP.

Source: Tables 2.4-1 and 2.4-2 of *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*, 5th ed., Chapter 2.4 Municipal Solid Waste Landfills. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. November 1998. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>

INPUT REVIEW

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2019	
Landfill Closure Year (with 80-year limit)	2024	
<i>Actual Closure Year (without limit)</i>	2024	
Have Model Calculate Closure Year?	No	
Waste Design Capacity		<i>megagrams</i>

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k	0,213	<i>year⁻¹</i>
Potential Methane Generation Capacity, L ₀	53	<i>m³/Mg</i>
NMOC Concentration	600	<i>ppmv as hexane</i>
Methane Content	50	<i>% by volume</i>

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1:	Total landfill gas
Gas / Pollutant #2:	Methane
Gas / Pollutant #3:	Carbon dioxide
Gas / Pollutant #4:	NMOC

Description/Comments:

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	(Mg/year)	(short tons/year)
2019	14 438	15 882
2020	14 585	16 044
2021	14 518	15 970
2022	13 980	15 378
2023	14 724	16 196
2024	15 513	17 064
2025	0	0
2026	0	0
2027	0	0
2028	0	0
2029	0	0
2030	0	0
2031	0	0
2032	0	0
2033	0	0
2034	0	0
2035	0	0
2036	0	0
2037	0	0
2038	0	0
2039	0	0
2040	0	0
2041	0	0
2042	0	0
2043	0	0
2044	0	0
2045	0	0
2046	0	0
2047	0	0
2048	0	0
2049	0	0
2050	0	0
2051	0	0
2052	0	0
2053	0	0
2054	0	0
2055	0	0
2056	0	0
2057	0	0
2058	0	0
2059	0	0
2060	0	0
2061	0	0

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	(Mg/year)	(short tons/year)
2062	0	0
2063	0	0
2064	0	0
2065	0	0
2066	0	0
2067	0	0
2068	0	0
2069	0	0
2070	0	0
2071	0	0
2072	0	0
2073	0	0
2074	0	0
2075	0	0
2076	0	0
2077	0	0
2078	0	0
2079	0	0
2080	0	0
2081	0	0
2082	0	0
2083	0	0
2084	0	0
2085	0	0
2086	0	0
2087	0	0
2088	0	0
2089	0	0
2090	0	0
2091	0	0
2092	0	0
2093	0	0
2094	0	0
2095	0	0
2096	0	0
2097	0	0
2098	0	0

METHANE

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

First-Order Decomposition Rate Equation:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_o \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Where,

Q_{CH_4} = annual methane generation in the year of the calculation ($m^3/year$)

i = 1-year time increment

n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance)

j = 0.1-year time increment

k = methane generation rate ($year^{-1}$)

L_o = potential methane generation capacity (m^3/Mg)

M_i = mass of waste accepted in the i^{th} year (Mg)

t_{ij} = age of the j^{th} section of waste mass M_i accepted in the i^{th} year (*decimal years*, e.g., 3.2 years)

Model Parameters from User Inputs:

k = 0,213 $year^{-1}$

L_o = 53 m^3/Mg

When Model Calculates Closure Year...

Final Non-Zero Acceptance Entered =	15 513 megagrams in	2024
Waste Design Capacity =	megagrams	
Closure Year (with 80-year limit) =	2024	
Actual Closure Year (without limit) =	2024	
Model Waste Acceptance Limit =	80 years	

Year	User Waste Acceptance Inputs (Mg/year)	User Waste- In-Place (Mg)	Waste Acceptance (Mg/year)	Waste-In- Place (Mg)
2019	14 438	0	14 438	0
2020	14 585	14 438	14 585	14 438
2021	14 518	29 023	14 518	29 023
2022	13 980	43 541	13 980	43 541
2023	14 724	57 521	14 724	57 521
2024	15 513	72 245	15 513	72 245
2025	0	87 758	0	87 758
2026	0	87 758	0	87 758
2027	0	87 758	0	87 758
2028	0	87 758	0	87 758
2029	0	87 758	0	87 758
2030	0	87 758	0	87 758
2031	0	87 758	0	87 758
2032	0	87 758	0	87 758
2033	0	87 758	0	87 758
2034	0	87 758	0	87 758
2035	0	87 758	0	87 758
2036	0	87 758	0	87 758
2037	0	87 758	0	87 758
2038	0	87 758	0	87 758
2039	0	87 758	0	87 758
2040	0	87 758	0	87 758
2041	0	87 758	0	87 758
2042	0	87 758	0	87 758
2043	0	87 758	0	87 758
2044	0	87 758	0	87 758
2045	0	87 758	0	87 758
2046	0	87 758	0	87 758
2047	0	87 758	0	87 758
2048	0	87 758	0	87 758
2049	0	87 758	0	87 758
2050	0	87 758	0	87 758
2051	0	87 758	0	87 758
2052	0	87 758	0	87 758
2053	0	87 758	0	87 758
2054	0	87 758	0	87 758
2055	0	87 758	0	87 758
2056	0	87 758	0	87 758
2057	0	87 758	0	87 758
2058	0	87 758	0	87 758
2059	0	87 758	0	87 758
2060	0	87 758	0	87 758
2061	0	87 758	0	87 758
2062	0	87 758	0	87 758
2063	0	87 758	0	87 758
2064	0	87 758	0	87 758
2065	0	87 758	0	87 758
2066	0	87 758	0	87 758
2067	0	87 758	0	87 758
2068	0	87 758	0	87 758
2069	0	87 758	0	87 758
2070	0	87 758	0	87 758
2071	0	87 758	0	87 758
2072	0	87 758	0	87 758
2073	0	87 758	0	87 758
2074	0	87 758	0	87 758
2075	0	87 758	0	87 758
2076	0	87 758	0	87 758
2077	0	87 758	0	87 758
2078	0	87 758	0	87 758

Year	User Waste Acceptance Inputs (Mg/year)	User Waste- In-Place (Mg)	Waste Acceptance (Mg/year)	Waste-In- Place (Mg)
2079	0	87 758	0	87 758
2080	0	87 758	0	87 758
2081	0	87 758	0	87 758
2082	0	87 758	0	87 758
2083	0	87 758	0	87 758
2084	0	87 758	0	87 758
2085	0	87 758	0	87 758
2086	0	87 758	0	87 758
2087	0	87 758	0	87 758
2088	0	87 758	0	87 758
2089	0	87 758	0	87 758
2090	0	87 758	0	87 758
2091	0	87 758	0	87 758
2092	0	87 758	0	87 758
2093	0	87 758	0	87 758
2094	0	87 758	0	87 758
2095	0	87 758	0	87 758
2096	0	87 758	0	87 758
2097	0	87 758	0	87 758
2098	0	87 758	0	87 758

RESULTS

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Closure Year (with 80-year limit) = 2024
 Methane = 50 % by volume

Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.

User-specified Unit:

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		Total landfill gas			Methane			Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2019	14 438	15 882	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	14 585	16 044	14 438	15 882	3.702E+02	2.964E+05	4.072E+02	9.888E+01	1.482E+05	1.088E+02	2.713E+02	1.482E+05	2.984E+02	6.375E-01	1.778E+02	7.012E-01
2021	14 518	15 970	29 023	31 925	6.731E+02	5.390E+05	7.404E+02	1.798E+02	2.695E+05	1.978E+02	4.933E+02	2.695E+05	5.426E+02	1.159E+00	3.234E+02	1.275E+00
2022	13 980	15 378	43 541	47 895	9.162E+02	7.336E+05	1.008E+03	2.447E+02	3.668E+05	2.692E+02	6.715E+02	3.668E+05	7.386E+02	1.578E+00	4.402E+02	1.736E+00
2023	14 724	16 196	57 521	63 273	1.099E+03	8.799E+05	1.209E+03	2.935E+02	4.399E+05	3.229E+02	8.053E+02	4.399E+05	8.859E+02	1.892E+00	5.279E+02	2.082E+00
2024	15 513	17 064	72 245	79 470	1.266E+03	1.013E+06	1.392E+03	3.380E+02	5.067E+05	3.718E+02	9.275E+02	5.067E+05	1.020E+03	2.179E+00	6.080E+02	2.397E+00
2025	0	0	87 758	96 534	1.420E+03	1.137E+06	1.563E+03	3.794E+02	5.687E+05	4.174E+02	1.041E+03	5.687E+05	1.145E+03	2.446E+00	6.825E+02	2.691E+00
2026	0	0	87 758	96 534	1.148E+03	9.192E+05	1.263E+03	3.066E+02	4.596E+05	3.373E+02	8.413E+02	4.596E+05	9.255E+02	1.977E+00	5.515E+02	2.175E+00
2027	0	0	87 758	96 534	9.277E+02	7.429E+05	1.021E+03	2.478E+02	3.714E+05	2.726E+02	6.799E+02	3.714E+05	7.479E+02	1.598E+00	4.457E+02	1.757E+00
2028	0	0	87 758	96 534	7.498E+02	6.004E+05	8.247E+02	2.003E+02	3.002E+05	2.203E+02	5.495E+02	3.002E+05	6.044E+02	1.291E+00	3.602E+02	1.420E+00
2029	0	0	87 758	96 534	6.059E+02	4.852E+05	6.665E+02	1.618E+02	2.426E+05	1.780E+02	4.441E+02	2.426E+05	4.885E+02	1.043E+00	2.911E+02	1.148E+00
2030	0	0	87 758	96 534	4.897E+02	3.921E+05	5.386E+02	1.308E+02	1.961E+05	1.439E+02	3.589E+02	1.961E+05	3.948E+02	8.433E-01	2.353E+02	9.276E-01
2031	0	0	87 758	96 534	3.957E+02	3.169E+05	4.353E+02	1.057E+02	1.584E+05	1.163E+02	2.900E+02	1.584E+05	3.190E+02	6.815E-01	1.901E+02	7.497E-01
2032	0	0	87 758	96 534	3.198E+02	2.561E+05	3.518E+02	8.543E+01	1.280E+05	9.397E+01	2.344E+02	1.280E+05	2.578E+02	5.508E-01	1.537E+02	6.059E-01
2033	0	0	87 758	96 534	2.585E+02	2.070E+05	2.843E+02	6.904E+01	1.035E+05	7.594E+01	1.894E+02	1.035E+05	2.084E+02	4.451E-01	1.242E+02	4.896E-01
2034	0	0	87 758	96 534	2.089E+02	1.673E+05	2.298E+02	5.579E+01	8.363E+04	6.137E+01	1.531E+02	8.363E+04	1.684E+02	3.957E-01	1.004E+02	3.957E-01
2035	0	0	87 758	96 534	1.688E+02	1.352E+05	1.857E+02	4.509E+01	6.759E+04	4.960E+01	1.237E+02	6.759E+04	1.361E+02	2.907E-01	8.110E+01	3.198E-01
2036	0	0	87 758	96 534	1.364E+02	1.092E+05	1.501E+02	3.644E+01	5.462E+04	4.008E+01	9.998E+01	5.462E+04	1.100E+02	2.349E-01	6.554E+01	2.584E-01
2037	0	0	87 758	96 534	1.102E+02	8.828E+04	1.213E+02	2.945E+01	4.414E+04	3.239E+01	8.080E+01	4.414E+04	8.888E+01	1.899E-01	5.297E+01	2.089E-01
2038	0	0	87 758	96 534	8.910E+01	7.135E+04	9.801E+01	2.380E+01	3.567E+04	2.618E+01	6.530E+01	3.567E+04	7.183E+01	1.534E-01	4.281E+01	1.688E-01
2039	0	0	87 758	96 534	7.201E+01	5.766E+04	7.921E+01	1.923E+01	2.883E+04	2.116E+01	5.277E+01	2.883E+04	5.805E+01	1.260E-01	3.460E+01	1.364E-01
2040	0	0	87 758	96 534	5.819E+01	4.660E+04	6.401E+01	1.554E+01	2.330E+04	1.710E+01	4.265E+01	2.330E+04	4.691E+01	1.002E-01	2.796E+01	1.102E-01
2041	0	0	87 758	96 534	4.703E+01	3.766E+04	5.173E+01	1.256E+01	1.883E+04	1.382E+01	3.447E+01	1.883E+04	3.791E+01	8.099E-02	2.259E+01	8.909E-02
2042	0	0	87 758	96 534	3.801E+01	3.043E+04	4.181E+01	1.015E+01	1.522E+04	1.117E+01	2.785E+01	1.522E+04	3.064E+01	6.545E-02	1.826E+01	7.200E-02
2043	0	0	87 758	96 534	3.071E+01	2.459E+04	3.379E+01	8.204E+00	1.230E+04	9.025E+00	2.251E+01	1.230E+04	2.476E+01	5.290E-02	1.476E+01	5.819E-02
2044	0	0	87 758	96 534	2.482E+01	1.988E+04	2.730E+01	6.630E+00	9.938E+03	7.293E+00	1.819E+01	9.938E+03	2.001E+01	4.275E-02	1.193E+01	4.702E-02
2045	0	0	87 758	96 534	2.006E+01	1.606E+04	2.207E+01	5.358E+00	8.032E+03	5.894E+00	1.470E+01	8.032E+03	1.617E+01	3.455E-02	9.638E+00	3.800E-02
2046	0	0	87 758	96 534	1.621E+01	1.298E+04	1.783E+01	4.330E+00	6.491E+03	4.763E+00	1.188E+01	6.491E+03	1.307E+01	2.792E-02	7.789E+00	3.071E-02
2047	0	0	87 758	96 534	1.310E+01	1.049E+04	1.441E+01	3.500E+00	5.246E+03	3.850E+00	9.602E+00	5.246E+03	1.056E+01	2.256E-02	6.295E+00	2.482E-02
2048	0	0	87 758	96 534	1.059E+01	8.479E+03	1.165E+01	2.828E+00	4.239E+03	3.111E+00	7.760E+00	4.239E+03	8.536E+00	1.823E-02	5.087E+00	2.006E-02
2049	0	0	87 758	96 534	8.557E+00	6.852E+03	9.413E+00	2.286E+00	3.426E+03	2.514E+00	6.271E+00	3.426E+03	6.898E+00	1.474E-02	4.111E+00	1.612E-02
2050	0	0	87 758	96 534	6.915E+00	5.537E+03	7.607E+00	1.847E+00	2.769E+03	2.032E+00	5.068E+00	2.769E+03	5.757E+00	1.191E-02	3.302E+00	1.310E-02
2051	0	0	87 758	96 534	5.589E+00	4.475E+03	6.148E+00	1.493E+00	2.238E+03	1.642E+00	4.096E+00	2.238E+03	4.505E+00	9.625E-03	2.685E+00	1.059E-02
2052	0	0	87 758	96 534	4.517E+00	3.617E+03	4.968E+00	1.206E+00	1.808E+03	1.327E+00	3.310E+00	1.808E+03	3.641E+00	7.778E-03	2.170E+00	8.586E-03
2053	0	0	87 758	96 534	3.650E+00	2.923E+03	4.015E+00	9.750E-01	1.461E+03	1.072E+00	2.675E+00	1.461E+03	2.943E+00	6.286E-03	1.754E+00	6.915E-03
2054	0	0	87 758	96 534	2.950E+00	2.362E+03	3.245E+00	7.879E-01	1.181E+03	8.667E+00	2.162E+00	1.181E+03	2.378E+00	5.080E-03	1.417E+00	5.588E-03
2055	0	0	87 758	96 534	2.384E+00	1.909E+03	2.622E+00	6.368E-01	9.545E+02	7.004E-01	1.747E+00	9.545E+02	1.922E+00	4.105E-03	1.145E+00	4.516E-03
2056	0	0	87 758	96 534	1.927E+00	1.543E+03	2.119E+00	5.146E-01	7.714E+02	5.661E-01	1.412E+00	7.714E+02	1.515E+00	3.318E-03	9.256E-01	3.650E-03
2057	0	0	87 758	96 534	1.557E+00	1.247E+03	1.713E+00	4.159E-01	6.234E+02	4.575E-01	1.141E+00	6.234E+02	1.255E+00	2.681E-03	7.481E-01	2.949E-03
2058	0	0	87 758	96 534	1.258E+00	1.008E+03	1.384E+00	3.361E-01	5.038E+02	3.697E-01	9.222E-01	5.038E+02	1.014E+00	2.167E-03	6.045E-01	2.384E-03
2059	0	0	87 758	96 534	1.017E+00	8.143E+02	1.119E+00	2.716E-01	4.071E+02	2.988E-01	7.453E-01	4.071E+02	8.198E-01	1.751E-03	4.886E-01	1.926E-03
2060	0	0	87 758	96 534	8.218E-01	6.581E+02	9.040E-01	2.195E-01	3.290E+02	2.415E-01	6.023E-01	3.290E+02	6.625E-01	1.415E-03	3.948E-01	1.557E-03
2061	0	0	87 758	96 534	6.641E-01	5.318E+02	7.306E-01	1.774E-01	2.659E+02	1.951E-01	4.867E-01	2.659E+02	5.354E-01	1.144E-03	3.191E-01	1.258E-03
2062	0	0	87 758	96 534	5.367E-01	4.298E+02	5.904E-01	1.434E-01	2.149E+02	1.577E-01	3.934E-01	2.149E+02	4.327E-01	9.243E-04	2.579E-01	1.017E-03
2063	0	0	87 758	96 534	4.338E-01	3.473E+02	4.771E-01	1.159E-01	1.737E+02	1.274E-01	3.179E-01	1.737E+02	3.497E-01	7.470E-04	2.084E-01	8.217E-04
2064	0	0	87 758	96 534	3.505E-01	2.807E+02	3.856E-01	9.364E-02	1.404E+02	1.030E-01	2.569E-01	1.404E+02	2.826E-01	6.037E-04	1.684E-01	6.641E-04
2065	0	0	87 758	96 534	2.833E-01	2.269E+02	3.116E-01	7.567E-02	1.134E+02	8.324E-02	2.076E-01	1.134E+02	2.284E-01	4.829E-04	1.361E-01	5.367E-04
2066	0	0	87 758	96 534	2.289E-01	1.833E+02	2.518E-01	6.115E-02	9.167E+01	6.727E-02	1.678E-01	9.167E+01	1.846E-01	3.943E-04	1.100E-01	4.337E-04
2067	0	0	87 758	96 534	1.850E-01	1.482E+02	2.035E-01	4.942E-02	7.408E+01	5.436E-02	1.356E-01	7.408E+01	1.492E-01	3.186E-04	8.890E-02	3.305E-04
2068	0	0	87 758	96 534	1.495E-01	1.197E+02	1.645E-01	3.994E-02	5.987E+01	4.394E-02	1.096E-01	5.987E+01	1.205E-01	2.575E-04	7.184E-02	2.833E-04
2069	0	0	87 758	96 534	1.208E-01	9.677E+01	1.329E-01	3.228E-02	4.838E+01	3.551E-02	8.857E-02	4.838E+01	9.742E-02	2.081E-04	5.806E-02	2.289E-04
2070	0	0	87 758	96 534	9.766E-02	7.820E+01	1.074E-01	2.609E-02	3.910E+01	2.869E-02	7.157E-02	3.910E+01	7.873E-02	1.682E-04	4.692E-02	1.850E-04
2071	0	0	87 758	96 534	7.892E-02	6.320E+01	8.682E-02	2.108E-02	3.160E+01	2.319E-02	5.784E-02	3.160E+01	6.363E-02	1.359E-04	3.792E-02	1.495E-04
2072	0	0	87 758	96 534	6.378E-02	5.108E+01	7.016E-02	1.704E-02	2.554E+01	1.874E-02	4.675E-02	2.554E+01	5.142E-02	1.098E-04	3.065E-02	1.208E-04
2073	0	0	87 758	96 534	5.155E-02	4.128E+01	5.670E-02	1.377E-02	2.064E+0							

RESULTS

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Closure Year (with 80-year limit) = 2024

Methane = 50 % by volume

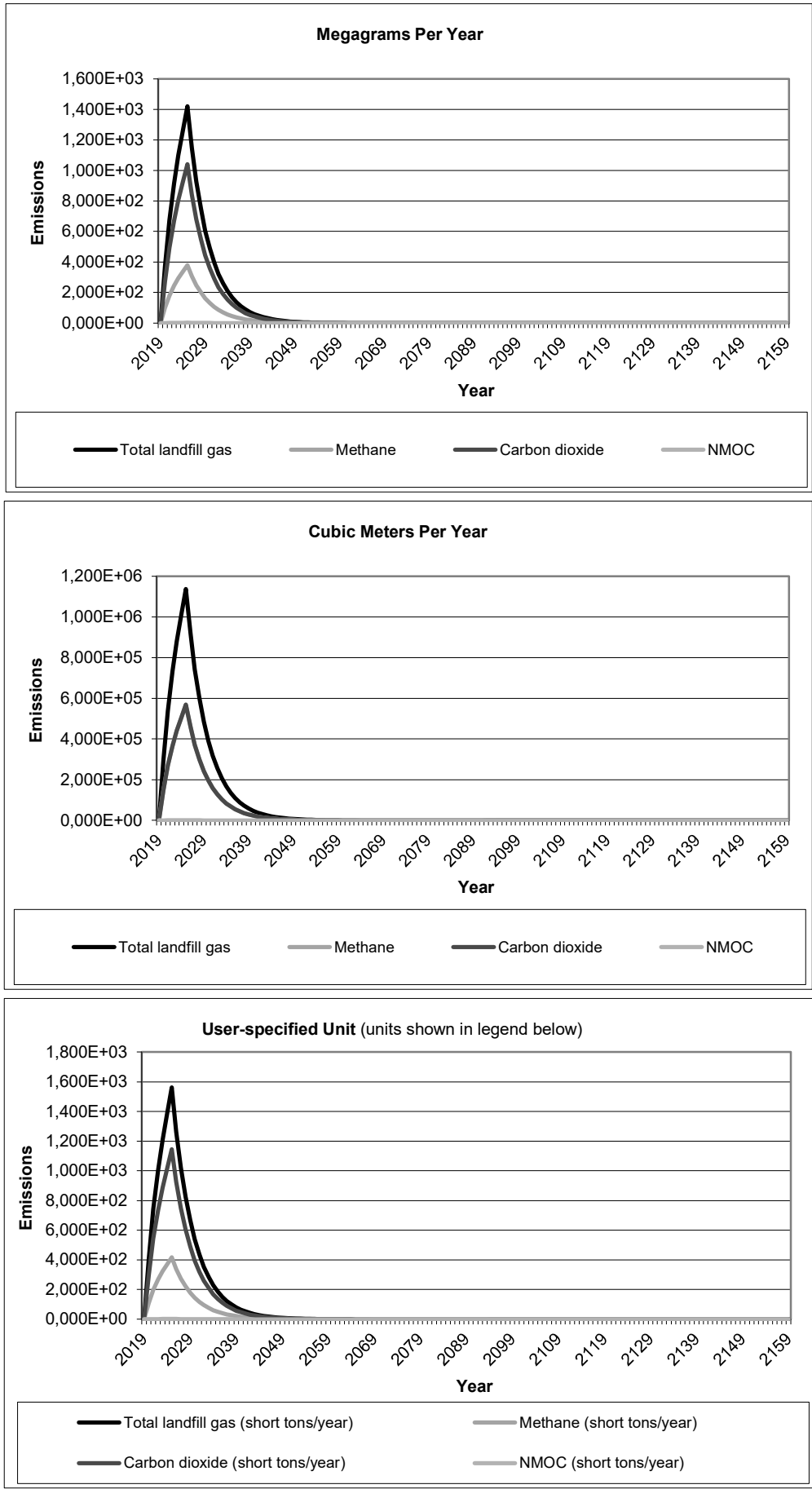
Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.

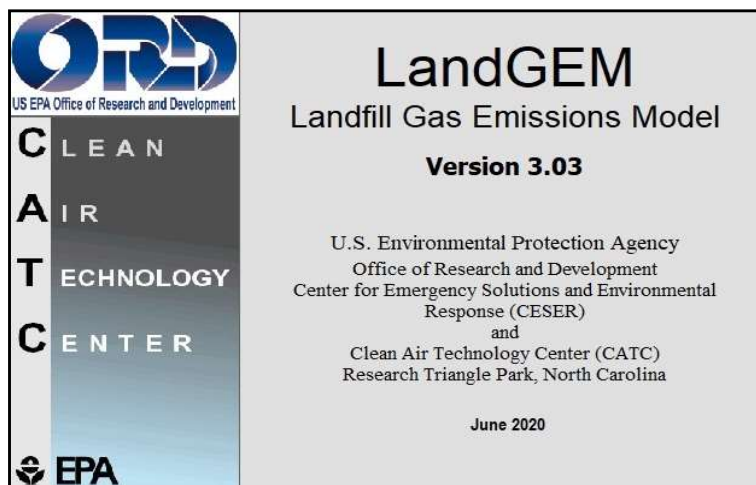
User-specified Unit:

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		Total landfill gas			Methane			Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2089	0	0	87 758	96 534	1.707E-03	1.367E+00	1.877E-03	4.558E-04	6.833E-01	5.014E-04	1.251E-03	6.833E-01	1.376E-03	2.939E-06	8.199E-04	3.233E-06
2090	0	0	87 758	96 534	1.379E-03	1.104E+00	1.517E-03	3.684E-04	5.522E-01	4.052E-04	1.011E-03	5.522E-01	1.112E-03	2.375E-06	6.626E-04	2.613E-06
2091	0	0	87 758	96 534	1.115E-03	8.925E-01	1.226E-03	2.977E-04	4.463E-01	3.275E-04	8.169E-04	4.463E-01	8.986E-04	1.920E-06	5.355E-04	2.111E-06
2092	0	0	87 758	96 534	9.008E-04	7.213E-01	9.909E-04	2.406E-04	3.606E-01	2.647E-04	6.602E-04	3.606E-01	7.262E-04	1.551E-06	4.328E-04	1.706E-06
2093	0	0	87 758	96 534	7.280E-04	5.829E-01	8.008E-04	1.944E-04	2.915E-01	2.139E-04	5.335E-04	2.915E-01	5.869E-04	1.254E-06	3.498E-04	1.379E-06
2094	0	0	87 758	96 534	5.883E-04	4.711E-01	6.471E-04	1.571E-04	2.355E-01	1.729E-04	4.312E-04	2.355E-01	4.743E-04	1.013E-06	2.827E-04	1.114E-06
2095	0	0	87 758	96 534	4.754E-04	3.807E-01	5.230E-04	1.270E-04	1.904E-01	1.397E-04	3.484E-04	1.904E-01	3.833E-04	8.188E-07	2.284E-04	9.007E-07
2096	0	0	87 758	96 534	3.842E-04	3.077E-01	4.227E-04	1.026E-04	1.538E-01	1.129E-04	2.816E-04	1.538E-01	3.098E-04	6.617E-07	1.846E-04	7.279E-07
2097	0	0	87 758	96 534	3.105E-04	2.487E-01	3.416E-04	8.294E-05	1.243E-01	9.124E-05	2.276E-04	1.243E-01	2.503E-04	5.348E-07	1.492E-04	5.882E-07
2098	0	0	87 758	96 534	2.509E-04	2.009E-01	2.760E-04	6.703E-05	1.005E-01	7.373E-05	1.839E-04	1.005E-01	2.023E-04	4.322E-07	1.206E-04	4.754E-07
2099	0	0	87 758	96 534	2.028E-04	1.624E-01	2.231E-04	5.417E-05	8.120E-02	5.959E-05	1.486E-04	8.120E-02	1.635E-04	3.493E-07	9.744E-05	3.842E-07
2100	0	0	87 758	96 534	1.639E-04	1.312E-01	1.803E-04	4.378E-05	6.562E-02	4.816E-05	1.201E-04	6.562E-02	1.321E-04	2.823E-07	7.875E-05	3.105E-07
2101	0	0	87 758	96 534	1.325E-04	1.061E-01	1.457E-04	3.538E-05	5.303E-02	3.892E-05	9.708E-05	5.303E-02	1.068E-04	2.281E-07	6.364E-05	2.509E-07
2102	0	0	87 758	96 534	1.070E-04	8.572E-02	1.177E-04	2.859E-05	4.286E-02	3.145E-05	7.845E-05	4.286E-02	8.630E-05	1.843E-07	5.143E-05	2.028E-07
2103	0	0	87 758	96 534	8.651E-05	6.927E-02	9.516E-05	2.311E-05	3.464E-02	2.542E-05	6.340E-05	3.464E-02	6.974E-05	1.490E-07	4.156E-05	1.639E-07
2104	0	0	87 758	96 534	6.991E-05	5.598E-02	7.690E-05	1.867E-05	2.799E-02	2.054E-05	5.124E-05	2.799E-02	5.636E-05	1.204E-07	3.359E-05	1.324E-07
2105	0	0	87 758	96 534	5.650E-05	4.524E-02	6.215E-05	1.509E-05	2.262E-02	1.660E-05	4.141E-05	2.262E-02	4.555E-05	9.730E-08	2.715E-05	1.070E-07
2106	0	0	87 758	96 534	4.566E-05	3.656E-02	5.023E-05	1.220E-05	1.828E-02	1.342E-05	3.346E-05	1.828E-02	3.681E-05	7.864E-08	2.194E-05	8.650E-08
2107	0	0	87 758	96 534	3.690E-05	2.955E-02	4.059E-05	9.857E-06	1.477E-02	1.084E-05	2.704E-05	1.477E-02	1.773E-05	6.355E-08	1.773E-05	6.991E-08
2108	0	0	87 758	96 534	2.982E-05	2.388E-02	3.280E-05	7.966E-06	1.194E-02	8.762E-06	2.186E-05	1.194E-02	2.404E-05	5.136E-08	1.433E-05	5.649E-08
2109	0	0	87 758	96 534	2.410E-05	1.930E-02	2.651E-05	6.438E-06	9.649E-03	7.081E-06	1.766E-05	9.649E-03	1.943E-05	4.151E-08	1.158E-05	4.566E-08
2110	0	0	87 758	96 534	1.948E-05	1.560E-02	2.143E-05	5.203E-06	7.798E-03	5.723E-06	1.427E-05	7.798E-03	1.570E-05	3.354E-08	9.358E-06	3.690E-08
2111	0	0	87 758	96 534	1.574E-05	1.260E-02	1.731E-05	4.205E-06	6.302E-03	4.625E-06	1.154E-05	6.302E-03	1.269E-05	2.711E-08	7.563E-06	2.982E-08
2112	0	0	87 758	96 534	1.272E-05	1.019E-02	1.399E-05	3.398E-06	5.093E-03	3.738E-06	9.323E-06	5.093E-03	1.026E-05	2.191E-08	6.112E-06	2.410E-08
2113	0	0	87 758	96 534	1.028E-05	8.232E-03	1.131E-05	2.746E-06	4.116E-03	3.021E-06	7.534E-06	4.116E-03	8.288E-06	1.770E-08	4.939E-06	1.948E-08
2114	0	0	87 758	96 534	8.308E-06	6.653E-03	9.139E-06	2.219E-06	3.326E-03	2.441E-06	6.089E-06	3.326E-03	6.698E-06	1.431E-08	3.992E-06	1.574E-08
2115	0	0	87 758	96 534	6.714E-06	5.377E-03	7.386E-06	1.793E-06	2.688E-03	1.973E-06	4.921E-06	2.688E-03	5.413E-06	1.156E-08	3.226E-06	1.272E-08
2116	0	0	87 758	96 534	5.426E-06	4.345E-03	5.969E-06	1.449E-06	2.173E-03	1.594E-06	3.977E-06	2.173E-03	4.375E-06	9.345E-09	2.607E-06	1.028E-08
2117	0	0	87 758	96 534	4.385E-06	3.512E-03	4.824E-06	1.171E-06	1.756E-03	1.288E-06	3.214E-06	1.756E-03	3.535E-06	7.552E-09	2.107E-06	8.307E-09
2118	0	0	87 758	96 534	3.544E-06	2.838E-03	3.898E-06	9.466E-07	1.419E-03	1.041E-06	2.597E-06	1.419E-03	2.857E-06	6.103E-09	1.703E-06	6.714E-09
2119	0	0	87 758	96 534	2.864E-06	2.293E-03	3.151E-06	7.650E-07	1.147E-03	8.415E-07	2.099E-06	1.147E-03	2.309E-06	4.932E-09	1.376E-06	5.426E-09
2120	0	0	87 758	96 534	2.315E-06	1.853E-03	2.546E-06	6.183E-07	9.267E-04	6.801E-07	1.696E-06	9.267E-04	1.866E-06	3.986E-09	1.112E-06	4.385E-09
2121	0	0	87 758	96 534	1.871E-06	1.498E-03	2.058E-06	4.997E-07	7.489E-04	5.496E-07	1.371E-06	7.489E-04	1.508E-06	3.221E-09	8.987E-07	3.544E-09
2122	0	0	87 758	96 534	1.512E-06	1.211E-03	1.663E-06	4.038E-07	6.053E-04	4.442E-07	1.108E-06	6.053E-04	1.219E-06	2.603E-09	7.263E-07	2.864E-09
2123	0	0	87 758	96 534	1.222E-06	9.783E-04	1.344E-06	3.263E-07	4.891E-04	3.590E-07	8.954E-07	4.891E-04	9.849E-07	2.104E-09	5.870E-07	2.314E-09
2124	0	0	87 758	96 534	9.873E-07	7.906E-04	1.086E-06	2.637E-07	3.953E-04	2.901E-07	7.236E-07	3.953E-04	7.960E-07	1.700E-09	4.744E-07	1.870E-09
2125	0	0	87 758	96 534	7.979E-07	6.389E-04	8.777E-07	2.131E-07	3.195E-04	2.344E-07	5.848E-07	3.195E-04	6.433E-07	1.374E-09	3.834E-07	1.512E-09
2126	0	0	87 758	96 534	6.448E-07	5.164E-04	7.093E-07	1.722E-07	2.582E-04	1.895E-07	4.726E-07	2.582E-04	5.199E-07	1.111E-09	3.098E-07	1.222E-09
2127	0	0	87 758	96 534	5.211E-07	4.173E-04	5.732E-07	1.392E-07	2.087E-04	1.531E-07	3.819E-07	2.087E-04	4.201E-07	8.975E-10	2.504E-07	9.872E-10
2128	0	0	87 758	96 534	4.212E-07	3.372E-04	4.633E-07	1.125E-07	1.686E-04	1.237E-07	3.087E-07	1.686E-04	3.395E-07	7.253E-10	2.023E-07	7.978E-10
2129	0	0	87 758	96 534	3.404E-07	2.725E-04	3.744E-07	9.091E-08	1.363E-04	1.000E-07	2.494E-07	1.363E-04	2.744E-07	5.862E-10	1.635E-07	6.448E-10
2130	0	0	87 758	96 534	2.751E-07	2.203E-04	3.026E-07	7.347E-08	1.101E-04	8.082E-08	2.016E-07	1.101E-04	2.218E-07	4.373E-10	1.322E-07	5.211E-10
2131	0	0	87 758	96 534	2.223E-07	1.780E-04	2.445E-07	5.938E-08	8.900E-05	6.532E-08	1.629E-07	8.900E-05	1.792E-07	3.828E-10	1.068E-07	4.211E-10
2132	0	0	87 758	96 534	1.796E-07	1.439E-04	1.976E-07	4.799E-08	7.193E-05	5.278E-08	1.317E-07	7.193E-05	1.448E-07	3.094E-10	8.631E-08	3.403E-10
2133	0	0	87 758	96 534	1.452E-07	1.163E-04	1.597E-07	3.878E-08	5.813E-05	4.266E-08	1.064E-07	5.813E-05	1.170E-07	2.500E-10	6.975E-08	2.750E-10
2134	0	0	87 758	96 534	1.173E-07	9.395E-05	1.291E-07	3.134E-08	4.698E-05	3.447E-08	8.599E-08	4.698E-05	9.459E-08	2.021E-10	5.637E-08	2.223E-10
2135	0	0	87 758	96 534	9.482E-08	7.593E-05	1.043E-07	2.533E-08	3.796E-05	2.786E-08	6.949E-08	3.796E-05	7.644E-08	1.633E-10	4.556E-08	1.796E-10
2136	0	0	87 758	96 534	7.663E-08	6.136E-05	8.429E-08	2.047E-08	3.068E-05	2.252E-08	5.616E-08	3.068E-05	6.178E-08	1.320E-10	3.682E-08	1.452E-10
2137	0	0	87 758	96 534	6.193E-08	4.959E-05	6.812E-08	1.654E-08	2.480E-05	1.820E-08	4.539E-08	2.480E-05	4.993E-08	1.067E-10	2.975E-08	1.173E-10
2138	0	0	87 758	96 534	5.005E-08	4.008E-05	5.505E-08	1.337E-08	2.004E-05	1.471E-08	3.668E-08	2.004E-05	4.035E-08	8.619E-11	2.405E-08	9.481E-11
2139	0	0	87 758	96 534	4.045E-08	3.239E-05	4.449E-08	1.080E-08	1.619E-05	1.188E-08	2.964E-08	1.619E-05	3.261E-08	6.966E-11	1.943E-08	7.662E-11
2140	0	0	87 758	96 534	3.269E-08	2.618E-05	3.596E-08	8.731E-09	1.309E-05	9.604E-09	2.396E-08	1.309E-05	2.635E-08	5.629E-11	1.571E-08	6.192E-11
2141	0	0	87 758	96 534	2.642E-08	2.115E-05	2.906E-08	7.056E-09	1.058E-05	7.762E-09	1.936E-08	1.058E-05	2.130E-08	4.549E-11	1.269E-08	5.004E-11
2142	0	0	87 758	96 534	2.135E-08	1.710E-05	2.348E-08	5.703E-09	8.548E-06	6.273E-09	1.565E-08	8.548E-06	1.721E-08	3.677E-11	1.026E-08	4.044E-11
2143	0	0	87 758	96 534	1.725E-08	1.382E-05	1.898E-08									

GRAPHS

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA





Summary Report

Landfill Name or Identifier: RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

Date: viernes, 30 de septiembre de 2022

Description/Comments:

About LandGEM:

First-Order Decomposition Rate Equation:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_o \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Where,

Q_{CH_4} = annual methane generation in the year of the calculation ($m^3/year$)

i = 1-year time increment

n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance)

j = 0.1-year time increment

k = methane generation rate ($year^{-1}$)

L_o = potential methane generation capacity (m^3/Mg)

M_i = mass of waste accepted in the i^{th} year (Mg)

t_{ij} = age of the j^{th} section of waste mass M_i accepted in the i^{th} year (decimal years, e.g., 3.2 years)

LandGEM is based on a first-order decomposition rate equation for quantifying emissions from the decomposition of landfilled waste in municipal solid waste (MSW) landfills. The software provides a relatively simple approach to estimating landfill gas emissions. Model defaults are based on empirical data from U.S. landfills. Field test data can also be used in place of model defaults when available. Further guidance on EPA test methods, Clean Air Act (CAA) regulations, and other guidance regarding landfill gas emissions and control technology requirements can be found at <http://www.epa.gov/ttnatw01/landfill/landflpg.html>.

LandGEM is considered a screening tool — the better the input data, the better the estimates. Often, there are limitations with the available data regarding waste quantity and composition, variation in design and operating practices over time, and changes occurring over time that impact the emissions potential. Changes to landfill operation, such as operating under wet conditions through leachate recirculation or other liquid additions, will result in generating more gas at a faster rate. Defaults for estimating emissions for this type of operation are being developed to include in LandGEM along with defaults for conventional landfills (no leachate or liquid additions) for developing emission inventories and determining CAA applicability. Refer to the Web site identified above for future updates.

Input Review

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2019	
Landfill Closure Year (with 80-year limit)	2024	
Actual Closure Year (without limit)	2024	
Have Model Calculate Closure Year?	No	
Waste Design Capacity		<i>megagrams</i>

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k	0,213	<i>year⁻¹</i>
Potential Methane Generation Capacity, L ₀	53	<i>m³/Mg</i>
NMOC Concentration	600	<i>ppmv as hexane</i>
Methane Content	50	<i>% by volume</i>

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1:	Total landfill gas
Gas / Pollutant #2:	Methane
Gas / Pollutant #3:	Carbon dioxide
Gas / Pollutant #4:	NMOC

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
2019	14 438	15 882	0	0
2020	14 585	16 044	14 438	15 882
2021	14 518	15 970	29 023	31 925
2022	13 980	15 378	43 541	47 895
2023	14 724	16 196	57 521	63 273
2024	15 513	17 064	72 245	79 470
2025	0	0	87 758	96 534
2026	0	0	87 758	96 534
2027	0	0	87 758	96 534
2028	0	0	87 758	96 534
2029	0	0	87 758	96 534
2030	0	0	87 758	96 534
2031	0	0	87 758	96 534
2032	0	0	87 758	96 534
2033	0	0	87 758	96 534
2034	0	0	87 758	96 534
2035	0	0	87 758	96 534
2036	0	0	87 758	96 534
2037	0	0	87 758	96 534
2038	0	0	87 758	96 534
2039	0	0	87 758	96 534
2040	0	0	87 758	96 534
2041	0	0	87 758	96 534
2042	0	0	87 758	96 534
2043	0	0	87 758	96 534
2044	0	0	87 758	96 534
2045	0	0	87 758	96 534
2046	0	0	87 758	96 534
2047	0	0	87 758	96 534
2048	0	0	87 758	96 534
2049	0	0	87 758	96 534
2050	0	0	87 758	96 534
2051	0	0	87 758	96 534
2052	0	0	87 758	96 534
2053	0	0	87 758	96 534
2054	0	0	87 758	96 534
2055	0	0	87 758	96 534
2056	0	0	87 758	96 534
2057	0	0	87 758	96 534
2058	0	0	87 758	96 534

WASTE ACCEPTANCE RATES (Continued)

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
2059	0	0	87 758	96 534
2060	0	0	87 758	96 534
2061	0	0	87 758	96 534
2062	0	0	87 758	96 534
2063	0	0	87 758	96 534
2064	0	0	87 758	96 534
2065	0	0	87 758	96 534
2066	0	0	87 758	96 534
2067	0	0	87 758	96 534
2068	0	0	87 758	96 534
2069	0	0	87 758	96 534
2070	0	0	87 758	96 534
2071	0	0	87 758	96 534
2072	0	0	87 758	96 534
2073	0	0	87 758	96 534
2074	0	0	87 758	96 534
2075	0	0	87 758	96 534
2076	0	0	87 758	96 534
2077	0	0	87 758	96 534
2078	0	0	87 758	96 534
2079	0	0	87 758	96 534
2080	0	0	87 758	96 534
2081	0	0	87 758	96 534
2082	0	0	87 758	96 534
2083	0	0	87 758	96 534
2084	0	0	87 758	96 534
2085	0	0	87 758	96 534
2086	0	0	87 758	96 534
2087	0	0	87 758	96 534
2088	0	0	87 758	96 534
2089	0	0	87 758	96 534
2090	0	0	87 758	96 534
2091	0	0	87 758	96 534
2092	0	0	87 758	96 534
2093	0	0	87 758	96 534
2094	0	0	87 758	96 534
2095	0	0	87 758	96 534
2096	0	0	87 758	96 534
2097	0	0	87 758	96 534
2098	0	0	87 758	96 534

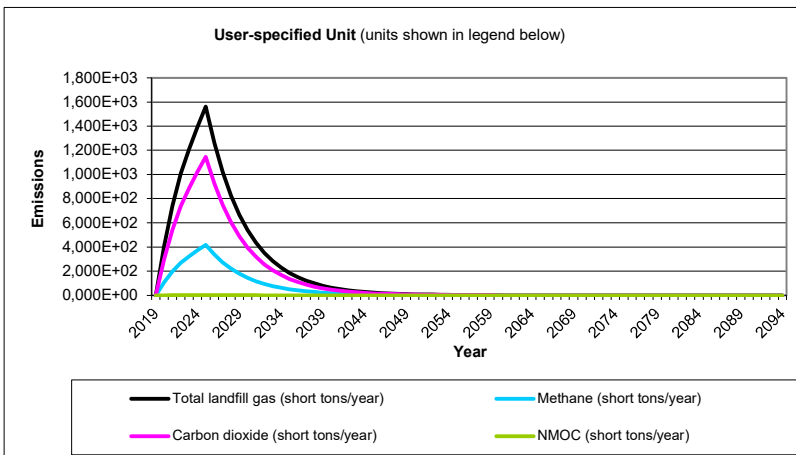
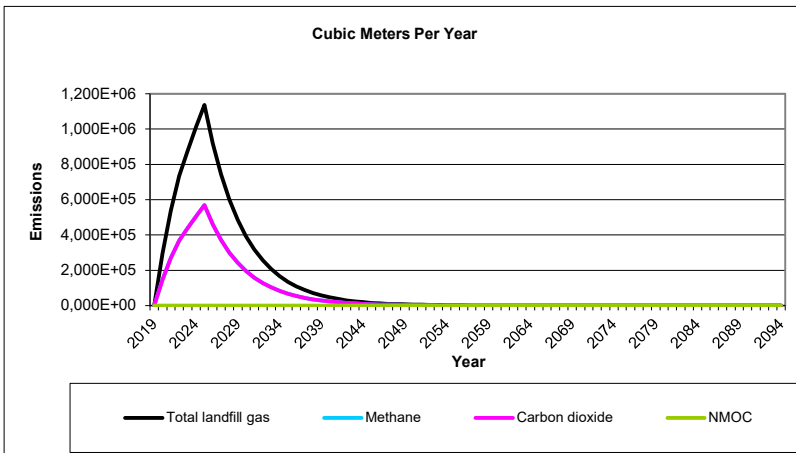
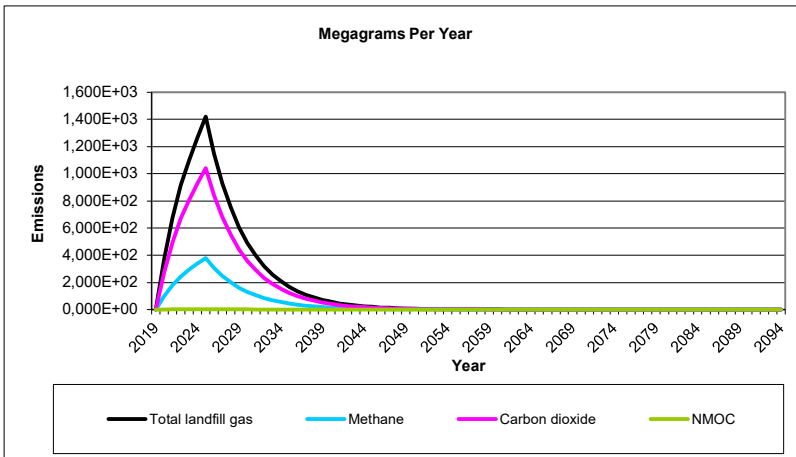
Pollutant Parameters

Gas / Pollutant Default Parameters:				User-specified Pollutant Parameters:	
	Compound	Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Gases	Total landfill gas		0,00		
	Methane		16,04		
	Carbon dioxide		44,01		
	NMOC	4 000	86,18		
Pollutants	1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	0,48	133,41		
	1,1,2,2- Tetrachloroethane - HAP/VOC	1,1	167,85		
	1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride) - HAP/VOC	2,4	98,97		
	1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	0,20	96,94		
	1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	0,41	98,96		
	1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	0,18	112,99		
	2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	50	60,11		
	Acetone	7,0	58,08		
	Acrylonitrile - HAP/VOC	6,3	53,06		
	Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	1,9	78,11		
	Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	11	78,11		
	Bromodichloromethane - VOC	3,1	163,83		
	Butane - VOC	5,0	58,12		
	Carbon disulfide - HAP/VOC	0,58	76,13		
	Carbon monoxide	140	28,01		
	Carbon tetrachloride - HAP/VOC	4,0E-03	153,84		
	Carbonyl sulfide - HAP/VOC	0,49	60,07		
	Chlorobenzene - HAP/VOC	0,25	112,56		
	Chlorodifluoromethane	1,3	86,47		
	Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	1,3	64,52		
	Chloroform - HAP/VOC	0,03	119,39		
	Chloromethane - VOC	1,2	50,49		
	Dichlorobenzene - (HAP for para isomer/VOC)	0,21	147		
	Dichlorodifluoromethane	16	120,91		
	Dichlorofluoromethane - VOC	2,6	102,92		
	Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	14	84,94		
	Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	7,8	62,13		
	Ethane	890	30,07		
	Ethanol - VOC	27	46,08		

Pollutant Parameters (Continued)

Gas / Pollutant Default Parameters:				User-specified Pollutant Parameters:	
	Compound	Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Pollutants	Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	2,3	62,13		
	Ethylbenzene - HAP/VOC	4,6	106,16		
	Ethylene dibromide - HAP/VOC	1,0E-03	187,88		
	Fluorotrichloromethane - VOC	0,76	137,38		
	Hexane - HAP/VOC	6,6	86,18		
	Hydrogen sulfide	36	34,08		
	Mercury (total) - HAP	2,9E-04	200,61		
	Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	7,1	72,11		
	Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	1,9	100,16		
	Methyl mercaptan - VOC	2,5	48,11		
	Pentane - VOC	3,3	72,15		
	Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	3,7	165,83		
	Propane - VOC	11	44,09		
	t-1,2-Dichloroethene - VOC	2,8	96,94		
	Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	39	92,13		
	Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	170	92,13		
	Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	2,8	131,40		
	Vinyl chloride - HAP/VOC	7,3	62,50		
	Xylenes - HAP/VOC	12	106,16		

Graphs



Results

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2019	0	0	0	0	0	0
2020	3,702E+02	2,964E+05	4,072E+02	9,888E+01	1,482E+05	1,088E+02
2021	6,731E+02	5,390E+05	7,404E+02	1,798E+02	2,695E+05	1,978E+02
2022	9,162E+02	7,336E+05	1,008E+03	2,447E+02	3,668E+05	2,692E+02
2023	1,099E+03	8,799E+05	1,209E+03	2,935E+02	4,399E+05	3,229E+02
2024	1,266E+03	1,013E+06	1,392E+03	3,380E+02	5,067E+05	3,718E+02
2025	1,420E+03	1,137E+06	1,563E+03	3,794E+02	5,687E+05	4,174E+02
2026	1,148E+03	9,192E+05	1,263E+03	3,066E+02	4,596E+05	3,373E+02
2027	9,277E+02	7,429E+05	1,021E+03	2,478E+02	3,714E+05	2,726E+02
2028	7,498E+02	6,004E+05	8,247E+02	2,003E+02	3,002E+05	2,203E+02
2029	6,059E+02	4,852E+05	6,665E+02	1,618E+02	2,426E+05	1,780E+02
2030	4,897E+02	3,921E+05	5,386E+02	1,308E+02	1,961E+05	1,439E+02
2031	3,957E+02	3,169E+05	4,353E+02	1,057E+02	1,584E+05	1,163E+02
2032	3,198E+02	2,561E+05	3,518E+02	8,543E+01	1,280E+05	9,397E+01
2033	2,585E+02	2,070E+05	2,843E+02	6,904E+01	1,035E+05	7,594E+01
2034	2,089E+02	1,673E+05	2,298E+02	5,579E+01	8,363E+04	6,137E+01
2035	1,688E+02	1,352E+05	1,857E+02	4,509E+01	6,759E+04	4,960E+01
2036	1,364E+02	1,092E+05	1,501E+02	3,644E+01	5,462E+04	4,008E+01
2037	1,102E+02	8,828E+04	1,213E+02	2,945E+01	4,414E+04	3,239E+01
2038	8,910E+01	7,135E+04	9,801E+01	2,380E+01	3,567E+04	2,618E+01
2039	7,201E+01	5,766E+04	7,921E+01	1,923E+01	2,883E+04	2,116E+01
2040	5,819E+01	4,660E+04	6,401E+01	1,554E+01	2,330E+04	1,710E+01
2041	4,703E+01	3,766E+04	5,173E+01	1,256E+01	1,883E+04	1,382E+01
2042	3,801E+01	3,043E+04	4,181E+01	1,015E+01	1,522E+04	1,117E+01
2043	3,071E+01	2,459E+04	3,379E+01	8,204E+00	1,230E+04	9,025E+00
2044	2,482E+01	1,988E+04	2,730E+01	6,630E+00	9,938E+03	7,293E+00
2045	2,006E+01	1,606E+04	2,207E+01	5,358E+00	8,032E+03	5,894E+00
2046	1,621E+01	1,298E+04	1,783E+01	4,330E+00	6,491E+03	4,763E+00
2047	1,310E+01	1,049E+04	1,441E+01	3,500E+00	5,246E+03	3,850E+00
2048	1,059E+01	8,479E+03	1,165E+01	2,828E+00	4,239E+03	3,111E+00
2049	8,557E+00	6,852E+03	9,413E+00	2,286E+00	3,426E+03	2,514E+00
2050	6,915E+00	5,537E+03	7,607E+00	1,847E+00	2,769E+03	2,032E+00
2051	5,589E+00	4,475E+03	6,148E+00	1,493E+00	2,238E+03	1,642E+00
2052	4,517E+00	3,617E+03	4,968E+00	1,206E+00	1,808E+03	1,327E+00
2053	3,650E+00	2,923E+03	4,015E+00	9,750E-01	1,461E+03	1,072E+00
2054	2,950E+00	2,362E+03	3,245E+00	7,879E-01	1,181E+03	8,667E-01
2055	2,384E+00	1,909E+03	2,622E+00	6,368E-01	9,545E+02	7,004E-01
2056	1,927E+00	1,543E+03	2,119E+00	5,146E-01	7,714E+02	5,661E-01
2057	1,557E+00	1,247E+03	1,713E+00	4,159E-01	6,234E+02	4,575E-01
2058	1,258E+00	1,008E+03	1,384E+00	3,361E-01	5,038E+02	3,697E-01
2059	1,017E+00	8,143E+02	1,119E+00	2,716E-01	4,071E+02	2,988E-01
2060	8,218E-01	6,581E+02	9,040E-01	2,195E-01	3,290E+02	2,415E-01
2061	6,641E-01	5,318E+02	7,306E-01	1,774E-01	2,659E+02	1,951E-01
2062	5,367E-01	4,298E+02	5,904E-01	1,434E-01	2,149E+02	1,577E-01
2063	4,338E-01	3,473E+02	4,771E-01	1,159E-01	1,737E+02	1,274E-01
2064	3,505E-01	2,807E+02	3,856E-01	9,364E-02	1,404E+02	1,030E-01
2065	2,833E-01	2,269E+02	3,116E-01	7,567E-02	1,134E+02	8,324E-02
2066	2,289E-01	1,833E+02	2,518E-01	6,115E-02	9,167E+01	6,727E-02
2067	1,850E-01	1,482E+02	2,035E-01	4,942E-02	7,408E+01	5,436E-02
2068	1,495E-01	1,197E+02	1,645E-01	3,994E-02	5,987E+01	4,394E-02

Results (Continued)

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2069	1,208E-01	9,677E+01	1,329E-01	3,228E-02	4,838E+01	3,551E-02
2070	9,766E-02	7,820E+01	1,074E-01	2,609E-02	3,910E+01	2,869E-02
2071	7,892E-02	6,320E+01	8,682E-02	2,108E-02	3,160E+01	2,319E-02
2072	6,378E-02	5,108E+01	7,016E-02	1,704E-02	2,554E+01	1,874E-02
2073	5,155E-02	4,128E+01	5,670E-02	1,377E-02	2,064E+01	1,515E-02
2074	4,166E-02	3,336E+01	4,582E-02	1,113E-02	1,668E+01	1,224E-02
2075	3,367E-02	2,696E+01	3,703E-02	8,993E-03	1,348E+01	9,892E-03
2076	2,721E-02	2,179E+01	2,993E-02	7,267E-03	1,089E+01	7,994E-03
2077	2,199E-02	1,761E+01	2,419E-02	5,873E-03	8,803E+00	6,461E-03
2078	1,777E-02	1,423E+01	1,955E-02	4,746E-03	7,115E+00	5,221E-03
2079	1,436E-02	1,150E+01	1,580E-02	3,836E-03	5,750E+00	4,219E-03
2080	1,161E-02	9,293E+00	1,277E-02	3,100E-03	4,647E+00	3,410E-03
2081	9,379E-03	7,510E+00	1,032E-02	2,505E-03	3,755E+00	2,756E-03
2082	7,580E-03	6,070E+00	8,338E-03	2,025E-03	3,035E+00	2,227E-03
2083	6,126E-03	4,905E+00	6,738E-03	1,636E-03	2,453E+00	1,800E-03
2084	4,951E-03	3,964E+00	5,446E-03	1,322E-03	1,982E+00	1,455E-03
2085	4,001E-03	3,204E+00	4,401E-03	1,069E-03	1,602E+00	1,176E-03
2086	3,233E-03	2,589E+00	3,557E-03	8,636E-04	1,295E+00	9,500E-04
2087	2,613E-03	2,092E+00	2,874E-03	6,980E-04	1,046E+00	7,678E-04
2088	2,112E-03	1,691E+00	2,323E-03	5,641E-04	8,455E-01	6,205E-04
2089	1,707E-03	1,367E+00	1,877E-03	4,558E-04	6,833E-01	5,014E-04
2090	1,379E-03	1,104E+00	1,517E-03	3,684E-04	5,522E-01	4,052E-04
2091	1,115E-03	8,925E-01	1,226E-03	2,977E-04	4,463E-01	3,275E-04
2092	9,008E-04	7,213E-01	9,909E-04	2,406E-04	3,606E-01	2,647E-04
2093	7,280E-04	5,829E-01	8,008E-04	1,944E-04	2,915E-01	2,139E-04
2094	5,883E-04	4,711E-01	6,471E-04	1,571E-04	2,355E-01	1,729E-04
2095	4,754E-04	3,807E-01	5,230E-04	1,270E-04	1,904E-01	1,397E-04
2096	3,842E-04	3,077E-01	4,227E-04	1,026E-04	1,538E-01	1,129E-04
2097	3,105E-04	2,487E-01	3,416E-04	8,294E-05	1,243E-01	9,124E-05
2098	2,509E-04	2,009E-01	2,760E-04	6,703E-05	1,005E-01	7,373E-05
2099	2,028E-04	1,624E-01	2,231E-04	5,417E-05	8,120E-02	5,959E-05
2100	1,639E-04	1,312E-01	1,803E-04	4,378E-05	6,562E-02	4,816E-05
2101	1,325E-04	1,061E-01	1,457E-04	3,538E-05	5,303E-02	3,892E-05
2102	1,070E-04	8,572E-02	1,177E-04	2,859E-05	4,286E-02	3,145E-05
2103	8,651E-05	6,927E-02	9,516E-05	2,311E-05	3,464E-02	2,542E-05
2104	6,991E-05	5,598E-02	7,690E-05	1,867E-05	2,799E-02	2,054E-05
2105	5,650E-05	4,524E-02	6,215E-05	1,509E-05	2,262E-02	1,660E-05
2106	4,566E-05	3,656E-02	5,023E-05	1,220E-05	1,828E-02	1,342E-05
2107	3,690E-05	2,955E-02	4,059E-05	9,857E-06	1,477E-02	1,084E-05
2108	2,982E-05	2,388E-02	3,280E-05	7,966E-06	1,194E-02	8,762E-06
2109	2,410E-05	1,930E-02	2,651E-05	6,438E-06	9,649E-03	7,081E-06
2110	1,948E-05	1,560E-02	2,143E-05	5,203E-06	7,798E-03	5,723E-06
2111	1,574E-05	1,260E-02	1,731E-05	4,205E-06	6,302E-03	4,625E-06
2112	1,272E-05	1,019E-02	1,399E-05	3,398E-06	5,093E-03	3,738E-06
2113	1,028E-05	8,232E-03	1,131E-05	2,746E-06	4,116E-03	3,021E-06
2114	8,308E-06	6,653E-03	9,139E-06	2,219E-06	3,326E-03	2,441E-06
2115	6,714E-06	5,377E-03	7,386E-06	1,793E-06	2,688E-03	1,973E-06
2116	5,426E-06	4,345E-03	5,969E-06	1,449E-06	2,173E-03	1,594E-06
2117	4,385E-06	3,512E-03	4,824E-06	1,171E-06	1,756E-03	1,288E-06
2118	3,544E-06	2,838E-03	3,898E-06	9,466E-07	1,419E-03	1,041E-06
2119	2,864E-06	2,293E-03	3,151E-06	7,650E-07	1,147E-03	8,415E-07

Results (Continued)

Year	Total landfill gas			Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2120	2,315E-06	1,853E-03	2,546E-06	6,183E-07	9,267E-04	6,801E-07
2121	1,871E-06	1,498E-03	2,058E-06	4,997E-07	7,489E-04	5,496E-07
2122	1,512E-06	1,211E-03	1,663E-06	4,038E-07	6,053E-04	4,442E-07
2123	1,222E-06	9,783E-04	1,344E-06	3,263E-07	4,891E-04	3,590E-07
2124	9,873E-07	7,906E-04	1,086E-06	2,637E-07	3,953E-04	2,901E-07
2125	7,979E-07	6,389E-04	8,777E-07	2,131E-07	3,195E-04	2,344E-07
2126	6,448E-07	5,164E-04	7,093E-07	1,722E-07	2,582E-04	1,895E-07
2127	5,211E-07	4,173E-04	5,732E-07	1,392E-07	2,087E-04	1,531E-07
2128	4,212E-07	3,372E-04	4,633E-07	1,125E-07	1,686E-04	1,237E-07
2129	3,404E-07	2,725E-04	3,744E-07	9,091E-08	1,363E-04	1,000E-07
2130	2,751E-07	2,203E-04	3,026E-07	7,347E-08	1,101E-04	8,082E-08
2131	2,223E-07	1,780E-04	2,445E-07	5,938E-08	8,900E-05	6,532E-08
2132	1,796E-07	1,439E-04	1,976E-07	4,799E-08	7,193E-05	5,278E-08
2133	1,452E-07	1,163E-04	1,597E-07	3,878E-08	5,813E-05	4,266E-08
2134	1,173E-07	9,395E-05	1,291E-07	3,134E-08	4,698E-05	3,447E-08
2135	9,482E-08	7,593E-05	1,043E-07	2,533E-08	3,796E-05	2,786E-08
2136	7,663E-08	6,136E-05	8,429E-08	2,047E-08	3,068E-05	2,252E-08
2137	6,193E-08	4,959E-05	6,812E-08	1,654E-08	2,480E-05	1,820E-08
2138	5,005E-08	4,008E-05	5,505E-08	1,337E-08	2,004E-05	1,471E-08
2139	4,045E-08	3,239E-05	4,449E-08	1,080E-08	1,619E-05	1,188E-08
2140	3,269E-08	2,618E-05	3,596E-08	8,731E-09	1,309E-05	9,604E-09
2141	2,642E-08	2,115E-05	2,906E-08	7,056E-09	1,058E-05	7,762E-09
2142	2,135E-08	1,710E-05	2,348E-08	5,703E-09	8,548E-06	6,273E-09
2143	1,725E-08	1,382E-05	1,898E-08	4,609E-09	6,908E-06	5,069E-09
2144	1,394E-08	1,117E-05	1,534E-08	3,724E-09	5,583E-06	4,097E-09
2145	1,127E-08	9,023E-06	1,240E-08	3,010E-09	4,512E-06	3,311E-09
2146	9,107E-09	7,292E-06	1,002E-08	2,432E-09	3,646E-06	2,676E-09
2147	7,360E-09	5,893E-06	8,096E-09	1,966E-09	2,947E-06	2,162E-09
2148	5,948E-09	4,763E-06	6,542E-09	1,589E-09	2,381E-06	1,748E-09
2149	4,807E-09	3,849E-06	5,287E-09	1,284E-09	1,924E-06	1,412E-09
2150	3,885E-09	3,111E-06	4,273E-09	1,038E-09	1,555E-06	1,141E-09
2151	3,139E-09	2,514E-06	3,453E-09	8,385E-10	1,257E-06	9,224E-10
2152	2,537E-09	2,032E-06	2,791E-09	6,777E-10	1,016E-06	7,454E-10
2153	2,050E-09	1,642E-06	2,255E-09	5,477E-10	8,209E-07	6,024E-10
2154	1,657E-09	1,327E-06	1,823E-09	4,426E-10	6,634E-07	4,869E-10
2155	1,339E-09	1,072E-06	1,473E-09	3,577E-10	5,362E-07	3,935E-10
2156	1,082E-09	8,666E-07	1,190E-09	2,891E-10	4,333E-07	3,180E-10
2157	8,746E-10	7,003E-07	9,621E-10	2,336E-10	3,502E-07	2,570E-10
2158	7,068E-10	5,660E-07	7,775E-10	1,888E-10	2,830E-07	2,077E-10
2159	5,712E-10	4,574E-07	6,283E-10	1,526E-10	2,287E-07	1,678E-10

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2019	0	0	0	0	0	0
2020	2,713E+02	1,482E+05	2,984E+02	6,375E-01	1,778E+02	7,012E-01
2021	4,933E+02	2,695E+05	5,426E+02	1,159E+00	3,234E+02	1,275E+00
2022	6,715E+02	3,668E+05	7,386E+02	1,578E+00	4,402E+02	1,736E+00
2023	8,053E+02	4,399E+05	8,859E+02	1,892E+00	5,279E+02	2,082E+00
2024	9,275E+02	5,067E+05	1,020E+03	2,179E+00	6,080E+02	2,397E+00
2025	1,041E+03	5,687E+05	1,145E+03	2,446E+00	6,825E+02	2,691E+00
2026	8,413E+02	4,596E+05	9,255E+02	1,977E+00	5,515E+02	2,175E+00
2027	6,799E+02	3,714E+05	7,479E+02	1,598E+00	4,457E+02	1,757E+00
2028	5,495E+02	3,002E+05	6,044E+02	1,291E+00	3,602E+02	1,420E+00
2029	4,441E+02	2,426E+05	4,885E+02	1,043E+00	2,911E+02	1,148E+00
2030	3,589E+02	1,961E+05	3,948E+02	8,433E-01	2,353E+02	9,276E-01
2031	2,900E+02	1,584E+05	3,190E+02	6,815E-01	1,901E+02	7,497E-01
2032	2,344E+02	1,280E+05	2,578E+02	5,508E-01	1,537E+02	6,059E-01
2033	1,894E+02	1,035E+05	2,084E+02	4,451E-01	1,242E+02	4,896E-01
2034	1,531E+02	8,363E+04	1,684E+02	3,597E-01	1,004E+02	3,957E-01
2035	1,237E+02	6,759E+04	1,361E+02	2,907E-01	8,110E+01	3,198E-01
2036	9,998E+01	5,462E+04	1,100E+02	2,349E-01	6,554E+01	2,584E-01
2037	8,080E+01	4,414E+04	8,888E+01	1,899E-01	5,297E+01	2,089E-01
2038	6,530E+01	3,567E+04	7,183E+01	1,534E-01	4,281E+01	1,688E-01
2039	5,277E+01	2,883E+04	5,805E+01	1,240E-01	3,460E+01	1,364E-01
2040	4,265E+01	2,330E+04	4,691E+01	1,002E-01	2,796E+01	1,102E-01
2041	3,447E+01	1,883E+04	3,791E+01	8,099E-02	2,259E+01	8,909E-02
2042	2,785E+01	1,522E+04	3,064E+01	6,545E-02	1,826E+01	7,200E-02
2043	2,251E+01	1,230E+04	2,476E+01	5,290E-02	1,476E+01	5,819E-02
2044	1,819E+01	9,938E+03	2,001E+01	4,275E-02	1,193E+01	4,702E-02
2045	1,470E+01	8,032E+03	1,617E+01	3,455E-02	9,638E+00	3,800E-02
2046	1,188E+01	6,491E+03	1,307E+01	2,792E-02	7,789E+00	3,071E-02
2047	9,602E+00	5,246E+03	1,056E+01	2,256E-02	6,295E+00	2,482E-02
2048	7,760E+00	4,239E+03	8,536E+00	1,823E-02	5,087E+00	2,006E-02
2049	6,271E+00	3,426E+03	6,898E+00	1,474E-02	4,111E+00	1,621E-02
2050	5,068E+00	2,769E+03	5,575E+00	1,191E-02	3,322E+00	1,310E-02
2051	4,096E+00	2,238E+03	4,505E+00	9,625E-03	2,685E+00	1,059E-02
2052	3,310E+00	1,808E+03	3,641E+00	7,778E-03	2,170E+00	8,556E-03
2053	2,675E+00	1,461E+03	2,943E+00	6,286E-03	1,754E+00	6,915E-03
2054	2,162E+00	1,181E+03	2,378E+00	5,080E-03	1,417E+00	5,588E-03
2055	1,747E+00	9,545E+02	1,922E+00	4,105E-03	1,145E+00	4,516E-03
2056	1,412E+00	7,714E+02	1,553E+00	3,318E-03	9,256E-01	3,650E-03
2057	1,141E+00	6,234E+02	1,255E+00	2,681E-03	7,481E-01	2,949E-03
2058	9,222E-01	5,038E+02	1,014E+00	2,167E-03	6,045E-01	2,384E-03
2059	7,453E-01	4,071E+02	8,198E-01	1,751E-03	4,886E-01	1,926E-03
2060	6,023E-01	3,290E+02	6,625E-01	1,415E-03	3,948E-01	1,557E-03
2061	4,867E-01	2,659E+02	5,354E-01	1,144E-03	3,191E-01	1,258E-03
2062	3,934E-01	2,149E+02	4,327E-01	9,243E-04	2,579E-01	1,017E-03
2063	3,179E-01	1,737E+02	3,497E-01	7,470E-04	2,084E-01	8,217E-04
2064	2,569E-01	1,404E+02	2,826E-01	6,037E-04	1,684E-01	6,641E-04
2065	2,076E-01	1,134E+02	2,284E-01	4,879E-04	1,361E-01	5,367E-04
2066	1,678E-01	9,167E+01	1,846E-01	3,943E-04	1,100E-01	4,337E-04
2067	1,356E-01	7,408E+01	1,492E-01	3,186E-04	8,890E-02	3,505E-04
2068	1,096E-01	5,987E+01	1,205E-01	2,575E-04	7,184E-02	2,833E-04

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2069	8,857E-02	4,838E+01	9,742E-02	2,081E-04	5,806E-02	2,289E-04
2070	7,157E-02	3,910E+01	7,873E-02	1,682E-04	4,692E-02	1,850E-04
2071	5,784E-02	3,160E+01	6,363E-02	1,359E-04	3,792E-02	1,495E-04
2072	4,675E-02	2,554E+01	5,142E-02	1,098E-04	3,065E-02	1,208E-04
2073	3,778E-02	2,064E+01	4,156E-02	8,877E-05	2,477E-02	9,765E-05
2074	3,053E-02	1,668E+01	3,358E-02	7,174E-05	2,001E-02	7,892E-05
2075	2,467E-02	1,348E+01	2,714E-02	5,798E-05	1,618E-02	6,378E-05
2076	1,994E-02	1,089E+01	2,193E-02	4,686E-05	1,307E-02	5,154E-05
2077	1,611E-02	8,803E+00	1,773E-02	3,787E-05	1,056E-02	4,165E-05
2078	1,302E-02	7,115E+00	1,433E-02	3,060E-05	8,538E-03	3,366E-05
2079	1,052E-02	5,750E+00	1,158E-02	2,473E-05	6,900E-03	2,720E-05
2080	8,506E-03	4,647E+00	9,356E-03	1,999E-05	5,576E-03	2,199E-05
2081	6,874E-03	3,755E+00	7,561E-03	1,615E-05	4,506E-03	1,777E-05
2082	5,555E-03	3,035E+00	6,111E-03	1,305E-05	3,642E-03	1,436E-05
2083	4,489E-03	2,453E+00	4,938E-03	1,055E-05	2,943E-03	1,160E-05
2084	3,628E-03	1,982E+00	3,991E-03	8,526E-06	2,379E-03	9,378E-06
2085	2,932E-03	1,602E+00	3,225E-03	6,890E-06	1,922E-03	7,579E-06
2086	2,370E-03	1,295E+00	2,607E-03	5,568E-06	1,553E-03	6,125E-06
2087	1,915E-03	1,046E+00	2,107E-03	4,500E-06	1,255E-03	4,950E-06
2088	1,548E-03	8,455E-01	1,702E-03	3,637E-06	1,015E-03	4,000E-06
2089	1,251E-03	6,833E-01	1,376E-03	2,939E-06	8,199E-04	3,233E-06
2090	1,011E-03	5,522E-01	1,112E-03	2,375E-06	6,626E-04	2,613E-06
2091	8,169E-04	4,463E-01	8,986E-04	1,920E-06	5,355E-04	2,111E-06
2092	6,602E-04	3,606E-01	7,262E-04	1,551E-06	4,328E-04	1,706E-06
2093	5,335E-04	2,915E-01	5,869E-04	1,254E-06	3,498E-04	1,379E-06
2094	4,312E-04	2,355E-01	4,743E-04	1,013E-06	2,827E-04	1,114E-06
2095	3,484E-04	1,904E-01	3,833E-04	8,188E-07	2,284E-04	9,007E-07
2096	2,816E-04	1,538E-01	3,098E-04	6,617E-07	1,846E-04	7,279E-07
2097	2,276E-04	1,243E-01	2,503E-04	5,348E-07	1,492E-04	5,882E-07
2098	1,839E-04	1,005E-01	2,023E-04	4,322E-07	1,206E-04	4,754E-07
2099	1,486E-04	8,120E-02	1,635E-04	3,493E-07	9,744E-05	3,842E-07
2100	1,201E-04	6,562E-02	1,321E-04	2,823E-07	7,875E-05	3,105E-07
2101	9,708E-05	5,303E-02	1,068E-04	2,281E-07	6,364E-05	2,509E-07
2102	7,845E-05	4,286E-02	8,630E-05	1,843E-07	5,143E-05	2,028E-07
2103	6,340E-05	3,464E-02	6,974E-05	1,490E-07	4,156E-05	1,639E-07
2104	5,124E-05	2,799E-02	5,636E-05	1,204E-07	3,359E-05	1,324E-07
2105	4,141E-05	2,262E-02	4,555E-05	9,730E-08	2,715E-05	1,070E-07
2106	3,346E-05	1,828E-02	3,681E-05	7,864E-08	2,194E-05	8,650E-08
2107	2,704E-05	1,477E-02	2,975E-05	6,355E-08	1,773E-05	6,991E-08
2108	2,186E-05	1,194E-02	2,404E-05	5,136E-08	1,433E-05	5,649E-08
2109	1,766E-05	9,649E-03	1,943E-05	4,151E-08	1,158E-05	4,566E-08
2110	1,427E-05	7,798E-03	1,570E-05	3,354E-08	9,358E-06	3,690E-08
2111	1,154E-05	6,302E-03	1,269E-05	2,711E-08	7,563E-06	2,982E-08
2112	9,323E-06	5,093E-03	1,026E-05	2,191E-08	6,112E-06	2,410E-08
2113	7,534E-06	4,116E-03	8,288E-06	1,770E-08	4,939E-06	1,948E-08
2114	6,089E-06	3,326E-03	6,698E-06	1,431E-08	3,992E-06	1,574E-08
2115	4,921E-06	2,688E-03	5,413E-06	1,156E-08	3,226E-06	1,272E-08
2116	3,977E-06	2,173E-03	4,375E-06	9,345E-09	2,607E-06	1,028E-08
2117	3,214E-06	1,756E-03	3,535E-06	7,552E-09	2,107E-06	8,307E-09
2118	2,597E-06	1,419E-03	2,857E-06	6,103E-09	1,703E-06	6,714E-09
2119	2,099E-06	1,147E-03	2,309E-06	4,932E-09	1,376E-06	5,426E-09

Results (Continued)

Year	Carbon dioxide			NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2120	1,696E-06	9,267E-04	1,866E-06	3,986E-09	1,112E-06	4,385E-09
2121	1,371E-06	7,489E-04	1,508E-06	3,221E-09	8,987E-07	3,544E-09
2122	1,108E-06	6,053E-04	1,219E-06	2,603E-09	7,263E-07	2,864E-09
2123	8,954E-07	4,891E-04	9,849E-07	2,104E-09	5,870E-07	2,314E-09
2124	7,236E-07	3,953E-04	7,960E-07	1,700E-09	4,744E-07	1,870E-09
2125	5,848E-07	3,195E-04	6,433E-07	1,374E-09	3,834E-07	1,512E-09
2126	4,726E-07	2,582E-04	5,199E-07	1,111E-09	3,098E-07	1,222E-09
2127	3,819E-07	2,087E-04	4,201E-07	8,975E-10	2,504E-07	9,872E-10
2128	3,087E-07	1,686E-04	3,395E-07	7,253E-10	2,023E-07	7,978E-10
2129	2,494E-07	1,363E-04	2,744E-07	5,862E-10	1,635E-07	6,448E-10
2130	2,016E-07	1,101E-04	2,218E-07	4,737E-10	1,322E-07	5,211E-10
2131	1,629E-07	8,900E-05	1,792E-07	3,828E-10	1,068E-07	4,211E-10
2132	1,317E-07	7,193E-05	1,448E-07	3,094E-10	8,631E-08	3,403E-10
2133	1,064E-07	5,813E-05	1,170E-07	2,500E-10	6,975E-08	2,750E-10
2134	8,599E-08	4,698E-05	9,459E-08	2,021E-10	5,637E-08	2,223E-10
2135	6,949E-08	3,796E-05	7,644E-08	1,633E-10	4,556E-08	1,796E-10
2136	5,616E-08	3,068E-05	6,178E-08	1,320E-10	3,682E-08	1,452E-10
2137	4,539E-08	2,480E-05	4,993E-08	1,067E-10	2,975E-08	1,173E-10
2138	3,668E-08	2,004E-05	4,035E-08	8,619E-11	2,405E-08	9,481E-11
2139	2,964E-08	1,619E-05	3,261E-08	6,966E-11	1,943E-08	7,662E-11
2140	2,396E-08	1,309E-05	2,635E-08	5,629E-11	1,571E-08	6,192E-11
2141	1,936E-08	1,058E-05	2,130E-08	4,549E-11	1,269E-08	5,004E-11
2142	1,565E-08	8,548E-06	1,721E-08	3,677E-11	1,026E-08	4,044E-11
2143	1,264E-08	6,908E-06	1,391E-08	2,971E-11	8,289E-09	3,268E-11
2144	1,022E-08	5,583E-06	1,124E-08	2,401E-11	6,699E-09	2,641E-11
2145	8,259E-09	4,512E-06	9,084E-09	1,941E-11	5,414E-09	2,135E-11
2146	6,674E-09	3,646E-06	7,342E-09	1,568E-11	4,375E-09	1,725E-11
2147	5,394E-09	2,947E-06	5,933E-09	1,267E-11	3,536E-09	1,394E-11
2148	4,359E-09	2,381E-06	4,795E-09	1,024E-11	2,858E-09	1,127E-11
2149	3,523E-09	1,924E-06	3,875E-09	8,278E-12	2,309E-09	9,106E-12
2150	2,847E-09	1,555E-06	3,132E-09	6,690E-12	1,866E-09	7,359E-12
2151	2,301E-09	1,257E-06	2,531E-09	5,406E-12	1,508E-09	5,947E-12
2152	1,859E-09	1,016E-06	2,045E-09	4,369E-12	1,219E-09	4,806E-12
2153	1,503E-09	8,209E-07	1,653E-09	3,531E-12	9,851E-10	3,884E-12
2154	1,214E-09	6,634E-07	1,336E-09	2,854E-12	7,961E-10	3,139E-12
2155	9,814E-10	5,362E-07	1,080E-09	2,306E-12	6,434E-10	2,537E-12
2156	7,931E-10	4,333E-07	8,725E-10	1,864E-12	5,200E-10	2,050E-12
2157	6,410E-10	3,502E-07	7,051E-10	1,506E-12	4,202E-10	1,657E-12
2158	5,180E-10	2,830E-07	5,698E-10	1,217E-12	3,396E-10	1,339E-12
2159	4,186E-10	2,287E-07	4,605E-10	9,837E-13	2,744E-10	1,082E-12

MODELO DE BIOGÁS DE ECUADOR [V1.0]

INSTRUCCIONES:

PARÁMETROS:

Las celdas con el texto **verde** son las celdas de entrada. Las instrucciones en **negritas** describen los requerimientos mínimos de entrada.

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS

RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA

1-Sep-22

Año de Inicio de Operaciones	2019
Año de Término de Operaciones	2024
Precipitación Promedio Anual:	4600 mm/año

Contenido de Metano en el Biogás:	50%
Índice de Generación de Metano (k):	0,080 1/año
Generación Potencial de Metano (L ₀):	84 m ³ /ton
L ₀ equivalente en unidades inglesas:	2690 ft ³ /ton

Ingresar el año en que el relleno sanitario empezó y dejó de recibir residuos.

Ingresar las toneladas dispuestas por año en la Columna B.

Seleccione la precipitación promedio anual de la estación meteorológica más cercana al relleno sanitario. Consultar el Sitio Web www.worldclimate.com.

Dejar el valor del contenido de metano en 50%, a menos que se requiera cambiar el valor. El Modelo asume una concentración de metano de 50%. Si el valor introducido es menor a 50%, el flujo de biogás proyectado aumentará, si el valor es mayor a 50% el flujo de biogás proyectado disminuirá.

El valor k se calcula automáticamente en base a la precipitación promedio anual.

El valor L₀ será calculado y redondeado al valor entero más cercano (m³/Mg) basado en la precipitación promedio anual.

Eficiencia del Sistema de Recolección: Ingresar los valores conocidos y/o los valores proyectados para cada año en la Columna D.

La eficiencia deberá basarse en una evaluación independiente del sistema de recuperación (ver las instrucciones en el Manual de Usuario).

Datos de Recuperación de Biogás: Ingresar en la Columna F el flujo de biogás promedio anual con metano a 50%. **DEJAR EN BLANCO SI EL VALOR ES CERO.**

Año	Toneladas	Toneladas	Toneladas	Eficiencia del	Recuperación
	Dispuestas (ton/año)	Acumuladas (ton)	Masa Disponibles	Sistema de Recolección	Actual (m ³ /hr)
2019	14 438	14438	100%	60%	
2020	14 585	29023	100%	60%	
2021	14 518	43541	100%	60%	
2022	13 980	57521	100%	60%	
2023	14 724	72245	100%	60%	
2024	15 513	87758	100%	60%	
2025	0	87758	100%	60%	
2026	0	87758	100%	60%	
2027	0	87758	100%	60%	
2028	0	87758	100%	60%	
2029	0	87758	100%	60%	
2030	0	87758	100%	60%	
2031	0	87758	100%	60%	
2032	0	87758	100%	60%	
2033	0	87758	100%	60%	
2034	0	87758	100%	60%	
2035	0	87758	100%	60%	
2036	0	87758	100%	60%	
2037	0	87758	100%	60%	
2038	0	87758	100%	60%	
2039	0	87758	100%	60%	
2040	0	87758	100%	60%	
2041	0	87758	100%	60%	
2042	0	87758	100%	60%	
2043	0	87758	100%	60%	
2044	0	87758	100%	60%	
2045	0	87758	100%	60%	
2046	0	87758	100%	60%	
2047	0	87758	100%	60%	
2048	0	87758	100%	60%	
2049	0	87758	100%	60%	
2050	0	87758	100%	60%	
2051	0	87758	100%	60%	
2052	0	87758	100%	60%	
2053	0	87758	100%	60%	
2054	0	87758	100%	60%	
2055	0	87758	100%	60%	
2056	0	87758	100%	60%	
2057	0	87758	100%	60%	
2058	0	87758	100%	60%	
2059	0	87758	100%	60%	
2060	0	87758	100%	60%	
2061	0	87758	100%	60%	
2062	0	87758	100%	60%	

TABLA 1 - TABLA DE CALCULO DE VALORES

k Y L₀

Precipitación (mm/año)	k Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	k Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios=>60%	L ₀ (m ³ / Tonelada métrica) Contenido Medio de Residuos de Comida o Alimenticios =<50%	L ₀ (m ³ / Tonelada métrica) Alto Contenido de Residuos de Comida o Alimenticios =>60%
0-249	0,04	0,043	60	62
250-499	0,05	0,053	80	83
500-999	0,065	0,69	84	87
1000 - 1999 o Saturado	0,08	0,085	84	87
2000+ o Saturado	0,08	0,085	84	87

TABLA 1 - TABLA DE ENTRADA DEL MODELO

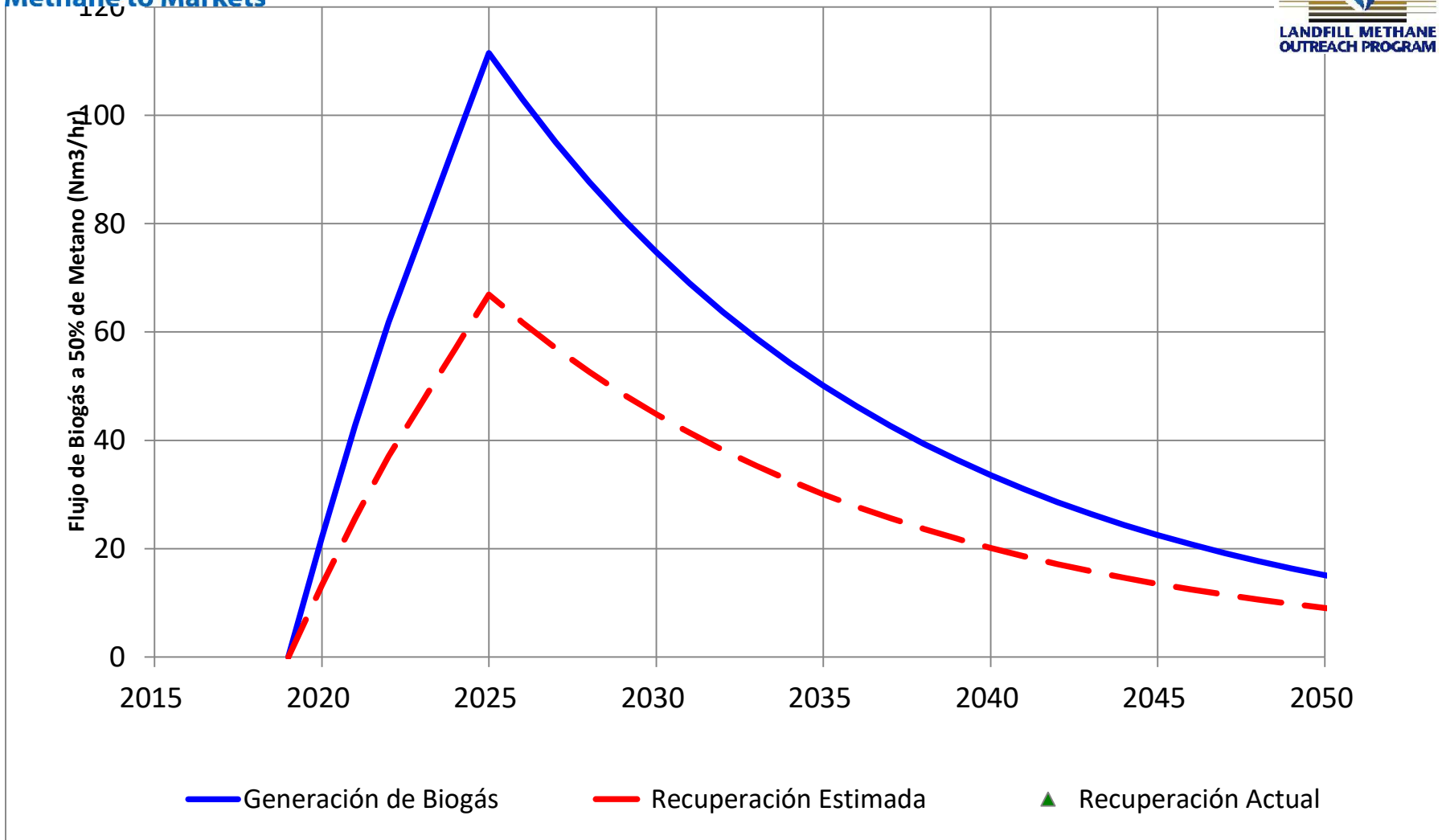
Eficiencia del Sistema de Recolección

Sistema de Recolección	Arcilla Saturada / Geomembrana	Arcilla No-Saturada
Pozos Verticales de Gas Perforados o Colectores Horizontales	80%	70%
Pozos de Venteo Pasivos Convertidos/Modificados (existentes)	60%	40%

Conversiones: 0,03121 m³/Mg por ft³/ton
1,10231 ton por Mg
35,3147 ft³ por m³

2063	0	87758	100%	60%
2064	0	87758	100%	60%
2065	0	87758	100%	60%
2066	0	87758	100%	60%
2067	0	87758	100%	60%
2068	0	87758	100%	60%
2069	0	87758	100%	60%
2070	0	87758	100%	60%
2071	0	87758	100%	60%
2072	0	87758	100%	60%
2073	0	87758	100%	60%
2074	0	87758	100%	60%
2075	0	87758	100%	60%
2076	0	87758	100%	60%

RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA



**PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS
RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PASTAZA**

Año	Indice de Disposición (Ton/año)	Toneladas Acumuladas (Ton)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Recolección (%)	Recuperación de Biogás del Sistema Existente/Planeado		
			(m ³ /min)	(m ³ /hr)	(mmBTU/año)		(m ³ /min)	(m ³ /hr)	(mmBTU/año)
2019	14 438	14 438	0,0	0	0	60%	0,0	0	0
2020	14 585	29 023	0,4	22	3 466	60%	0,2	13	2 080
2021	14 518	43 541	0,7	43	6 701	60%	0,4	26	4 021
2022	13 980	57 521	1,0	62	9 671	60%	0,6	37	5 803
2023	14 724	72 245	1,3	78	12 284	60%	0,8	47	7 370
2024	15 513	87 758	1,6	95	14 874	60%	1,0	57	8 924
2025	0	87 758	1,9	112	17 454	60%	1,1	67	10 473
2026	0	87 758	1,7	103	16 112	60%	1,0	62	9 667
2027	0	87 758	1,6	95	14 874	60%	1,0	57	8 924
2028	0	87 758	1,5	88	13 730	60%	0,9	53	8 238
2029	0	87 758	1,3	81	12 674	60%	0,8	49	7 605
2030	0	87 758	1,2	75	11 700	60%	0,7	45	7 020
2031	0	87 758	1,1	69	10 800	60%	0,7	41	6 480
2032	0	87 758	1,1	64	9 970	60%	0,6	38	5 982
2033	0	87 758	1,0	59	9 204	60%	0,6	35	5 522
2034	0	87 758	0,9	54	8 496	60%	0,5	33	5 098
2035	0	87 758	0,8	50	7 843	60%	0,5	30	4 706
2036	0	87 758	0,8	46	7 240	60%	0,5	28	4 344
2037	0	87 758	0,7	43	6 683	60%	0,4	26	4 010
2038	0	87 758	0,7	39	6 169	60%	0,4	24	3 702
2039	0	87 758	0,6	36	5 695	60%	0,4	22	3 417
2040	0	87 758	0,6	34	5 257	60%	0,3	20	3 154
2041	0	87 758	0,5	31	4 853	60%	0,3	19	2 912
2042	0	87 758	0,5	29	4 480	60%	0,3	17	2 688
2043	0	87 758	0,4	26	4 135	60%	0,3	16	2 481
2044	0	87 758	0,4	24	3 817	60%	0,2	15	2 290
2045	0	87 758	0,4	23	3 524	60%	0,2	14	2 114
2046	0	87 758	0,3	21	3 253	60%	0,2	12	1 952
2047	0	87 758	0,3	19	3 003	60%	0,2	12	1 802
2048	0	87 758	0,3	18	2 772	60%	0,2	11	1 663
2049	0	87 758	0,3	16	2 559	60%	0,2	10	1 535
2050	0	87 758	0,3	15	2 362	60%	0,2	9	1 417
2051	0	87 758	0,2	14	2 181	60%	0,1	8	1 308
2052	0	87 758	0,2	13	2 013	60%	0,1	8	1 208
2053	0	87 758	0,2	12	1 858	60%	0,1	7	1 115
2054	0	87 758	0,2	11	1 715	60%	0,1	7	1 029
2055	0	87 758	0,2	10	1 583	60%	0,1	6	950
2056	0	87 758	0,2	9	1 462	60%	0,1	6	877
2057	0	87 758	0,1	9	1 349	60%	0,1	5	810
2058	0	87 758	0,1	8	1 246	60%	0,1	5	747
2059	0	87 758	0,1	7	1 150	60%	0,1	4	690
2060	0	87 758	0,1	7	1 061	60%	0,1	4	637
2061	0	87 758	0,1	6	980	60%	0,1	4	588
2062	0	87 758	0,1	6	904	60%	0,1	3	543
2063	0	87 758	0,1	5	835	60%	0,1	3	501
2064	0	87 758	0,1	5	771	60%	0,0	3	462
2065	0	87 758	0,1	5	711	60%	0,0	3	427
2066	0	87 758	0,1	4	657	60%	0,0	3	394
2067	0	87 758	0,1	4	606	60%	0,0	2	364
2068	0	87 758	0,1	4	560	60%	0,0	2	336
2069	0	87 758	0,1	3	517	60%	0,0	2	310
2070	0	87 758	0,1	3	477	60%	0,0	2	286
2071	0	87 758	0,0	3	440	60%	0,0	2	264
2072	0	87 758	0,0	3	406	60%	0,0	2	244
2073	0	87 758	0,0	2	375	60%	0,0	1	225
2074	0	87 758	0,0	2	346	60%	0,0	1	208
2075	0	87 758	0,0	2	320	60%	0,0	1	192
2076	0	87 758	0,0	2	295	60%	0,0	1	177
2077	0	87 758	0,0	2	272	60%	0,0	1	163
2078	0	87 758	0,0	2	251	60%	0,0	1	151

NOTES:

Contenido de Metano en el Biogás: 50%
 Indice de Generación de Metano (k): 0,080 1/año
 Generación Potencial de Metano (L₀): 84 m³/ton



Product Catalog



*Reliable power when and where you need it.
Clean and simple.*

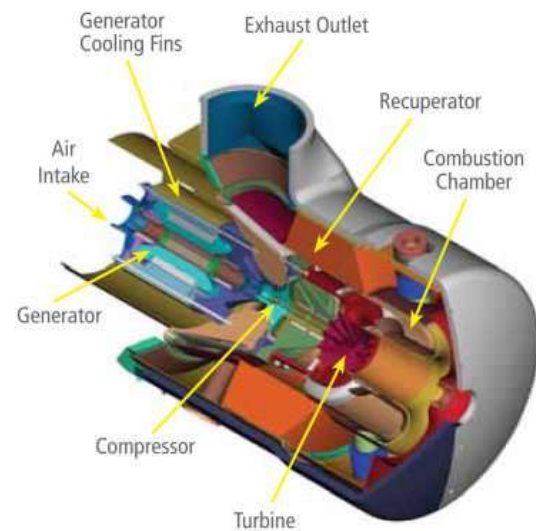


Capstone Microturbines

Capstone microturbines are used in distributed power generation applications including cogeneration, resource recovery, secure power, and hybrid electric vehicles (HEV).

Low-emission, clean-and-green Capstone microturbines are scalable from 30kW to 10MW. The C1000 Power Package, the world's first megawatt microturbine power system, can be configured into smaller 800kW and 600kW solutions – all within a single ISO-type container. Models are available that operate on: Natural Gas, Propane, Landfill Gas, Digester Gas, Diesel, Aviation, and Kerosene fuels.

- Ultra-low emissions
- One moving part – minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing – no lubricating oil or coolant required
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated synchronization and protection
- Reliable – tens of millions of run hours and counting



Model	Fuels	Power Output ⁽¹⁾	Electrical Efficiency	Exhaust Gas Flow		Exhaust Temperature		Net Heat Rate		Dimensions ⁽²⁾ (W x D x H)	
		kW	%	kg/s	lbm/s	C°	F°	MJ/kWh	btu/kWh	m	in
GASEOUS FUELS⁽³⁾											
C30 LP	NG	28	25	0.31	0.68	275	530	13.8	13,100	0.76 x 1.5 x 1.8	30 x 60 x 70
C30 HP	NG, P, LG, DG	30	26	0.31	0.68	275	530	13.8	13,100	0.76 x 1.5 x 1.8	30 x 60 x 70
C30 HZLC ⁽⁴⁾	NG	30	26	0.32	0.70	275	530	13.8	13,100	0.87 x 2.9 x 2.2	34 x 112 x 85
C65	NG, P	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 1.9 x 1.8	30 x 77 x 76
C65 ICHP	NG, P, LG, DG	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.4	30 x 87 x 93
C65 CARB	NG	65	28	0.51	1.13	311	592	12.9	12,200	0.76 x 2.2 x 2.6	30 x 87 x 103
C65 CARB	LG, DG	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.6	30 x 77 x 85
C65 HZLC ⁽⁴⁾	NG	65	29	0.50	1.09	325	617	12.9	12,200	0.87 x 3.2 x 2.3	35 x 128 x 90
C200 LP	NG	190	31	1.3	2.9	280	535	11.6	11,000	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98
C200 HP	NG, P, LG, DG	200	33	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98
C200 HZLC ⁽⁴⁾	NG	200	33	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.9 x 3.2 x 3.1	74 x 126 x 122
C600 LP	NG	570	31	4.0	8.8	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C600 HP	NG, P, LG, DG	600	33	4.0	8.8	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C800 LP	NG	760	31	5.3	11.7	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C800 HP	NG, P, LG, DG	800	33	5.3	11.7	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C1000 LP	NG	950	31	6.7	14.7	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C1000 HP	NG, P, LG, DG	1000	33	6.7	14.7	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
LIQUID FUELS⁽⁵⁾											
C30	D, A, K	29	25	0.31	0.69	275	530	14.4	13,700	0.76 x 1.5 x 1.9	30 x 60 x 70
C65	D, A, K	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 1.9 x 1.8	30 x 77 x 76
C65 ICHP	D, A, K	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.4	30 x 87 x 93
C200	D	190	30	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98

⁽¹⁾ Nominal full power performance at ISO conditions: 59° F, 14.696 psia, 60% RH

⁽²⁾ Height dimensions are to the roofline. Exhaust outlet can extend up to 7 inches above the roofline.

⁽³⁾ Models available to operate on these different fuels: NG – Natural Gas; P – Propane; LG – Landfill Gas; DG – Digester Gas

⁽⁴⁾ Hazardous Location units suitable for use in potentially explosive atmospheres (UL Class I, Division 2 or Atex Class I, Zone 2)

⁽⁵⁾ Models available to operate on these different fuels: D – Diesel; A – Aviation; K – Kerosene

Specifications are not warranted and are subject to change without notice.



C 200



C 1000



Capstone Turbine Corporation® is the world's leading producer of low-emission microturbine systems, and was first to market with commercially viable air bearing turbine technology. The company has shipped thousands of Capstone turbines to customers worldwide. These award-winning systems have logged millions of documented runtime operating hours.

Capstone is a member of the U.S. Environmental Protection Agency's Combined Heat and Power Partnership which is committed to improving the efficiency of the nation's energy infrastructure and reducing emissions of pollutants and greenhouse gases.

A UL-Certified ISO 9001:2008 and ISO 14001:2004 company, Capstone is headquartered in the Los Angeles area with sales and/or service centers in China, Mexico, Singapore, South America, the United Kingdom, and the United States.

For more information about Capstone Turbine Corporation and its clean-and-green microturbine technology solutions, please visit www.capstoneturbine.com or call 818.734.5300.



Capstone Turbine Corporation
21211 Nordhoff Street
Chatsworth • CA • 91311
818.734.5300 • Fax 818.734.5320
866.422.7786 • www.capstoneturbine.com

©2010 Capstone Turbine Corporation. P0212 CAP115

