

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD Y LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS  
PRODUCIDO EN UN RELLENO SANITARIO A ESCALA LABORATORIO EN LA  
UNIVERSIDAD LIBRE SEDE BOSQUE POPULAR

AUTOR:

MIGUEL ÁNGEL ÁVILA PICO

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD Y LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS  
PRODUCIDO EN UN RELLENO SANITARIO A ESCALA LABORATORIO EN LA  
UNIVERSIDAD LIBRE SEDE BOSQUE POPULAR

AUTOR:

MIGUEL ÁNGEL ÁVILA PICO

Cód. 064141040

DIRECTOR DEL PROYECTO

Msi. RAFAEL NIKOLAY AGUDELO VALENCIA

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

## HOJA DE PRESENTACIÓN

El trabajo de grado titulado ***Determinación de la cantidad y composición de Biogás generada por un relleno sanitario a escala en la Universidad Libre sede Bosque Popular*** realizado por el estudiante **MIGUEL ÁNGEL ÁVILA PICO Cód. 064141040**, cumple con todos los requisitos legales exigidos por la Universidad Libre para optar por el título de ingeniero ambiental.



---

RAFAEL NIKOLAY AGUDELO VALENCIA

Director del Proyecto

---

ING. ASTRID DEL SOCORRO ALTAMAR CONSUEGRA

Evaluador 1

---

ING. EDWIN ALBERTO BULLA PEREIRA

Evaluador 2

## DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD:

“El presente documento final de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. El documento final de trabajo de grado es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de Información consultadas”

MIGUEL ÁNGEL ÁVILA PICO

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miguel Ángel Ávila Pico', written in a cursive style.

Código: 064141040

## DEDICATORIA

*El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.*

*A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.*

*A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a mi director del proyecto de grado Nikolay Agudelo quien ha guiado con su paciencia, su rectitud como docente, dedicación y por compartir sus conocimientos para el éxito de lo propuesto, a mis docentes del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Libre de Colombia, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión, a mi compañero de tesis por su compromiso con la investigación.*

## RESUMEN

El biogás es un compuesto gaseoso producido debido a la descomposición anaerobia de materiales orgánicos y los rellenos sanitarios son una fuente de almacenamiento de dichos residuos domésticos a largo plazo, entre ellos los orgánicos y por lo tanto, éstos representan excelentes fuentes de generación de biogás.

Este proyecto corresponde al diseño y construcción de un relleno sanitario simulado a escala de laboratorio, compuesto por tres celdas diferentes y con el objetivo de determinar la cantidad y composición del biogás generado en cada una de éstas, para lo cual se tomó en cuenta condiciones como la humedad de los residuos, la caracterización de residuos y las condiciones climáticas de la zona.

Las celdas contaron con un sistema de extracción de gas pasivo y un rotámetro para medir el flujo del biogás generado, esto, con el fin de reproducir los datos experimentales de los modelos existentes como los seleccionados para el proyecto los cuales fueron: el modelo de la EPA llamado LandGEM el cual es una herramienta automática de cálculo aplicada a un software como Microsoft Excel y en donde se estima la tasa de emisión de metano y con los resultados generados se puede simular la emisión de compuestos volátiles derivados de los rellenos sanitarios, y el modelo experimental desarrollado en el laboratorio con un equipo denominado Orsat de bureta invertida, que permitió la hacer determinación de CO<sub>2</sub> por absorción con KOH.

El biogás extraído de cada celda fue caracterizado para determinar su respectiva composición por fracción porcentual apoyándose en la literatura, constituida principalmente por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>). En total se generaron 2,132 m<sup>3</sup> de biogás calculado por el método LanGEm y 3,0761 m<sup>3</sup> con el equipo Orsat.

**Palabras Clave:** *Biogás, residuos, descomposición anaerobia, fracción volumétrica parcial, dióxido de carbono, metano.*

## **Abstract**

Biogas is a gaseous compound produced due to the anaerobic decomposition of organic materials and landfills are a source of long-term storage of such household waste, including organic waste, and therefore, these represent excellent sources of biogas generation.

This project corresponds to the design and construction of a simulated sanitary landfill on a laboratory scale, composed of three different cells and with the aim of determining the quantity and composition of the biogas generated in each one of them, for which conditions such as the humidity of the waste, the characterization of the waste and the climatic conditions of the area.

The cells had a passive gas extraction system and a rotameter to measure the flow of the biogas generated, this, in order to reproduce the experimental data of the existing models such as those selected for the project which were: the model of the EPA called LandGEM which is an automatic calculation tool applied to software such as Microsoft Excel and where the methane emission rate is estimated and with the results generated, the emission of volatile compounds derived from landfills can be simulated, and the Experimental model developed in the laboratory with equipment called Orsat inverted burette, which allowed the determination of CO<sub>2</sub> by absorption with KOH.

The biogas extracted from each cell was characterized to determine its respective composition by percentage fraction based on the literature, consisting mainly of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>). In total 2,132 m<sup>3</sup> of biogas were generated calculated by the LanGEM method and 3.0761 m<sup>3</sup> with the Orsat equipment.

**Key Words:** Biogas, waste, anaerobic decomposition, partial volume fraction, carbon dioxide, methane.

# INDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>3. GENERALIDADES.....</b>	<b>5</b>
3.1. PROBLEMÁTICA.....	5
3.2. OBJETIVOS.....	7
3.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3.3. DELIMITACIÓN.....	8
3.4. METODOLOGÍA.....	8
3.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	8
3.4.2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	9
3.4.3. MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	13
<b>3.5. Marco referencial.....</b>	<b>14</b>
3.5.1. ANTECEDENTES.....	14
3.5.2. MARCO TEÓRICO.....	17
3.5.3. MARCO CONCEPTUAL.....	26
<b>4. DESARROLLO DEL PROYECTO.....</b>	<b>27</b>
4.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCION Y CUANTIFICACIÓN DEL BIOGAS.....	27
4.1.1. DISEÑO DE LAS CELDAS.....	27
4.1.2. EXTRACCION, CUANTIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL GAS.....	30
4.2. PARAMETRIZACIÓN DE VARIABLES.....	31
4.3. MONTAJE DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	32
4.4. CALCULO DE LA CANTIDAD Y LA COMPOSICIÓN DEL BIOGAS EN LA PRUEBA LABORATORIO.....	33
4.3.1. CALCULO TEÓRICO METODO LANGEM.....	33
4.3.2. CALCULO EMPREIMENTAL MODELO ORSAT.....	38
<b>5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>55</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Separación de Residuos por Cuarteo.....	10
Tabla 2. Marco Legal y Normativo.....	14
Tabla 3. Datos de Entrada por celda.....	34
Tabla 4. Porcentaje en Peso base seca celda 1.....	35
Tabla 5 Determinación de los totales de masa de los elementos, moles y coeficientes .....	35
Tabla 6. Masa de los compuestos Celda 1.....	35
Tabla 7. Porcentaje en Peso base seca celda 2.....	36
Tabla 8. Determinación de los totales de masa de los elementos, moles y coeficientes .....	36
Tabla 9. . Masa de los compuestos Celda 2.....	37
Tabla 10. Porcentaje en Peso base seca celda 3.....	37
Tabla 11. Determinación de los totales de masa de los elementos, moles y coeficientes .....	37
Tabla 12. Masa de los compuestos Celda 3.....	37
Tabla 13. Promedio de CO <sub>2</sub> obtenido por inoculación semanal.....	39
Tabla 14. Producción de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> por cada m <sup>3</sup> de biogás celda 1.....	40
Tabla 15. Producción de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> por cada m <sup>3</sup> de biogás celda 2.....	40
Tabla 16. Producción de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> por cada m <sup>3</sup> de biogás celda 3.....	41
Tabla 17. Volumen de Biogás generado celda 1.....	41
Tabla 18. Volumen de Biogás generado celda 2.....	41
Tabla 19. Volumen de Biogás generado celda 3.....	42
Tabla 20. Caudal de CH <sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 1.....	43
Tabla 21 Caudal de CH <sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 2.....	45
Tabla 22. Caudal de CH <sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 3.....	47

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación del Proyecto.....	8
Figura 2. Montaje general de cada celda.....	11
Figura 3. Dibujo aparato Orsat.....	12
Ecuación 1. Reacción Química CO <sub>2</sub> y KOH.....	13
Ecuación 2. Composición Química de los Residuos.....	18
Ecuación 3. Reacción Química para generación de CH <sub>4</sub> .....	19
Ecuación 4. Volumen de CH <sub>4</sub> por Masa de Residuos.....	20
Ecuación 5. Volumen de CO <sub>2</sub> por Masa de Residuos.....	20
Figura 4. Degradación Rápida y Lenta de los Residuos.....	20
Ecuación 6. Calculo de la cantidad de Gas por Área del Triángulo .....	20
Ecuación 7. Producción de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> .....	23
Figura 5. Diseño y composición de la Celda 1.....	28
Figura 6. Diseño y composición de la Celda 2.....	29
Figura 7. Diseño y composición de la Celda 3.....	30
Ecuación 8. Calculo Caudal Biogás por Celda.....	42
Figura 8. Volumen de metano producido por mes celda 1.....	43
Figura 9. Volumen acumulado de metano a 7 años celda 1.....	44
Figura 10. Caudal de metano por mes celda 1.....	44
Figura 11. Volumen de metano producido por mes celda 2.....	45
Figura 12. Volumen acumulado de metano a 7 años celda 2.....	46
Figura 13. Caudal de metano por mes celda 2.....	46
Figura 14. Volumen de metano producido por mes celda 3.....	47
Figura 15. . Volumen acumulado de metano a 7 años celda 3.....	48
Figura 16 Caudal de metano por mes celda 3.....	48
Figura 17. Volumen de biogás producido por celda.....	49
Figura 18. Volumen de CO <sub>2</sub> producido por celda .....	50
Figura 19. Volumen de CH <sub>4</sub> producido por celda.....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios en la actualidad comprenden una alternativa de disposición final para los residuos sólidos producidos en la mayoría de las actividades domésticas e industriales. A su vez pueden representar fuertes impactos ambientales a causa de manejos inapropiados de dichos residuos y del lugar de disposición final, así mismo, uno de los principales impactos negativos se refleja en la calidad del aire, toda vez que el proceso de descomposición anaerobia de residuos orgánicos da lugar a la formación de biogás; mismo que está principalmente compuesto por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otra de metano ( $\text{CH}_4$ ) (Cepero, Blanco, Suarez, 2012), así también, hacen parte al grupo de gases causantes del efecto invernadero (GEI). Comúnmente, el biogás producido en un relleno sanitario carece de cierto interés, puesto que cuando es evacuado de las celdas de los rellenos sanitarios, es quemado y emitido a la atmósfera en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), desperdiándose así el potencial energético del metano ( $\text{CH}_4$ ). Dicho lo anterior, cabe señalar que el proceso de producción de biogás depende de variables tales como el contenido de humedad en los residuos, la cantidad de materia orgánica en estos y las condiciones climáticas de la zona en donde se encuentra ubicado el relleno sanitario.

El presente proyecto constituye una aproximación a escala laboratorio de un relleno sanitario con el fin de determinar su potencial de generación de biogás a partir de residuos orgánicos, para lo cual se hizo uso de canecas plásticas para confinar los residuos que posteriormente se depositarían en ellas, además de que en uno de estos recipientes se adicionó un microorganismo de la familia metanogénica para evaluar el comportamiento con relación a las otras dos, se determinó desde el tiempo de inicio de la producción de biogás, el flujo volumétrico y la composición del mismo en cada celda y se compararon los resultados obtenidos.

Finalmente, los datos conseguidos se emplearon para simular la producción de metano por medio del modelo propuesto por la Environmental Protection Agency (EPA), denominado LANDGEM, a partir del cálculo del potencial de generación de biogas de los residuos dispuestos en la celda y la variación de la tasa de generación de metano para establecer o calcular el coeficiente cinético de generación y así poder proyectar la producción de metano en el tiempo estimado.

Por otro lado, se aplicó como modelo práctico en el laboratorio el equipo Orsat para la determinación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) eliminado por disociación con hidróxido de potasio (KOH) presente en las muestras de biogás extraídas de cada una de las celdas y de este modo, determinar el porcentaje volumétrico del metano en relación a la producción máxima en cada uno de los meses evaluados.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

A lo largo de la historia de la humanidad se han utilizado una gran variedad de técnicas y herramientas que en su momento representaron una contribución a la protección del planeta. El manejo de residuos y por lo tanto el saneamiento básico de las comunidades siempre ha representado una causa de los grandes impactos ambientales de la sociedad, han sido diferentes los estudios encaminados a la búsqueda de tecnologías eficaces para lograr el saneamiento básico en Colombia, explícitamente en lo que respecta a la disposición final de residuos sólidos en los rellenos sanitarios, los cuales aportan al manejo integral de los residuos sólidos, una estrategia para mitigar los impactos provocados por las actividades antrópicas.

En Beijing China, una de las ciudades con más sobrepoblación en el planeta, en sus 16 distritos municipales, la cantidad de residuos producidos en esta mega ciudad es colosal. Así pues, los científicos de la región estimaron que en un periodo comprendido entre el 2019 y el 2030, con una producción aproximada de 55.000 a 2'120.000 toneladas por año, con capacidad para producir entre 8'400.000 a 218'300.000 kWh/año. (Emkes et al., 2020).

La disposición y tratamiento de los residuos sólidos representa una medida de atención urgente en la civilización actual, debido a que en el mundo los lugares de disposición final de residuos ocupan grandes extensiones de tierra, situación que limita la potencialidad del uso del suelo y a futuro una vez alcanzada la capacidad del lugar de disposición final se deberá encontrar otra área o lugar para la disposición final de residuos, es decir, el ciclo se hace continuo y limita con el tiempo la cantidad de tierra para la ejecución de actividades productivas. A pesar de lo mencionado, los rellenos sanitarios representan una alternativa aceptable para la disposición final de residuos sólidos, de esta manera, resulta de interés poder determinar el potencial de generación de metano con fines de aprovechamiento energético de este gas.

Actualmente se tiene en conocimiento que los rellenos sanitarios son responsables de la generación de la mayor cantidad de metano antropogénico. Siendo así, como en la década de los noventa del siglo pasado, las emisiones en Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Europea, por causa de los rellenos sanitarios representaron el 27%, 38% y 11% respectivamente y con relación de la producción de metano a nivel mundial.(Thompson, Sawyer, Bonam, & Valdivia, 2009)

Los rellenos sanitarios son depósitos en los cuales se sitúan los desechos o residuos sólidos, para lo cual se hace uso de extensas áreas de suelo. Con relación a los rellenos sanitarios como alternativa para la disposición final de residuos, en el año 2002 definió estos de la siguiente manera. “Son un método por el cual se busca una disposición final de los residuos sólidos en el suelo y por el cual, siguiendo algunas técnicas de ingeniería se les brinda un tratamiento, de tal forma que se reduzca el impacto al ambiente y se controle las emisiones de gases a la atmosfera y el derrame de lixiviados al medio” (J. Jaramillo, 2002).

En Colombia según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SUPERSERVICIOS, 2017) “Existen 158 rellenos sanitarios regionales y estos disponen del 91% de los residuos generados (...) Además de esto el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2016) informa que: “En el país anualmente son generadas 11,6 millones de toneladas de basura, de las cuales el proceso de reciclaje solo se efectúa en el 17% (...) Siendo esta última una problemática urgente a tratar”. Adicionalmente en Colombia la práctica de implementar rellenos sanitarios para la disposición y tratamiento de los residuos sólidos ha presentado varios inconvenientes, entre ellos que no se cuenta con el suficiente conocimiento técnico para aprovecharlos a su máxima capacidad, por lo tanto y en el caso de captación de gases efecto invernadero, en muchos casos estos simplemente escapan o son emitidos a la atmósfera, aportando al calentamiento del planeta.

El cálculo de la tasa de generación de biogás en un relleno sanitario es de especial interés para poder justificar la compra de materiales e insumos para el manejo del gas, cuantificar la cantidad de gas que puede ser emitido y, por lo tanto, evaluar desde la perspectiva técnica y económica el uso del biogás para generación de energía o diseño de sistemas de oxidación térmica de llama elevada para quemar el metano y no emitirlo a la atmósfera a causa de su potencial de calentamiento global.

A menudo, cuando en la actualidad se habla de rellenos sanitarios, el punto de interés que representan estos es especial para la comunidad investigadora científica en especial internacional, hace referencia a cuánta es la cantidad de metano recuperado, cuánta energía eléctrica pudo producir y esta puede ser medida o cuantificada según la composición y la cantidad de los residuos vertidos. Esto con el fin de poder ser utilizados en mayor expresión, para reducir los impactos producidos por este gas. (Fjelsted, Christensen, Larsen, Kjeldsen, & Scheutz, 2020).

Cada una de las investigaciones desarrolladas a nivel local e internacional representa el interés por el cual se busca darle un grado de utilidad a los rellenos sanitarios ya que se han denominado en basta proporción como pasivos ambientales. Sumado a esto las investigaciones realizadas a gran escala o en trabajo de campo son limitadas y el monitoreo a los rellenos sanitarios representan costos de inversión muy altos sobre todo en la determinación y captación de metano en los mismos, y por lo tanto es recomendable hacer dichas investigaciones en modelos de escala laboratorio por motivos de costos y eficiencia en los procesos(Emkes, Coulon, & Wagland, 2015).

### **3. GENERALIDADES**

#### **3.1. PROBLEMÁTICA**

En la actualidad, se hace frecuente y común mencionar las energías renovables, hecho que lleva a pensar en hacer uso de la energía contenida por el biogás generado en un relleno sanitario y la implementación de métodos para generar productos derivados de éste, de modo que se logre con ello mitigar o reducir la emisión de gases de efecto invernadero y por lo tanto el incremento de la temperatura ambiente. Los rellenos sanitarios constituyen una fuente importante de biogás, el cual es el resultado del proceso de descomposición biológica de los residuos sólidos de origen orgánico, el biogás de relleno sanitario está conformado principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), encontrándose también trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) entre otros gases.

La composición del biogás depende de diversas variables, dentro de las que sobresalen las características y volumen del residuo, humedad, compactación y edad del relleno sanitario. (Camargo, Y & Velez,A, 2009) Afirman: (Los rellenos sanitarios municipales surgen como respuesta a la problemática generada por la producción de residuos sólidos urbanos, debido a su alto impacto negativo sobre los componentes ambientales y el deterioro de la calidad de vida de las

comunidades, que se hace cada vez más preocupante por su aumento acelerado, principalmente en las áreas urbanas) (p.1).

El reciclaje no hace parte de las costumbres de la sociedad colombiana, este hecho se hace evidente debido a que la mayoría de desechos van a parar a la basura domiciliaria y por lo tanto al relleno sanitario. Según (Bian, Romgxing & Xin, Danhui & Xiaoli, 2017) “El relleno sanitario o vertedero es uno de los más importantes emisores de gas de efecto de invernadero (...) Para lo cual se emplean áreas extensas y descubiertas para la ubicación de los desechos” (p.1). Situación que pone en riesgo la salud del ambiente.

Dicho lo anterior hay impactos no favorables al ambiente que son provocados por los gases emitidos por los rellenos sanitarios además de los vertimientos de lixiviados que allí se almacenan. Así pues, según (VERIVOX, s.f) “Si el gas del relleno llega a la atmósfera, tiene un fuerte efecto dañino para el clima debido al metano allí. (Vertederos en los cuales no se realiza el control del biogás emitido constituyen unas de las principales fuentes fijas de emisión global de metano).

Adicional a lo anterior el metano es un gas combustible por lo cual existe el riesgo de incendios y explosiones dentro del relleno sanitario e incluso en edificaciones cercanas a este. Pignato T, Aronica S, Bonnano A (Como se citó en Camargo Y, & Vélez, A,2009): Piensan que la estimación del biogás emitido desde sitios de disposición final de residuos sólidos es uno de los objetivos previstos en el Protocolo de Kioto; de hecho, resulta fundamental evaluar la contribución de los rellenos sanitarios, botaderos y plantas de compostaje a lo largo del tiempo por la producción de biogás, así como establecer medidas que puedan adoptarse para la reducción de los gases emitidos.

Al depositar una gran variedad de desechos al relleno sanitario sin ningún tipo de selección y/o separación se incurre en una problemática para la generación del biogás dentro del mismo. Por esto (Salud, 2017) afirma que: “La emisión de biogás de los rellenos sanitarios se ve afectada principalmente por las características

físicas del límite del vertedero y la totalidad de la colección de gases de vertedero en el sitio”.

En Colombia, existe la iniciativa para el aprovechamiento de los residuos que se generan en los rellenos sanitarios, como parte de esta iniciativa, se estima el uso del biogás como fuente renovable de energía, ejemplo de esto son las acciones implementadas en el relleno sanitario Doña Juana, en este se han realizado distintos proyectos para lograr el aprovechamiento de las emisiones generadas a la atmosfera, tomando como enfoque principal al control de la generación del biogás.

En la Universidad Libre de la Sede Bosque Popular, se realizan actividades de aprovechamiento de residuos, dentro de las cuales están; el uso de podas para elaboración de compost con lo cual se logra aporte a los recursos de la Universidad, y se adopta una posición de uso y aprovechamiento de tecnologías para la gestión de los residuos generados en la institución como innovación.

Al interior de la Universidad Libre, toma lugar la generación de diferentes tipos de residuos por lo cual cabe la posibilidad de realizar pruebas a escala laboratorio en las cuales se evalué la conversión o valorización de los residuos. Como una parte de estas alternativas surge la oportunidad de determinar el potencial de generación de biogás por la degradación anaerobia de residuos orgánicos y posteriormente con el apoyo de los demás programas de ingeniería que conforman la facultad, lograr poner en práctica a escala real, las alternativas de valorización de residuos estudiadas en los proyectos laboratorio.

## **3.2. OBJETIVOS**

### **3.2.1. General**

- 3.2.1.1.** Determinar la cantidad y la composición del biogás producido en un relleno sanitario a escala laboratorio en la universidad libre sede Bosque Popular.

### 3.2.2. Específicos

- 3.2.2.1. Diseñar el sistema de extracción y cuantificación del biogás.
- 3.2.2.2. Identificar variables que afectan directa o indirectamente el proceso de producción de biogás en la prueba a escala laboratorio.
- 3.2.2.3. Determinar las condiciones óptimas para las cuales se presentó la mayor generación de biogás en la prueba piloto.

### 3.3. DELIMITACIÓN

El proyecto se encuentra situado en las instalaciones de la Universidad Libre sede Bosque Popular, en la ciudad de Bogotá D.C. En las coordenadas 4°39'55,57" N y 74°06'08,41" O, a 2554 m.s.n.m.

Figura 1: Delimitación del Proyecto



Fuente: Autores 2020, ArcGis

### 3.4. METODOLOGÍA

#### 3.4.1. Tipo de investigación

Se realizó una investigación de tipo cuantitativo descriptivo, frente a la cual a partir de la determinación de cantidad y composición del gas, se establecen variables que permiten describir la tasa de generación de biogás empleando el modelo propuesto por la EPA y conocido por el nombre de LandGem; de acuerdo con las directrices de la universidad el proyecto se enmarca en la línea de evaluación, prevención y control de la contaminación ambiental y al subtema de gestión de residuos.

### 3.4.2. Diseño Metodológico

#### ➤ **Recolección, Separación y Disposición de los Residuos**

Para la realización del proyecto se construyeron las celdas simuladas del relleno sanitario empleando canecas con capacidad de 7.013 galones cada una, los residuos empleados para el proyecto fueron tomados de los residuos orgánicos generados en las cafeterías de la universidad Libre sede Bosque Popular, en cada celda fue dispuesta una cantidad de 6,43 kg, los cuales ocupaban un volumen dentro de la celda equivalente a 5,05 galones de residuos. A demás, una de las celdas fue inoculada con 0,153 kg equivalente a 0,12 galones en volumen de bacterias del tipo *Methanobacterium* con el soluto en la celda 2, el objeto de esto fue analizar el posible aumento de la velocidad de generación de biogás y la mayor producción de metano en la celda.

Los residuos sólidos fueron tomados de una de las cafeterías de la Universidad Libre sede Bosque Popular, en donde se optó por esta fuente, con el fin de garantizar que una mayor proporción de la basura fuera materia orgánica de degradación rápida, como residuos de productos alimenticios orgánicos (frutas, verduras, sobrantes de comida, etc.).

Cada uno de estos residuos fue separado y pesado por el método de cuarteo, el cual se lleva a cabo de manera convencional en un relleno sanitario, los residuos son separados de tal manera que se puedan caracterizar en un tipo específico como fracción, esto con el fin de determinar el porcentaje de materia orgánica fermentable presente en la basura de la muestra seleccionada.

En el recipiente número uno se dispusieron 6.43 kg de residuos caracterizados así: 88% residuos de comida, residuos de jardín 8%, papel 2,5% y cartón 2%; en el segundo recipiente o contenedor o celda simulada se dispusieron 6.43 kg, de los cuales 80% fueron residuos de comida, residuos de jardín 12%, papel 5% y cartón 3%, y por último en el tercer

contenedor o celda simulada se dispusieron 6.43 kg, de los cuales 50% fueron residuos de comida, residuos de jardín 40%, papel 6% y cartón 4%.

Para este caso, los resultados obtenidos después de hacer la caracterización por el método de cuarteo de los residuos se ven evidenciados en la siguiente tabla como se muestra a continuación.

Tabla 1. Separación de Residuos por Cuarteo

<b>CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS METODO DE CUARTEO</b>						
Tipo de Residuo	Peso Húmedo W1 (kg)	Volumen (kg/día)	Porcentaje (%)	CELDA		
				1	2	3
Residuos Orgánicos (Restos de comida)	14,3389	0,48	74	88%	80%	55%
Papel	0,80375	0,03	4	2,5%	4%	6%
Cartón	0,54655	0,02	3	2%	3%	4%
Residuos de Jardín	3,6008	0,12	19	8%	13%	35%
Plástico	0,0007	0,00	0	0%	0%	0%
Vidrio	0,00012	0,00	0			
Madera	0,0009	0,00	0			
<b>Total</b>	<b>19,29</b>	<b>0,64</b>	<b>100</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

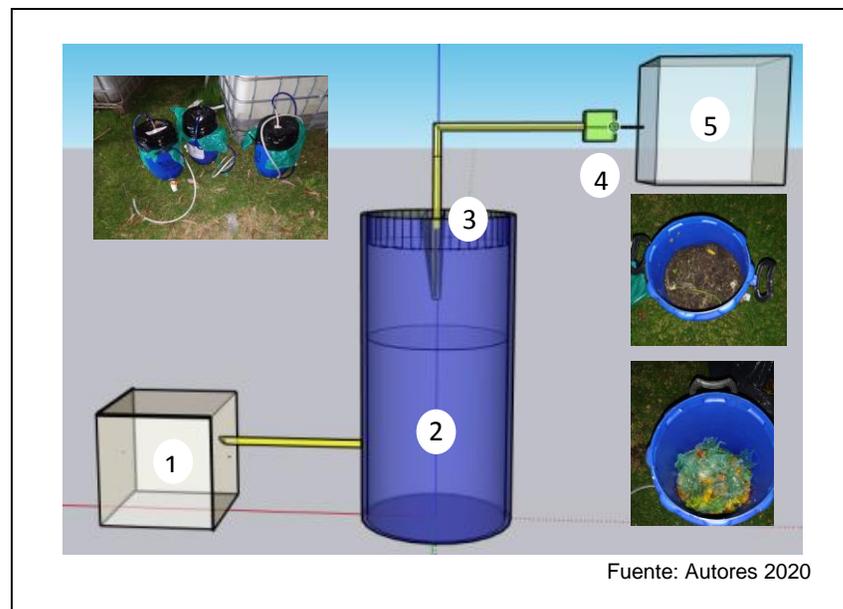
Fuente: Autores 2020

En la separación de residuos por cuarteo **Tabla 1** se evidencia los resultados obtenidos en la caracterización de residuos por el método de cuarteo con los respectivos porcentajes de fracción de residuo. Así mismo, se puede observar que en la primera columna se indicó el tipo de residuo, en la segunda columna el peso húmedo de cada tipo de residuo y en la tercera columna el porcentaje de cada tipo residuo con respecto a la masa total de la muestra residuos acopiados.

### ➤ Diseño de las celdas

En total se hizo el montaje para 3 celdas a partir de recipientes plásticos con un sistema de extracción pasiva del gas en la parte superior y un sistema de evacuación de lixiviados en la parte inferior. La simulación de estas celdas corresponde a la capa inferior de un relleno sanitario real, adaptadas para tener ciertas condiciones controladas. Esto partiendo de que las capas más profundas en estos depósitos de residuos son sistemas cerrados, en donde principalmente pueden haber penetración de aguas lluvias desde las capas superiores y es donde se hace mayor la actividad de microorganismos encargados de la descomposición de materia orgánica.

Figura 2. Montaje general de la cada celda



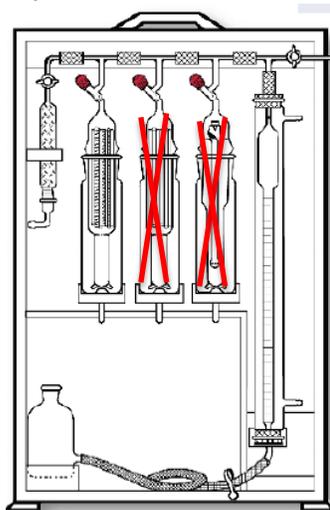
El montaje general de la celda **Figura 2** muestra el diseño general de cada una de las celdas del proyecto, sus partes constan de: (1) Extracción de lixiviados, (2) Celda con residuos dispuestos, (3) Sistema de extracción pasiva del biogás, (4) Rotámetros para medición de flujo del gas y (5) Almacenamiento en la bolsa Tedlar del biogás producido, para posteriormente ser llevado al laboratorio.

➤ **Composición del Biogás**

Con el fin de determinar la composición del gas se empleó el principio del análisis **ORSAT**, en el cual, un volumen de gas se acumula dentro de una probeta de volumen conocido y posteriormente con el uso de una solución coloreada, se hace que el volumen de gas sea burbujeadado dentro de una solución con capacidad de absorber selectivamente alguno de los gases presentes en la mezcla, en este caso se empleó hidróxido de potasio para absorber el  $\text{CO}_2$  presenta en el biogás, dado que el gas de salida está compuesto principalmente por  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , la diferencia de volúmenes permite determinar la composición porcentual de compuestos en el gas de salida de cada celda.

El **ANÁLISIS ORSAT** consiste en un equipo empleado en la determinación de la cantidad de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ). Para esto, se utilizan soluciones de Hidróxido de Potasio ( $\text{KOH}$ ) para la absorción de  $\text{CO}_2$  en donde se va a centrar principalmente este análisis, una solución alcalina de pirogalol o ácido pirogálico ( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$ ) para la absorción de  $\text{O}_2$ .

Figura 3. Dibujo del aparato Orsat



Fuente: Catálogo Afora

El dibujo del aparato Orsat **Figura 3**, muestra tres buretas como es su modelo convencional, a diferencia de éste, en donde se utilizan tres reactivos diferentes para la determinación de CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>, en este caso se excluyó la determinación del Monóxido de Carbono (CO) y el Oxígeno (O<sub>2</sub>) y por consiguiente sus respectivos reactivos, y se utilizó únicamente una probeta para la determinación del CO<sub>2</sub>.

El sistema de medición del equipo Orsat se adaptó para determinar un solo gas, que para este caso correspondió a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el cual fue disuelto por una solución de hidróxido de potasio (KOH) 1N.

- Para efectuar la medición del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), se hizo colocando un volumen que se establece como base de cálculo, para el caso 100 cm<sup>3</sup> de Hidróxido de Potasio (KOH). Cuando el CO<sub>2</sub> reacciona con el KOH, produce Carbonato de Potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), quedándose atrapado este último en el líquido y eliminando el CO<sub>2</sub> de la reacción. El volumen perdido del líquido dentro de la bureta es igual a la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la mezcla del biogás, y se evidencia en la siguiente ecuación.

Ecuación 1. Reacción del CO<sub>2</sub> y KOH.



Fuente: (Emkes et al., 2020)

Partiendo del hecho de que en un reactor anaerobio como es el caso de las celdas más profundas de un relleno sanitario, se entiende que los compuestos de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás se dan aproximadamente en una relación porcentual de 60% y 40% respetivamente. La determinación del metano se puede obtener partiendo del CO<sub>2</sub> obtenido por el método Orsat en el laboratorio.

### 3.4.3. Marco Legal y Normativo

Para el marco normativo, se hizo el acopio de toda la normatividad colombiana vigente que rige cada una de las actividades de interés para la presente de investigación y la cual se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla 2: Marco Legal y Normativo (Información recuperada, 2019)

Norma (País)	Por el/la cual	(Entidad Emisora)
Decreto 1076 de 2015 (Colombia)	Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	<b>(Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible)</b>
Decreto 1784 de 2017 (Colombia)	Se dicta las actividades complementarias a tomar en cuenta para el tratamiento y la disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo.	<b>(Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial)</b>
Resolución 1484 del 2018 (Colombia)	Se asume la competencia del proyecto “Relleno Sanitario Doña Juana” y se toman otras determinaciones, se basa en el seguimiento de control al relleno sanitario.	<b>(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)</b>
Decreto 312 de 2005 (Colombia)	Se adopta el plan maestro para el manejo de residuos sólidos para Bogotá Distrito Capital	<b>(Alcaldía Mayor de Bogotá)</b>

Fuente: Autores 2020

### 3.5. Marco Referencial

#### 3.5.1. Antecedentes

- En la actualidad la preocupación por hacer decrecer los índices de contaminación atmosférica abarca un sin fin de herramientas empleadas enfocadas en lograr dicho propósito, pero llegar si quiera a

una posible solución para una problemática ambiental es un camino muy extenso lleno de investigaciones tanto científicas como empíricas. Así pues, un país en vía de desarrollo como lo es Colombia en donde una problemática ambiental como lo son los rellenos sanitarios se le debe prestar una gran atención en cuanto a la preocupación que estos generan ya que el problema comienza desde la cultura ciudadana en donde no se hace la separación de basuras y todo va a parar al mismo sitio. Pero, así mismo esto genera una serie de oportunidades para generar soluciones aprovechando el mismo sistema que es considerado como problema.

- En Colombia el relleno sanitario con mayor tamaño que cuenta el país es **Doña Juana** ubicado en la ciudad de Bogotá D.C. en la localidad de Ciudad Bolívar, su operación está a cargo de la Compañía de Gerenciamiento de Residuos (CGR) bajo la supervisión de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). Una de las técnicas que resaltan en el relleno sanitario Doña Juana es su panta de Biogás, la cual según (Urrego, 2020) supervisora del proceso en el relleno sanitario, informa que es un sistema encargado de tomar el gas generado por la descomposición de los residuos y convertirlo en energía eléctrica como fuente alternativa, además es el único relleno sanitario del país que cuenta con dicha tecnología.
- Cuando un relleno sanitario es abierto y puesto en funcionamiento se comienzan a apilar capa sobre capa, una corresponde a los residuos y la siguiente de suelo y así sucesivamente, de esa forma la producción máxima de biogás ocurre cuando el relleno sanitario en operación ya que estos presentan dos fases una de funcionamiento y la de clausura que es cuando se detiene la operación, siendo la primera la que presenta la tasa máxima de emisión del metano.
- En igual sentido no es necesario afirmar que el máximo potencial del metano es emitido en los 12 meses primeros que transcurren a la

deposición de los residuos en la celda si no que se tiene como base para los sitios en que es complicado llevar información precisa del funcionamiento del relleno sanitario y se tenga que iterar. (Camargo & Vélez, 2009).

- En Irán se hace un aprovechamiento del gran potencial energético del metano, en donde, en el relleno sanitario de la ciudad de Yasuj se implementó un sistema de generación de energía eléctrica a base del metano extraído del biogás, esto teniendo como base el software de LandGem de la EPA, con el cual se realizaron las estimaciones pertinentes para calcular la cantidad de biogás y sus compuestos producidos en este relleno sanitario(Fallahizadeh et al., 2019).
- En Colombia existe alrededor de 174 rellenos sanitarios según la SUPERSERVICIOS(SUPERSERVICIOS, 2017), como se mencionó anteriormente el relleno Doña Juana es el único del país que cuenta con una planta de biogás. De esta forma, en el resto de los casos, el biogás producido dentro de las celdas del relleno sanitario es transportado por tuberías en los cuales en algunos casos es almacenado para usos posteriores o simplemente es quemado para ser emitido en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Noguera & Oliveros, 2010).
- Tanto en el continente americano como en el resto de continentes, se están adelantando y aplicando investigación en tanto a la generación de energía eléctrica por medio del biogás producido en los rellenos sanitarios existente. Al respecto una investigación mexicana refleja que un confinamiento de residuos en un relleno sanitario en un año puede almacenar hasta 16'279.000 toneladas, dicha cantidad de residuos puede llegar a producir hasta 240 MW en 10 años, lo suficiente para cubrir la necesidad de energía eléctrica de varias ciudades del país. (Arvizu & Huacuz, 2003).

### 3.5.2. Marco Teórico

- Disposición final para los Residuos Sólidos

Según (Mambeli Barros, Lúcio Tiago Filho, Homero Ferreira da Silva, & Fernandes Pieroni, 2018) “La generación de residuos sólidos municipales (MSW, Municipal Solid Wastes) ha aumentado por causa del aumento de la población, especialmente en los centros urbanos de Brasil, y con el aumento de la actividad económica y la producción de bienes. El vertimiento consiste en una etapa final inevitable en la gestión de desechos y es el método más común de eliminación de MSW en todo el mundo, particularmente en los países en desarrollo. En contraste, la eliminación inadecuada de MSW libera metano a la atmósfera, lo que resulta insignificante hecho por el hombre (contribuyente) calentamiento global.”

Así pues YILMAZ (YILMAZ, 2003) afirma que: “La etapa final de la gestión de residuos sólidos es la eliminación segura cuando se asocian los riesgos asociados. Existen cuatro métodos principales para la eliminación de desechos sólidos:

- Aplicación en tierra: Entierro o relleno sanitario
- Compostaje
- Quema o incineración
- Reciclaje (recuperación de recursos)

De las opciones presentadas el relleno sanitario es la opción más frecuente. En este tipo de sistemas, los residuos se colocan en una gran excavación (fosa o zanja) en el suelo, que se rellena con tierra excavada cada día que se vuelcan los residuos. Idealmente, alrededor de 0,5 m de suelo debe cubrir los desechos depositados al final de cada día para evitar que los animales desentierren los desechos y las moscas se reproduzcan.

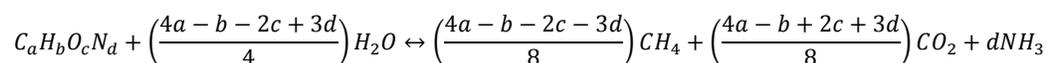
La ubicación de los vertederos se debe decidir, mediante la consulta con las autoridades locales y población afectada, los sitios deben estar cercados, y

estar situados a una distancia de por lo menos un kilómetro a favor del viento de las viviendas más cercanas.” Se tienen en cuenta algunos criterios, para (Giménez Vera, Cardozo, & Carrera, 2012) resalta que “para la selección de áreas destinadas a la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios, tales como: Criterios de Exclusión (distancia a cursos hídricos, zonas urbanas, rutas, aeropuertos) Criterios Técnicos (tamaño de área, vida útil, facilidad de acceso, profundidad de la capa freática, etc.); Económico-Financiero (distancia al centro de recolección) Político-Social (distancia de vivienda más próxima, centro educativo, centro de salud)”.

- Generación de Biogás

La generación y producción de biogás se desarrollan a partir de distintas metodologías, como la determinación de la composición de los residuos mediante un análisis estequiométrico. De esta manera y teniendo en cuenta factores como la temperatura, la radiación solar, la humedad en los residuos, contenido de oxígeno, tamaño de la partícula, compactación y pH, se puede dar las condiciones óptimas para la producción del gas. Así mismo y resaltando que los gases que conforman el biogás y que son producidos en un relleno sanitario son el *Metano*  $CH_4$  y el *Dióxido de Carbono*  $CO_2$ , estos compuestos son producidos por la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos, y que puede ser resumida en la siguiente ecuación:

#### Ecuación 2. Composición Química de los Residuos

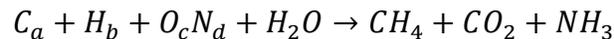


Fuente: (FERRANDO, 2019)

En esta ecuación, los coeficientes estequiométricos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , se calculan y corresponden al análisis previo que se hace a los residuos, en la etapa de caracterización química. Así mismo, después del análisis de los residuos, se

emplea la ecuación que aparece a continuación para determinar la composición del mismo.

Ecuación 3. Reacción química para generación de CH<sub>4</sub>



Fuente: (FERRANDO, 2019)

La ecuación (x) originalmente hace parte del modelo de estimación de producción de metano propuesto por la EPA, este modelo es conocido con el nombre de LandGEM, el modelo constituye una herramienta de estimación automatizada con una interfaz de Microsoft Excel que permite calcular las tasas de emisión para el total de gases de un relleno sanitario como: metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles y contaminantes del aire que se generan en los vertederos de residuos sólidos municipales. Los valores otorgados por este software se basan en datos empíricos de los vertederos de Estados Unidos, la velocidad de generación se fundamenta en un modelo de descomposición de primer orden para cuantificar las emisiones de gases de vertedero, que es la siguiente:

Para conocer el potencial de gases generado en cada vertedero se plantean las ecuaciones que se presentan a continuación, todas estas se emplean a partir de la estequiometría de la reacción de descomposición de los residuos. Con relación a la generación de biogás, existen dentro de los residuos dispuestos en un vertedero, algunos residuos que se descomponen a mayor velocidad que otros, uno de los métodos de estimación de producción de biogás es el método de distribución triangular, en el cual se hace la distinción entre residuos de rápida degradación y residuos de degradación lenta, en el caso de los primeros, se asume que la descomposición de estos se efectúa en 5 años y que al final del primer año de disposición se alcanza la máxima tasa de generación, para los residuos de degradación lenta se supone que se degrada completamente en 15 años y que la máxima velocidad de generación se presenta al final del quinto año de disposición final de los residuos.

Ecuación 4. Volumen de CH<sub>4</sub> por Masa de Residuos

$$\frac{\text{Masa de CH}_4 \text{ calculada en la caracterización}}{\text{Masa total de RSDR} * (\text{Densidad de CH}_4)} = \frac{\text{Volumen de CH}_4}{\text{Masa de RSDR}}$$

Fuente: (FERRANDO, 2019)

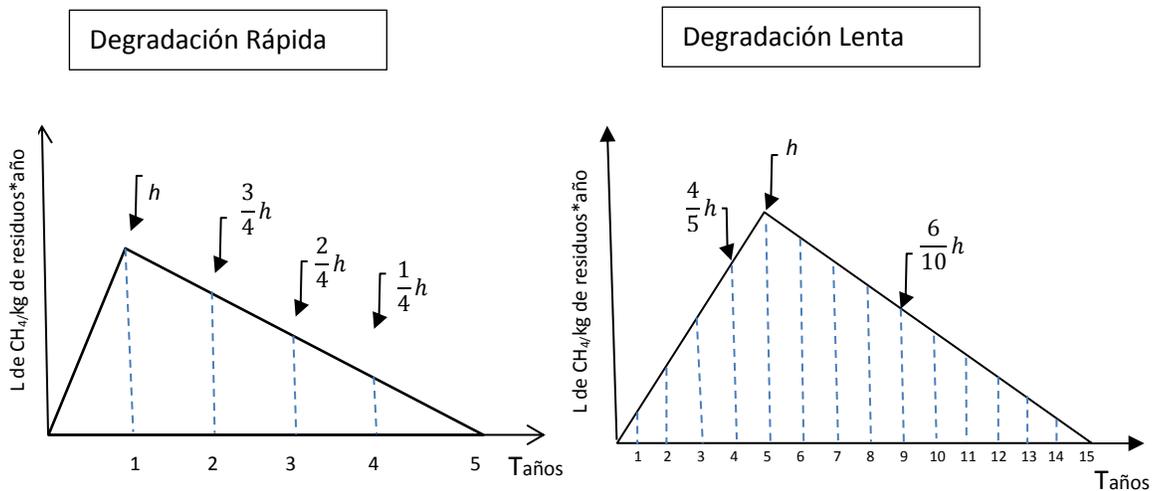
Ecuación 5. Volumen de CO<sub>2</sub> por Masa de Residuos

$$\frac{\text{Masa de CO}_2 \text{ calculada en la caracterización}}{\text{Masa total de RSDR} * (\text{Densidad de CO}_2)} = \frac{\text{Volumen de CO}_2}{\text{Masa de RSDR}}$$

Fuente: (FERRANDO, 2019)

De esta manera se calcula el flujo volumétrico emitido de biogás por cada kilogramo de residuo sólido seco de degradación rápida. El método de distribución triangular de la generación de biogás se explica de manera gráfica en la figura 6.

Figura 4. Gráficas para degradación rápida lenta de los residuos



Fuente (EPM, 2010)

En el método de distribución triangular, la determinación de la máxima tasa de generación de residuos se calcula a partir del área del triángulo formado, cuya área corresponde la cantidad de gas generado por kg de residuos sólidos dispuestos en la celda.

Ecuación 6. Calculo de la cantidad de Gas por el área del triángulo.

$$A = \frac{b * h}{2}$$

Fuente: (EPM, 2010)

En donde  $A$  corresponde el volumen de gas generado por cada kg de residuos dispuestos,  $b$  es la base del triángulo, 5 años para degradación rápida y 15 años para degradación lenta y  $h$  es la máxima tasa de generación de biogás.

Se debe considerar que en una celda de un vertedero o relleno sanitario la producción de biogás empieza después de los tres meses siguientes al inicio de disposición de los residuos, se desea analizar el comportamiento del biogás para un periodo de seis meses toda vez que el propósito es instalar tres celdas con condiciones diferentes para la producción del gas; dos de ellas se analizaran por medio del grafico de degradación rápida y la última con el grafico de degradación lenta de los residuos sólidos.

Según YILMAZ (YILMAZ, 2003) resalta que: cuando los residuos orgánicos biodegradables se descomponen bajo condiciones anaerobias, una mezcla de gases que contiene principalmente metano y se produce dióxido de carbono. Así, un complejo orgánico de residuos que podrían ser perjudiciales para los seres humanos puede ser tratado por la digestión anaeróbica. El gas generado por la digestión anaerobia de residuos orgánicos se llama biogás. Ya que contiene metano, que puede ser quemado, por lo que puede ser utilizado como fuente de energía alternativa.

En ese orden de ideas Fedailaine et al (Fedailaine et al., 2015) señala que; “La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que los microorganismos convierten el material orgánico en metano y dióxido de carbono (biogás) en ausencia de oxígeno. Este proceso es interesante, pero el control a escala industrial de las reacciones biológicas espontáneas requiere un buen conocimiento de los fenómenos involucrados. La búsqueda de modelos apropiados para ser usados en la teoría de control es ahora una alta prioridad para optimizar los procesos de fermentación y resolver problemas importantes, como el desarrollo de energía renovable a partir de desechos orgánicos biodegradables”.

La digestión anaeróbica comprende las siguientes fases para llegar a la obtención de metano y dióxido de carbono a partir de la fermentación:

- **Hidrólisis:** Este proceso es el que proporciona los sustratos orgánicos complejos que se descomponen por medio de bacterias hidrolíticas a partir de enzimas extracelulares denominadas hidrolasas. Según (FAO, 2011) “La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis”.
- **Acidogénesis:** Así mismo como se citó en (FAO, 2011) “Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico,  $\text{H}_2$ ) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema”.
- **Acetogénesis:** Como lo menciona (Corrales L, Antolines D, Bohórquez J, Corredor A, 2015), “Esta es una fase en la cual se aceleran los procesos metabólicos bacterianos, con transformación enzimática o hidrólisis, de lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, en otros compuestos que serán utilizados como fuentes de energía y como transformación a carbono celular”. Además de esto como se citó en (FAO, 2011) “Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados

directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.” Así pues (e.K., 2017) afirma que: “Este proceso requiere de una reacción endoenergética dado que requiere energía para la reacción. Gracias a la relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que sustraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en las cercanías de las bacterias acetogénicas”.

- **Metanogénesis:** Siendo la última etapa de la descomposición anaeróbica, teniendo en cuenta que se genera el proceso de biometanización o generación de biogás, partiendo de que, como se citó en (FAO, 2011). “un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores”. Así pues, este comportamiento está dado por la siguiente reacción química **Ecuación 7** producción de metano y dióxido de carbono por la descomposición de los residuos.

Ecuación 7. Reacción química producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por descomposición de los residuos



Fuente: EPA 2020

Considerando como se citó en (Corrales L, Antolines D, Bohórquez J, Corredor A, 2015), “La formación de metano se da a partir de dos rutas principales, la primera, es la acetoclástica en la cual los microorganismos crecen principalmente en su sustrato (acetato) y la segunda, es la hidrogenotrófica en donde los

microorganismos crecen en sustratos como hidrógeno (H) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Su metabolismo se caracteriza por integrar las vías biosintéticas y bioenergéticas para la producción de ATP, además en ausencia de hidrógeno, oxidan compuestos para la obtención de electrones”. Así pues (Pastro F.D., 2010) afirma que “La etapa final de descomposición de los residuos urbanos sólidos consiste en la descomposición metanogénica anaeróbica. En esta fase, los organismos convierten la sustancia orgánica, parcialmente degradada por los organismos aeróbicos opcionales, en metano y dióxido de carbono. Las características de esta fase son siempre la producción de energía térmica (aunque menor que la fase aeróbica), el uso de materia orgánica disuelta, la producción de metano y dióxido de carbono, así como el aumento del pH con valores cercanos a la neutralidad. Numerosos estudios han determinado que normalmente esta fase se establece después de un período que varía entre 3 y 9 meses desde la deposición de la materia orgánica. Una vez que la fase de metanogénica ha comenzado, la producción de biogás ocurre normalmente durante varios años (incluso más de 40), de acuerdo con una tendencia que muestra la producción máxima en los primeros años y un agotamiento asintótico progresivo hasta la degradación completa de la sustancia orgánica o hasta cuando existan condiciones ambientales adecuadas para el proceso.

- Aprovechamiento de Residuos Sólidos

De esta misma forma Jaramillo, Liliana, and Zapata Márquez (G. Jaramillo, Liliana, & Zapata Márquez, 2008) afirman que; “La maximización del aprovechamiento de los residuos generados y en consecuencia la minimización de las basuras contribuye a conservar y reducir la demanda de recursos naturales, disminuir el consumo de energía, preservar los sitios de disposición final y reducir sus costos, así como a reducir la contaminación ambiental al disminuir la cantidad de residuos que van a los sitios de disposición final o que simplemente son dispuestos en cualquier sitio contaminando el ambiente”.

El aprovechamiento debe realizarse siempre y cuando sea económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente conveniente. Algunos de esos métodos para el aprovechamiento de residuos sólidos son los siguientes:

- Recuperación de energía a partir de los residuos: Requiere del análisis del tipo y la calidad de los residuos disponibles, del conocimiento de las tecnologías, de establecer los estudios de factibilidad técnica y económica, y del conocimiento de la gestión de permisos y trámites ante la autoridad respectiva.
- Compostaje y Digestión anaeróbica: La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, que principalmente se compone de residuos de comida, de jardines y otros materiales similares, aportan alrededor del 50% del total, por lo que procesos de este tipo tienen un alto potencial de aprovechamiento. Si es separada de su origen, es susceptible de utilizarse en procesos de compostaje o digestión aerobia, obteniendo compost y biogás respectivamente. La composición típica obtenida en el biogás es del 45%-60% de  $\text{CH}_4$  y 40%-60% de  $\text{CO}_2$ . El biogás se conduce a un paquete de generación que incluye motores de combustión interna, donde se quema generando electricidad en un generador eléctrico acoplado. (Romo Millares, 2015)
- La determinación del compuesto se realizará por el método de distribución triangular de Biogás, la cual tiene como base la tasa de descomposición de los residuos que consta de dos tipos; los primeros que son los residuos de descomposición rápida (RDR), los cuales tienen una tasa de descomposición aproximada de 15 años y los segundos que son los residuos de descomposición lenta (RDL), los cuales cuentan con una tasa de descomposición aproximada de hasta 5. Cabe resaltar que el proceso de descomposición de los residuos depende de la disposición y el fin al que se aplique dentro de las celdas de las celdas del relleno sanitario.

### 3.5.3. Marco Conceptual

- Según Carlos Borda (2016) *“Las emisiones de gases al ambiente se han podido dar a partir de los malos manejos de instrumentos para la disposición de los residuos, dando como resultado el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI), en el caso del relleno sanitario, los malos manejos que se les ha venido dando, se consideran como fuentes de emisión directa de GEI. Dando como resultado el incremento de la temperatura en general del planeta. Dada la escasez de recursos que se viene a dar (especialmente de los combustibles fósiles) empezando las investigaciones hacia proyectos de MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) establecidos dentro del Protocolo de Kyoto, previamente para mitigar los efectos de los GEI, por ejemplo, en el RSDJ (Relleno Sanitario Doña Juana) la eliminación y destrucción del biogás fueron medidas para la mejora a la calidad del aire”*.
- No obstante la problemática de la calidad del aire viene empeorando con el pasar del tiempo, se han tomado medidas empleando la ideología de las fuentes renovables, energía limpia y la reducción de las emisiones atmosféricas. A partir de este punto, se empieza a ver la emisión del biogás como una fuente de energía limpia. Sobre este punto toma lugar el inicio de la planeación de la captación del biogás del relleno sanitario y convertirlo en una fuente renovable de energía limpia, causando un impacto beneficioso a corto plazo mitigando el cambio climático global, reduciendo los GEI en la atmosfera. En el RDSJ se implementó la captación y el uso del biogás como una fuente de energía eléctrica dentro de la misma generando energía a partir de los residuos que se tratan dentro del relleno sanitario.
- La importancia de la descomposición de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios influye directamente en la generación del biogás, tanto en factores como una buena compactación de los residuos sólidos, un control de los lixiviados que se forman dentro de los recipientes, evaluar los puntos en donde se genera la mayor cantidad de biogás para su valoración.

El biogás es catalogado como una forma ecológica de generar gas, con diferentes utilidades dentro de la temática de las energías renovables y alternativas, convirtiendo lo que antes se catalogaba como una fuente contaminante, pasa a ser una fuente de energía renovable y aporta con la mejora del medio ambiente.

#### **4. DESARROLLO DEL PROYECTO**

##### **4.1. Diseño del sistema de extracción y cuantificación del biogás**

###### **4.1.1. Diseño de las celdas**

El sistema se encuentra construido de abajo hacia arriba en cada una de las celdas, en donde en el primer segmento se hizo una adecuación a cada uno de los recipientes el cual consta de un sistema de extracción pasiva de los lixiviados generados por la humedad en los residuos, el segundo segmento consta de un lecho filtrante el cual es grava y fue colocado en el fondo del recipiente para permitir el paso de los lixiviados y ser extraídos y ocupa unos 20 cm de altura desde el fondo de la celda lo que equivale a unos 3,56 kg.

En ese orden el tercer segmento se colocaron los residuos acopiados de la cafetería de la universidad libre sede Bosque Popular y aproximadamente ocupan unos 36 cm de altura en la celda lo que equivale a unos 6,43 kg en cada celda. En el cuarto segmento se ubicó el sistema de extracción pasiva del biogás, el cual consta de una tubería de cobre de unos 30 cm de largo y 1 cm de diámetro que sobresale de la parte superior de la celda. En el cuarto y quinto segmento se acopló el sistema de medición para el caudal del biogás el cual consta de un rotámetro y un sistema de almacenamiento para el biogás, el cual consta de una bolsa Tedlar.

- Celda 1: El primer recipiente o celda experimental está construida como un sistema cerrado, en la cual se depositó material orgánico al 90% de la fracción total de los residuos y consta de seis segmentos de interés como se muestra en la siguiente figura 5.

Figura 5. Diseño y composición de la celda 1



- Celda 2: Esta celda consta de un de un sistema cerrado, en el cual se dispuso residuos caracterizados mixtos, en proporción del 80% de residuos orgánicos y en la cual se le colocó una bacteria (*Methanobacterium*) de la familia de las bacterias metanogénicas, la cual fue obtenida por una trampa de bacterias elaborada de manera artesanal, respetando la temperatura y el pH para su proliferación, por la cual se esperaba aumentar la producción de metano en la celda y la cual consta de seis segmentos de interés como se muestra en la siguiente figura 6.

Figura 6. Diseño y composición de la Celda 2



Fuente: Autores 2020

- Celda 3: En el tercer recipiente o celda experimental se construyó como un sistema cerrado, en la cual se depositó residuos mixtos y 50% de la fracción total corresponde a materia orgánica y le resto a material de baja degradación o degradación lenta y materiales inorgánicos, en la cual se espera tener el mejor comportamiento ya que representa una mayor distribución de residuos semejante a una celda real de relleno sanitario. Al igual que las celdas anteriores, consta de seis segmentos de interés como se muestrea en la siguiente figura 7.

Figura 7. Diseño y composición de la Celda 3



Fuente: Autores 2020

#### 4.1.2. Extracción, Cuantificación y Almacenamiento del Biogás

- Para el sistema de extracción del gas, se instaló una tubería de cobre de  $\frac{1}{4}$  "de diámetro por 35 cm de largo, la cual esta introducida unos 15 cm al interior de la celda y sobresale uno 8 cm al exterior de la misma. De esta forma, se permitió que hubiese un flujo del gas de forma pasiva, hacia la siguiente etapa del proceso.
- Cada vez que se tomó la medida del caudal del gas transportado por el sistema de extracción pasiva de cada celda, la salida del gas fue conectada a un rotámetro para determinar el flujo de gas, el rotámetro fue conectado a una bolsa tipo Tedlar para almacenar el gas y ser analizado posteriormente. El rotámetro es un equipo utilizado en mediciones de caudales de fluidos en tuberías cerradas y que permite tomar el caudal del gas para este caso en unidades de centímetros cúbicos por segundo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ).

- En la fase de almacenamiento del gas, se utilizaron tres bolsas Tedlar (una para cada celda), las cuales son utilizadas para el almacenamiento de fluidos gaseosos. Estas bolsas se conectaron al sistema de extracción pasiva del gas en cada celda, debido a que el caudal del gas era mínimo, se tenían que dejar por varios días, para que una vez relativamente llena con el gas, pudiera ser llevada al laboratorio y posteriormente hacer el estudio correspondiente de la composición del mismo.

#### **4.2. Parametrización de variables**

La producción de biogás depende de una serie de variables, entre ellas las climática y correspondientes de la zona geográfica de ubicación del proyecto, en las cuales podemos encontrar: la temperatura, la radiación solar, precipitaciones, etc. Ya que éstas tienen una menor relevancia y afectan al sistema indirectamente, además representan imposibilidad para controlarlas.

También existen variables que inciden directamente en el proceso de producción del biogás, ya que factores como lo son la humedad de los residuos y el alto porcentaje de materia orgánica en la celda, facilitan la proliferación de los microorganismos productores de gas metano. Estas condiciones fueron manipuladas durante el proceso experimental de la producción del biogás, ya que el montaje de las celdas se desarrolló simulando un sistema cerrado y aumentando o disminuyendo la cantidad de materia orgánica al interior de una u otra celda y de esta forma poderse alterar la humedad de los residuos en función de la cantidad materia orgánica en las mismas.

Para este caso, Bogotá D.C. posee un promedio anual de su temperatura de 13,1 °C (a mayor temperatura mayor capacidad de proliferación de microorganismos metanogénicos), la precipitación es de unos 797 mm, la radiación solar corresponde de 9-10 IUUV (Índice Ultravioleta) y el brillo solar a unas 3 – 4 horas al día, siendo indirecta la incidencia de éstas últimas sobre el proyecto (a mayor precipitación sobre la zona, menor es la cantidad de brillo solar y radiación solar). (IDEAM, 2020).

La fracción de residuo es definida como la clasificación de los tipos de residuos dispuestos al interior de una celda y su relevancia es el porcentaje de materia orgánica.

Por otro lado y frente al tiempo de concentración de los residuos, entre más tiempo se encuentren almacenados en una celda mayor será la concentración para aumentar la producción de biogás. La humedad en los residuos al contener una fracción orgánica poseen una alta cantidad de agua, la cual se convierte posteriormente en lixiviados.

Finalmente el caudal de biogás determina la cantidad del compuesto generado por la celda de prueba como consecuencia de la descomposición de los residuos al interior de la misma, medido en litros por minuto (l/min).

#### **4.3. Montaje del Diseño Experimental**

Con el fin de no hacer uso de energía, el gas fue evacuado de manera pasiva y el flujo de éste fue medido por medio de un rotámetro de la marca LTZ-6T, el cual permitió medir caudales entre 0,019 L/s a 0,0028 L/s, la evacuación pasiva del gas se presenta por la acumulación en la zona de gas de la celda y por lo tanto el aumento de presión, de modo que al superar la presión del sistema de limpieza de gas por burbujeo del gas de salida en una solución de KOH 1 N se midió el flujo de metano principalmente.

La solución de limpieza del gas con KOH le fue adicionada fenolftaleína para observar el cambio de color en la solución en la medida que el CO<sub>2</sub> se absorbe en esta y así determinar en qué momento se debe reemplazar la solución de KOH.

El montaje de las celdas se desarrolló siguiendo el modelo metodológico mencionado anteriormente, así, se construyeron tres celdas las cuales cumplieron las siguientes especificaciones:

- La primera celda se construyó con una caneca plástica, la cual tiene una capacidad máxima de 7,013 galones (gal) y en el cual se depositó aproximadamente siete centímetros (7 cm) de grava, colocada allí para

permitir el paso de los lixiviados, unos 36 cm de residuos los cuales corresponden a 6,43 kg de residuos sólidos con un 90% de fracción orgánica. Adicionalmente, se instaló una válvula para la liberación de los lixiviados y otra que permite la extracción pasiva del biogás hacia un sistema medición del flujo del gas.

- La segunda celda se construyó con una caneca plástica, la cual tiene una capacidad máxima de 7,013 galones (gal) y en el cual se depositó aproximadamente siete centímetros (7 cm) de grava, colocada allí para permitir el paso de los lixiviados, unos 36 cm de residuos los cuales corresponden a 6,43 Kg de residuos sólidos con un 80% de fracción orgánica. Adicionalmente, se instaló una válvula para la liberación de los lixiviados y otra que permite la extracción pasiva del biogás hacia un sistema medición del flujo del gas.
- La segunda celda se construyó con una caneca plástica, la cual tiene una capacidad máxima de 7,013 galones (gal) y en el cual se depositó aproximadamente siete centímetros (7 cm) de grava, colocada allí para permitir el paso de los lixiviados, unos 36 cm de residuos los cuales corresponden a 6,43 Kg de residuos sólidos con un 50% de fracción orgánica. Adicionalmente, se instaló una válvula para la liberación de los lixiviados y otra que permite la extracción pasiva del biogás hacia un sistema medición del flujo del gas.

#### **4.4. Cálculo de la cantidad y composición del biogás por el método LadGEM y el modelo Orsat.**

##### **4.4.1. Cálculo Teórico Modelo LandGem**

El método LandGEM es un modelo diseñado por la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, el cual permite hacer una proyección del comportamiento del biogás producido en un relleno sanitario desde que es abierto hasta su cierre. Ahora bien, este sistema está diseñado para ser aplicado en años, al cual se hizo la conversión para trabajarlo en meses, además hay dos factores

principales del sistema, el cual permite hacer los cálculos de dos formas; de un lado se tiene residuos de degradación lenta en el cual los resultados pueden verse reflejados hasta en 15 años y de otro lado para residuos de degradación rápida, en el que los resultados pueden reflejarse hasta en 5 años máximo. Así pues, es este último método que se pensó aplicar ya que las fracciones de materia orgánica fueron puestas intencionalmente para que resaltaran en mayor cantidad.

El modelo parte de la siguiente ecuación, la cual permite determinar la composición de los residuos orgánicos, de acuerdo a sus compuestos químicos y a sus coeficientes estequiométricos respectivos.

Para esto y como se mencionó anteriormente la composición principal de los residuos es materia orgánica y de mayor relevancia debido a la descomposición de esta principalmente, se obtiene el biogás. Así pues, los datos de entrada que se aplicaron para obtener el comportamiento de las celdas de la prueba laboratorio por el método LandGem se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Datos de Entrada por Celda

CELDA	MASA TOTAL DE RESIDUOS (Kg)	% RO*C	MASA RO*C (Kg)	% RJ*C	MASA RJ*C (Kg)	% P*C	MASA P*C (Kg)	% Cr*C	MASA Cr*C (Kg)
1	6,43	88%	5,6584	8%	0,5144	2,5%	0,16075	2%	0,09645
2		80%	5,144	12%	0,7716	5%	0,3215	3%	0,1929
3		50%	3,215	40%	2,572	6%	0,3858	4%	0,2572

Fuente: Autores 2020

En los datos de entrada por cada celda **Tabla 3**, se muestra a cada una de las celdas de la prueba laboratorio con la masa total de residuos dispuesta en cada una, el porcentaje de residuo orgánico por celda (**% RO\*C**), la masa de residuos orgánicos por celda (**RO\*C**), el porcentaje de residuos de jardín por celda (**% RJ\*C**), la masa de residuos de jardín por celda (**RJ\*C**), el porcentaje de residuo de papel por celda (**% P\*C**), la masa de residuos de papel por celda (**P\*C**), el porcentaje de residuos de cartón por celda (**% RC\*C**) y la masa de residuos de

cartón por celda (**RC\*C**). En este caso no se toma en cuenta ningún residuo plástico debido a que su descomposición es muy lenta y no es significativa para la generación del gas.

En este sentido, cada una de las celdas tiene composición diferente en relación con el porcentaje de materia orgánica, de tal forma que se pueda evaluar el comportamiento de cada una de las celdas.

La celda uno (1) contiene una relación en porcentaje de 88% de materia orgánica neta, lo que quiere decir que corresponde a restos de comida, y a un 12% de otros materiales de degradación media y lenta, evidenciándose así en las siguientes tablas la composición de los residuos caracterizados para la producción del gas.

Tabla 4. Porcentaje en peso, base seca celda 1

Tipo de Residuo	C	H	O	N
Residuos de comida	48	6,4	37,6	2,6
Papel	43,5	6	44	0,3
Cartón	44	5,9	44,6	0,3
Podas	47,8	6	38	3,4

Fuente: Autores 2020

Tabla 5. Determinación de la masa de los elementos y coeficientes estequiométricos.

Tipo de residuos	Masa	% masa	% humedad	Masa seca	Masa de Carbono	Masa de Hidrógeno	Masa de Oxígeno	Masa de Nitrógeno
Residuos de comida	5,6584	88,00	70	1,6975	0,8148	0,1086	0,6383	0,0441
Papel	0,16075	2,50	5	0,1527	0,0664	0,0092	0,0672	0,0005
Cartón	0,09645	1,50	5	0,0916	0,0403	0,0054	0,0409	0,0003
Podas	0,5144	8,00	70	0,1543	0,0738	0,0093	0,0586	0,0052
Total	6,43			2,0962	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>
Coeficientes estequiométricos					24	38	15	1

Fuente. Autores 2020

Reemplazando en la **ecuación 2**, se determinó la masa de los compuestos, esto, fue tenido en cuenta para la determinación de la cantidad de biogás y sus fracciones volumétricas por el método LadGem.

Tabla 6. Masa de los compuestos Celda 1

$C_aH_bO_cN_d$	$\left(\frac{4a-b-2c+3d}{4}\right)H_2O$	$\left(\frac{4a+b-2c-3d}{8}\right)CH_4$	$\left(\frac{4a-b+2c+3d}{8}\right)CO_2$	$dNH_3$
580	139,5	202	500,5	17

Fuente. Autores 2020

En las **tablas 5, 8 y 11** se muestran los porcentajes en peso de masa seca de los residuos, para cada uno de los elementos principales que componen a los residuos, reflejando así, la masa de cada uno de estos en kg.

En las **tablas 6, 9 y 12** se muestran el total de la masa de cada elemento y los coeficientes estequiométricos, los cuales son empleados en la determinación de la cantidad de biogás producido en cada celda por el método LandGem.

En las **tablas 7, 10 y 13** se muestran la masa de los compuestos químicos y obtenidos de la **ecuación 2**, así de esta forma, poder determinar las fracciones volumétricas de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

Para la celda dos (2) se tiene una relación en porcentaje de 80% de materia orgánica neta frente a un 20% con otros materiales orgánicos pero que presentan un factor menor para la producción del gas, y es en este caso en donde interviene el microorganismo, aunque no se tiene un factor que aumente la producción del gas de forma teórica. De esta forma en la siguiente tabla se muestra la composición de los residuos caracterizados para la producción del biogás.

Tabla 7. Porcentaje en peso, base seca celda 2

TIPO DE RESIDUO	C	H	O	N
Residuos de comida	0,741	0,099	0,580	0,040
Papel	0,133	0,018	0,134	0,001
Cartón	0,081	0,011	0,082	0,002
Residuos de jardín	0,184	0,023	0,147	0,001

Fuente. Autores 2020

Tabla 8. Determinación de la masa de los elementos y coeficientes estequiométricos

Tipo de residuos	Masa	% masa	% humedad	Masa seca	Masa de carbono	Masa de Hidrógeno	Masa de Oxígeno	Masa de Nitrógeno
Residuos de comida	5,1440	80	70	1,5432	0,011435	0,001528	0,008951	0,000617
Papel	0,2572	4	15	0,21862	0,000291	0,000039	0,000293	0,000002
Cartón	0,1929	3	15	0,163965	0,000133	0,000018	0,000134	0,000003
Podas	0,8359	13	60	0,33436	0,000615	0,000077	0,000492	0,000003
Total	6,43			2,260145	C	H	O	N
Coeficientes Estequiométricos					24	38	14	1

Fuente. Autores 2020

Tabla 9. Masa de los compuestos Celda 2

$C_aH_bO_cN_d$	$\left(\frac{4a-b-2c+3d}{4}\right)H_2O$	$\left(\frac{4a+b-2c-3d}{8}\right)CH_4$	$\left(\frac{4a-b+2c+3d}{8}\right)CO_2$	$dNH_3$
564	121,5	54	489,5	17

Fuente. Autores 2020

Para la celda tres (3) se tiene una relación en porcentajes iguales de 50% de materia orgánica neta frente a un 50% con otros materiales orgánicos. De esta forma en las siguientes tablas se muestra la composición de los residuos caracterizados para la producción del biogás.

Tabla 10. Porcentaje en peso, base seca celda 3

TIPO DE RESIDUO	C	H	O	N
Residuos de comida	0,463	0,062	0,363	0,025
Papel	0,129	0,022	0,161	0,001
Cartón	0,108	0,014	0,109	0,003
Residuos de jardín	0,615	0,077	0,489	0,004

Fuente. Autores 2020

Tabla 11. Determinación de la masa de los elementos, moles y coeficientes estequiométricos

Tipo de residuos	Masa	% masa	% humedad	Masa seca	Masa de carbono	Masa de Hidrógeno	Masa de Oxígeno	Masa de Nitrógeno
Residuos de comida	3,5365	55,00	70	1,06095	0,004912	0,000658	0,003851	0,000265
Papel	0,3858	6,00	15	0,32793	0,000423	0,000072	0,000528	0,000003
Cartón	0,2572	4,00	15	0,21862	0,000236	0,000031	0,000238	0,000007
Podas	2,2505	35,00	60	0,9002	0,005536	0,000693	0,004402	0,000036
Total	6,43			2,5077	C	H	O	N
Coeficientes Estequiométricos					42	66	26	1

Fuente. Autores 2020

Tabla 12. Producción del gas Celda 3

$C_aH_bO_cN_d$	$\left(\frac{4a-b-2c+3d}{4}\right)H_2O$	$\left(\frac{4a+b-2c-3d}{8}\right)CH_4$	$\left(\frac{4a-b+2c+3d}{8}\right)CO_2$	$dNH_3$
1000	211,5	94	863,5	17

Fuente. Autores 2020

#### 4.4.2. Calculo Experimental Modelo Orsat

Para el análisis experimental, se tomó como base el sistema Orsat, ajustado a las pruebas básicas de determinación de CO<sub>2</sub>, usando como solución el hidróxido de potasio (KOH) 1N.

En los materiales del método fue necesario emplear:

- Equipo Orsat
  - Esqueleto metálico del sistema
  - Bureta de 100 ml
  - Recipiente contenedor de 100 ml para KOH
  - Sistema interconector de recipientes
  - Recipiente contenedor de solución confinante de 100 ml
  - Manguera de 60 cm de larga x 1 cm de diámetro.
  - Bomba de mano (Sistema de purga del sistema)
  - 3 bolsas Tedlar de 3 litros con el gas contenido de cada una de las celdas
  - 150 ml de Hidróxido de Potasio (KOH) 1N
  - 100 ml de solución confinante

Una vez tomadas las muestras de cada una de las celdas, el montaje para el procedimiento experimental en el laboratorio fue el siguiente:

- Para el armado del equipo Orsat, primero se coloca el esqueleto o soporte para los accesorios. Se asegura la bureta, el recipiente contenedor del CO<sub>2</sub> y el recipiente con la solución confinante y su respectivo sistema interconector de tubería y el sistema de inyección del biogás.
- Se llena el recipiente contenedor de CO<sub>2</sub> con el KOH y se nivela hasta el aforo.
- Se hace la conexión del sistema de inyección de biogás a la bolsa Tedlar y por consiguiente al equipo orsat.
- Se hace una purga a la bureta para eliminar aire contenido en ella y se procede a nivelarla con solución confinante.

- Se abre la bolsa Tedlar que contiene la muestra de biogás para el ensayo.
- Una vez dado el paso del biogás, se procede a hacer la purga de todo el sistema con una bomba manual de vacío, para eliminar el aire contenido en la tubería de interconexión de tuberías del sistema orsat.
- A continuación, se hace un desplazamiento por succión de la solución confinante hasta llevar al aforo para que la bureta quede llena con el gas muestra.
- Se procede a abrir el paso de gas hacia el recipiente que contiene el KOH para hacer la disolución del CO<sub>2</sub>, para eso con la el recipiente de la solución confinante por presión, se pasa el gas 3 veces desde el recipiente con KOK hacia la bureta. Una vez realizado eso, se procede a comparar el nivel de la solución confinante con el de la bureta y el volumen desplazado es tomado.
- Para tener mayor certeza de los datos recolectados, se debe repetir el proceso 3 veces, y dos datos deben ser iguales para hacer el registro de la muestra. Y así para cada una de las muestras recolectadas de las 3 celdas.

Así pues, para cada una de pruebas de laboratorio que se adelantaron, diariamente se hicieron 3 inoculaciones de biogás al sistema por día y por cada celda, a lo que equivalen 28 pruebas por celda y 84 resultados en total. Por lo cual se tomaron los promedio diarios de cada uno de los ensayos y se promediaron semanalmente como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Promedio de CO<sub>2</sub> obtenido por inoculación semanal

<b>Semana</b>	<b>Celda 1 (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Celda 2 (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Celda 3 (cm<sup>3</sup>)</b>
1	91	49	37
2	81	40	29
3	68	27	20
4	56	15	8
5	44	3	1

Fuente: Autores 2020

En las **tabla 14** se muestra los resultados promedios obtenidos de cada una de las pruebas realizadas experimentalmente en el laboratorio, las cuales se llevaron a cabo un promedio de 6 días a la semana, durante 5 semanas. Cada una de las inoculaciones de biogás arroja un resultado de volumen de CO<sub>2</sub> en unidades de cm<sup>3</sup>.

En consecuencia, de acuerdo con el volumen de CO<sub>2</sub> obtenido en cada uno de los ensayos efectuados en el laboratorio, por las muestras tomadas de biogás de cada una de las celdas y por el tiempo evaluado, se continuó con la determinación del volumen en m<sup>3</sup> de los compuestos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, esto teniendo en cuenta, que las fracciones de metano y son de 40% y 60% respectivamente, Lo cual se puede ver en las siguientes tablas:

Tabla 14. Producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por cada m<sup>3</sup> de biogás, celda 1.

SEMANA	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> por Semana	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> por Semana
1	0,091000	0,136500
2	0,081000	0,121500
3	0,068000	0,102000
4	0,056000	0,084000
5	0,044000	0,066000
TOTAL	0,340000	0,510000

Fuente: Autores 2020

Tabla 15. Producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por cada m<sup>3</sup> de biogás, celda 2.

SEMANA	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> por Semana	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> por Semana
1	0,04933	0,0740
2	0,04000	0,0600
3	0,02700	0,0405
4	0,01500	0,0225
5	0,00300	0,0045
TOTAL	0,13433	0,2015

Fuente: Autores 2020

Tabla 16. Producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por cada m<sup>3</sup> de biogás, celda 3.

SEMANA	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> por Semana	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> por Semana
1	0,037000	0,055500
2	0,028524	0,042786
3	0,019500	0,029250
4	0,008167	0,012250
5	0,001167	0,001750
TOTAL	0,094357	0,141536

Fuente: Autores 2020

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De conformidad con el objetivo general el cual se centra en determinar la cantidad y la composición del biogás producido de acuerdo con los modelos LandGem, los cálculos fueron efectuados principalmente para un periodo de cinco meses para tener una correlación con los resultados obtenidos en por el modelo experimental principio del modelo Orsat y máximo para proyección de 7 años.

El volumen de biogás generado para cada una de las celdas 1, 2 y 3 para el periodo objetivo anteriormente mencionado, puede evidenciarse en las **tablas 17, 18 y 19**, así como la cantidad de sus compuestos de metano y dióxido de carbono se evidencia a continuación.

Tabla 17. Volumen de biogás generado celda 1

Volumen de CH <sub>4</sub> producido	0,53010	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg Residuo Sólido Seco (RSS)
Volumen de CO <sub>2</sub> producido	0,43671	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> /kg RSS
Volumen total de gas producido	0,96681	m <sup>3</sup> de gas/kg RSS

Fuente: Autores 2020

Tabla 18. Volumen de biogás generado celda 2

Volumen de CH <sub>4</sub> producido	0,14573	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg Residuo Sólido Seco (RSS)
Volumen de CO <sub>2</sub> producido	0,43922	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> /kg RSS
Volumen total de gas producido	0,58495	m <sup>3</sup> de gas/kg RSS

Fuente: Autores 2020

Tabla 19. Volumen de biogás generado celda 3

Volumen de CH <sub>4</sub> producido	0,14307	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg Residuo Sólido Seco (RSS)
Volumen de CO <sub>2</sub> producido	0,43699	m <sup>3</sup> de CO <sub>2</sub> /kg RSS
Volumen total de gas producido	0,58007	m <sup>3</sup> de gas/kg RSS

Fuente: Autores 2020

Para cada uno de los resultados obtenidos para cada una de las celdas se aplicó la siguiente **ecuación 8** correspondiente al modelo LandGem para la determinación del caudal de gas metano producido.

Ecuación 8: Calculo del caudal de Biogás en la celda

$$Q_T = \sum_{i=1}^n 2 * k * L_o * M_i * e^{-(k*t_i)}$$

Fuente. (Victoria L & Alex S, 2009)

En ese orden de ideas **L<sub>o</sub>** corresponde al potencial de generación de metano, **k** es la constante cinética de generación de metano, el cual fue tomado del Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás (Victoria L & Alex S, 2009) claramente, esto teniendo en cuenta el clima que presenta Bogotá D.C. el cual pertenece a moderadamente seco, y a la composición de los residuos se calculó el **k** para cada una de las celdas teniendo en cuenta la producción experimental captada por los rotámetros. Esto también partiendo que dependiendo directamente de la cantidad de humedad en los residuos, la cantidad de materia orgánica y la cantidad de microorganismos descomponedores de la materia orgánica y generadores de biogás. Por último **M<sub>i</sub>** es la masa de residuos sólidos húmedos.

De acuerdo al volumen del biogás producido y el de sus compuestos en relación de la masa de residuo de base seca, se aplicó la ecuación anteriormente mencionada con el fin de determinar el caudal de flujo del gas, por lo tanto y resaltando la importancia para la investigación de determinar la cantidad de metano producido en las celdas, a continuación se muestra en las siguientes tablas el caudal producido de metano en unidades de m<sup>3</sup> por mes, por celda.

Tabla 20. Caudal de CH<sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 1.

Variable	Unidades	Valor
Mi	kg	6,43
Lo	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg Residuos	0,17281268
K	meses <sup>-1</sup>	0,158
Tiempo	Unidades	Valor
QT (mes 1)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,3005
QT (mes 2)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,2564
QT (mes 3)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,2189
QT (mes 4)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,1868
<b>QT (mes 5)</b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/mes</b>	<b>0,1594</b>
QT (mes 84)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0000006

Fuente. Autores 2020

El caudal de metano producido en un término de tiempo menor de un mes, siendo éste el dato mayor de volumen, hasta un máximo en el mes 84, reflejando el menor valor de volumen del compuesto, se evidencia en las **Tablas 20, 21 y 22**, pero siendo el del mes 5 el de mayor relevancia para la investigación.

Gráficamente el comportamiento del metano en relación al volumen producido por cada celda **figura 8** para un periodo de 5 meses, el volumen acumulado de metano **figura 9** para un periodo de 84 meses y el caudal emitido por mes **Figura 10** para el mismo tiempo, en unidades de metros cúbicos (m<sup>3</sup>/mes) se refleja a continuación:

Figura 8. Volumen de metano producido por mes, celda 1

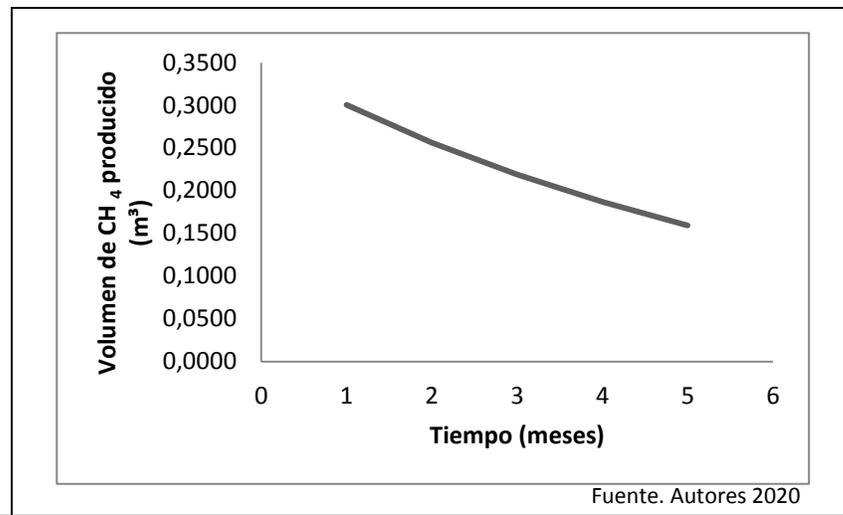


Figura 9. Volumen acumulado de metano a 7 años, celda 1

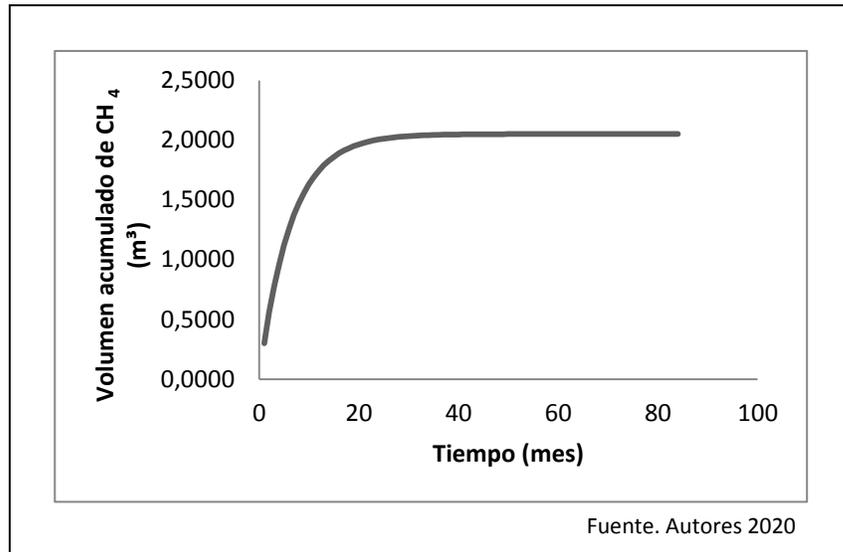
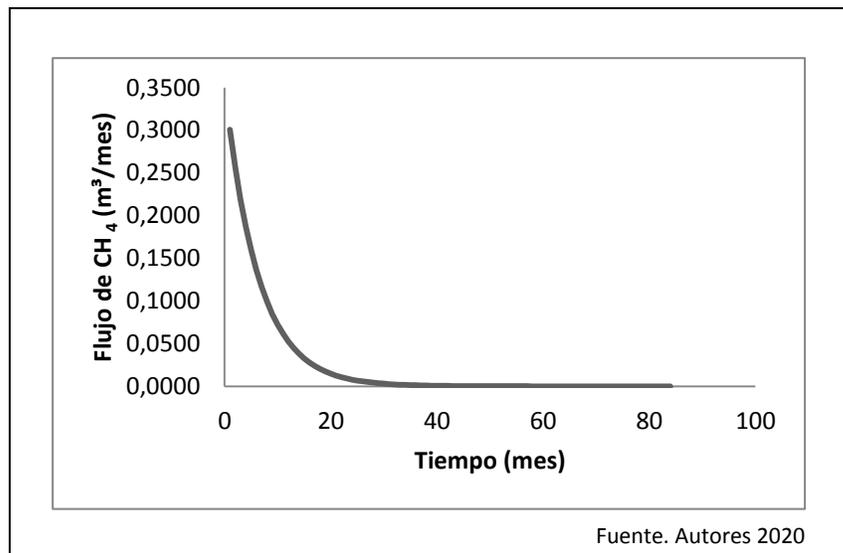


Figura 10. Caudal de metano por mes, celda 1



De acuerdo al comportamiento de la producción de metano en la celda 1 evidenciada en las **figuras 8, 9 y 10**, se puede observar en la primera figura la producción del gas durante los 5 meses evaluados. La segunda figura refleja la cantidad de metano producido en un periodo de 84 meses (7 años), en donde ésta

haciende hasta los 2 m<sup>3</sup> y allí se estandariza. Y por último la última figura muestra la velocidad de flujo del gas durante el periodo máximo de producción, en donde al termino de 20 meses se estabiliza en la menor producción tendiendo a cero.

Tabla 21. Caudal de CH<sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 2.

Variable	Unidades	Valor
Mi	kg	6,43
Lo	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg Residuos	0,0512
K	meses <sup>-1</sup>	0,072
Tiempo	Unidades	Valor
QT <sub>(mes 1)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0441
QT <sub>(mes 2)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0411
QT <sub>(mes 3)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0382
QT <sub>(mes 4)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0356
<b>QT<sub>(mes 5)</sub></b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/mes</b>	<b>0,0331</b>
QT <sub>(mes 84)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0001121

Fuente. Autores 2020

Continuando con el proceso, la celda dos refleja un singular comportamiento en razón a la velocidad de producción de metano en relación al volumen producido, el volumen acumulado de metano y el caudal emitido por mes en unidades de metros cúbicos (m<sup>3</sup>/mes) reflejó el siguiente comportamiento:

Figura 11. Volumen de metano producido por mes celda 2

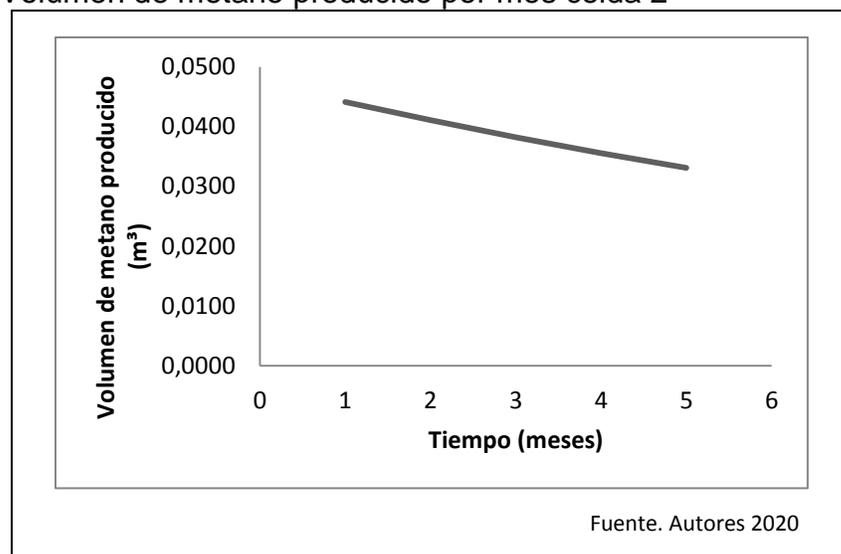


Figura 12. Volumen acumulado de metano a 7 años celda 2.

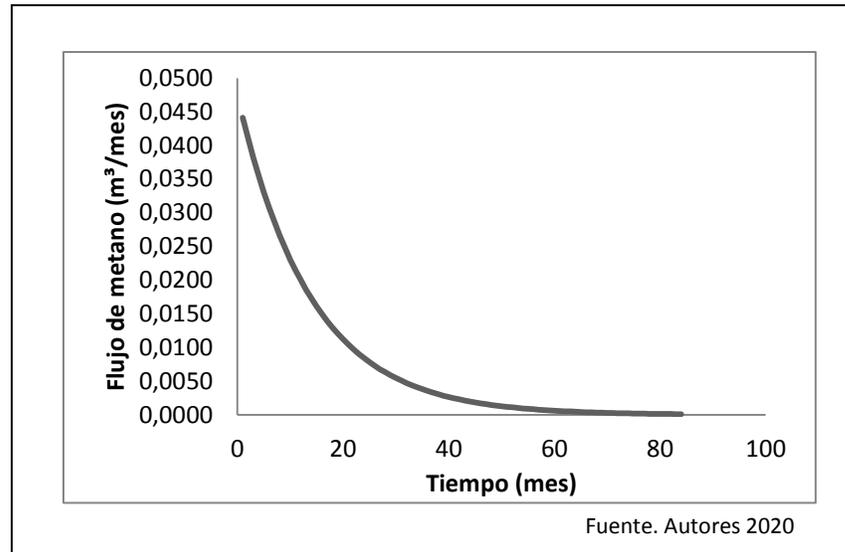
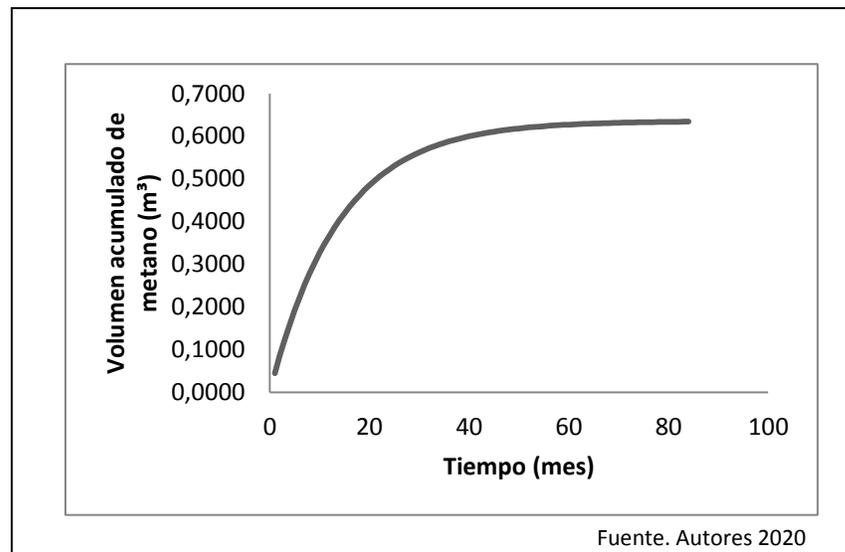


Figura 13. Caudal de metano por mes celda 2.



Recordando que la celda 2 fue la inoculada con el microorganismo, esta refleja una velocidad superior de producción del gas a la de las demás teniendo en cuenta las condiciones intrínsecas de cada celda, esto pues, debido a que los microorganismos inoculados en ésta, aceleraron el proceso de producción del gas y por consiguiente hubo un mejor rendimiento en esta celda. Para evidenciar este

comportamiento, se hizo uso de los resultados obtenidos empíricamente y al determinando el porcentaje de sobreproducción de metano por encima del obtenido por el método LandGem.

Tabla 22. Caudal de CH<sub>4</sub> producido en 5 meses, celda 3.

Variable	Unidades	Valor
Mi	kg	6,43
Lo	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg Residuos	0,055799087
K	meses <sup>-1</sup>	0,025
Tiempo	Unidades	Valor
QT <sub>(mes 1)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0176
QT <sub>(mes 2)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0172
QT <sub>(mes 3)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0168
QT <sub>(mes 4)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,0163
<b>QT<sub>(mes 5)</sub></b>	<b>m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/mes</b>	<b>0,0159</b>
QT <sub>(mes 84)</sub>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /mes	0,00218

Fuente. Autores 2020

En la tercera celda, el comportamiento del metano en relación al volumen producido así como el volumen acumulado de metano y el caudal emitido por mes en unidades de metros cúbicos (m<sup>3</sup>/mes) reflejó el siguiente comportamiento:

Figura 14. Volumen de metano producido por mes celda 3.

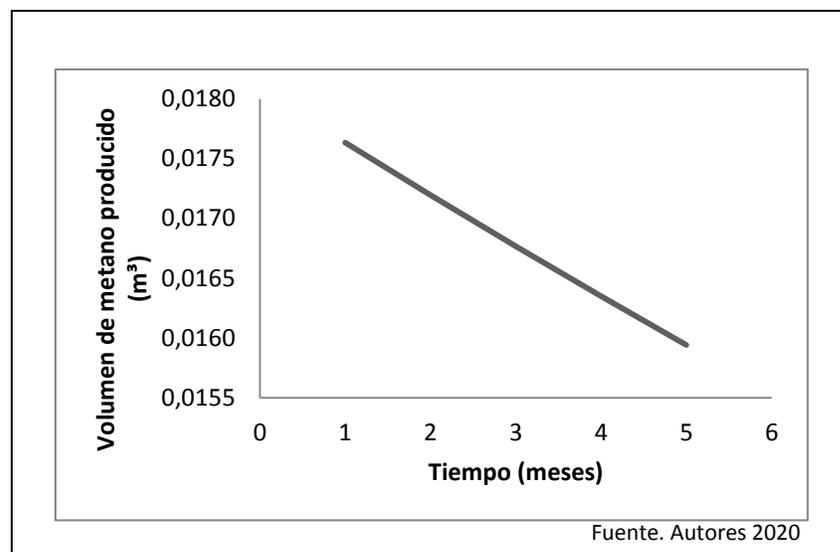


Figura 15. Volumen acumulado de metano a 7 años celda 3.

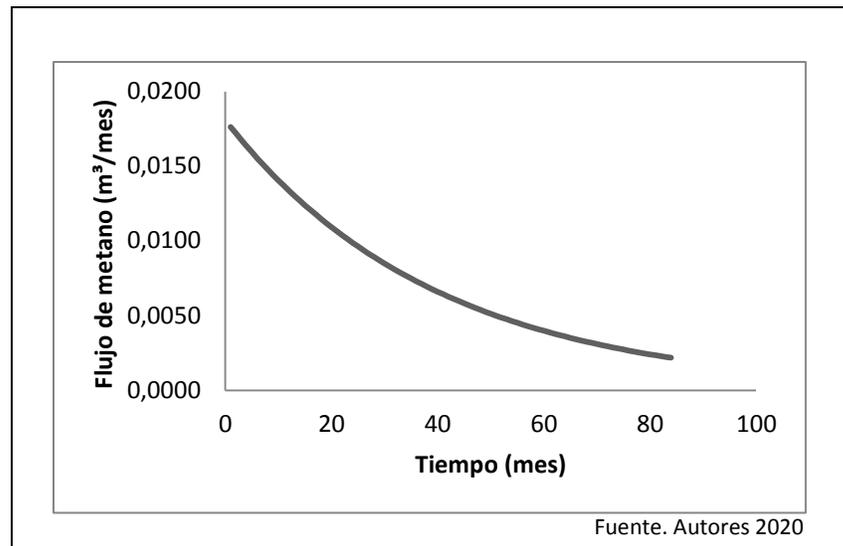
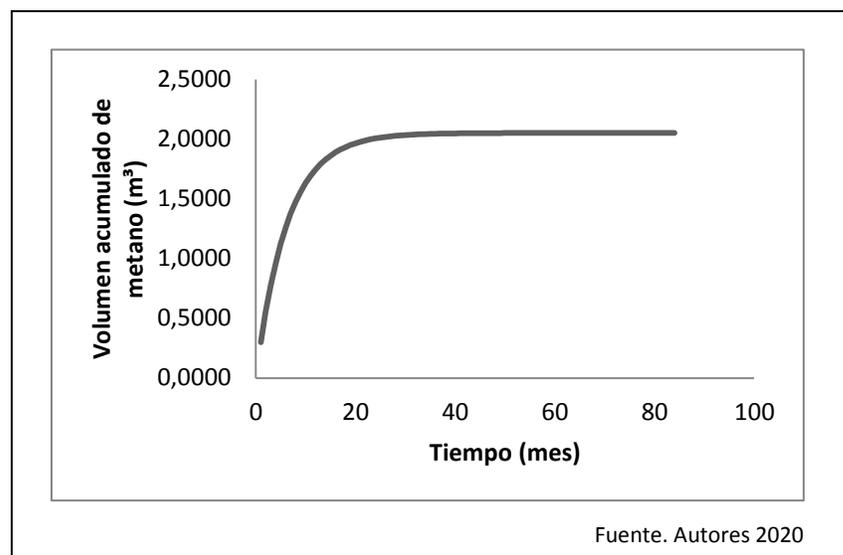


Figura 16. Caudal de metano por mes celda 3.

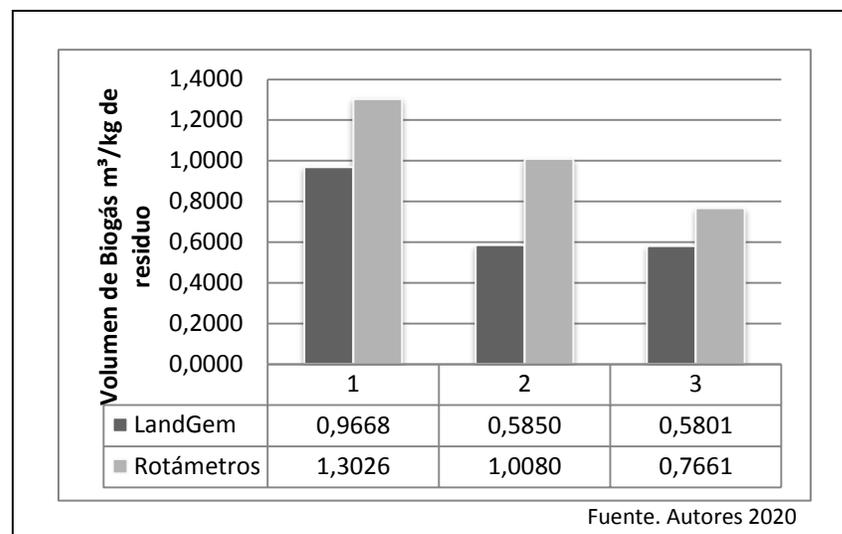


En la celda 3 se muestra un comportamiento más equilibrado y con un margen de acercamiento superior a un relleno sanitario a escala real, esto por la caracterización de los residuos dispuestos allí. De este modo, la celda 3 fue la celda de menor producción de metano, pero si la comparamos con el modelo de

laboratorio, es la que refleja el menor margen de error, ya que claramente coincide con las condiciones propias y sin alternaciones de zona de aplicación del proyecto.

De otro lado, el consolidado del comportamiento del biogás y sus compuestos de metano y dióxido de carbono producido en las celdas a escala laboratorio del relleno sanitario, se puede evidenciar en los siguientes gráficos, en los cuales se muestra cual de las celdas tuvo el mejor comportamiento, de acuerdo a las condiciones propias y aplicadas a cada una de estas y por lo cual se pudo demostrar el objeto de esta investigación en la producción de los compuestos gaseosos.

Figura 17. Volumen de biogás producido por celda



La **Figura 17** muestra la producción de biogás en cada una de las celdas con base a los dos modelos aplicados. El modelo LandGem revela una producción de gas menor que al valor captado por los rotámetros, que para cada celda fue constante, en relación a sus condiciones físicas y químicas, se dio la máxima producción de gas para la celda uno y la menor para la celda dos.

Figura 18. Volumen de CO<sub>2</sub> producido por celda

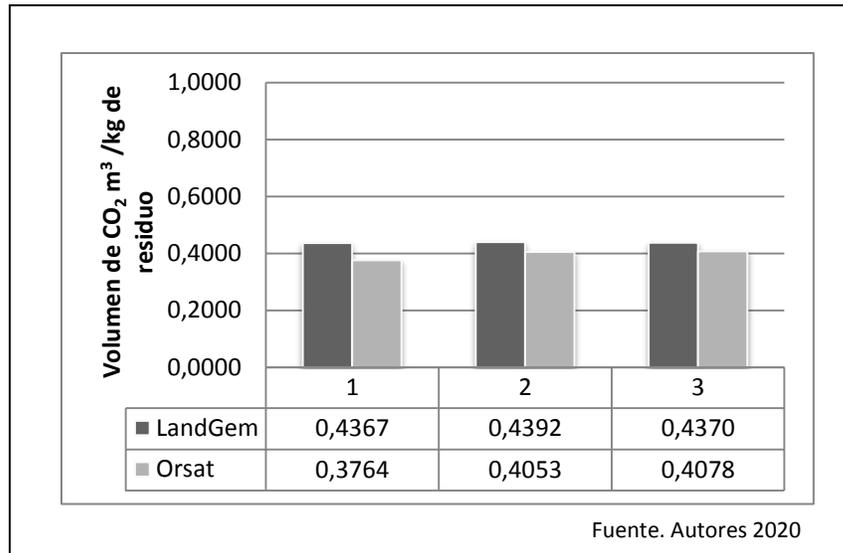
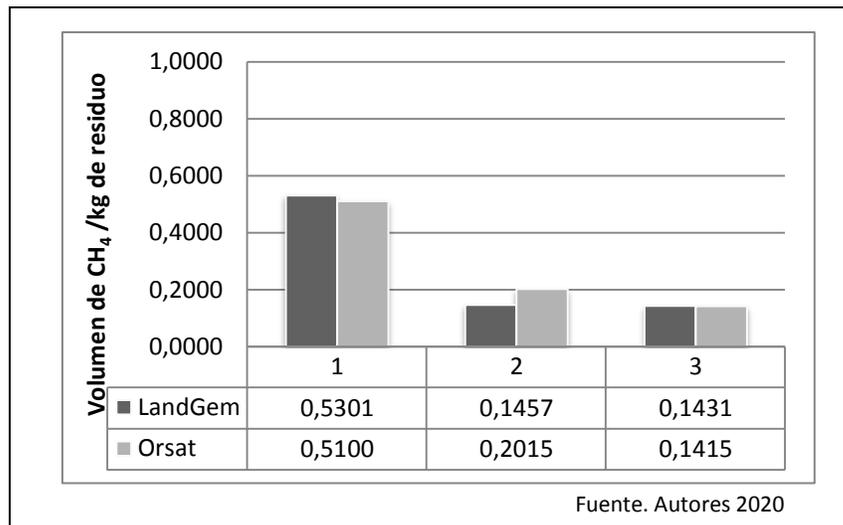


Figura 19. Volumen de CH<sub>4</sub> producido por celda



En la **figura 19** se muestra el comportamiento de la producción de metano por los dos métodos aplicados; LandGem y el modelo Orsat, frente a los cuales se evidencia un comportamiento similar y en donde se tiene un porcentaje de error aceptable entre el 3,39% y 6,95% para las celdas 1 y 3, para la celda 2 ocurre un caso excepcional en donde arroja un porcentaje negativo de -38%, lo que quiere decir que el volumen obtenido del gas por el modelo experimental fue superior que el del modelo teórico, caso que no ocurre con las otras dos celdas.

La celda de mayor producción de metano fue la celda número 1, a pesar de que esta no fue inoculada con microorganismos metanogénicos, la composición de los residuos que en mayor proporción fueron residuos de comida es la causa de una mayor tasa de producción del gas. De otro lado, la celda 2 inoculada con el microorganismo, logro tener una mayor tasa de generación que el modelo Landgem como se muestra en la **figura 19**, siendo el único caso de las 3 celdas. Finalmente, la celda 3 fue la de menor producción y esto es debido a que contenía la menor cantidad de materia orgánica.

El comportamiento de generación de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> en cada una de las 3 celdas fue constante y similar en los dos modelos aplicados (ver figura 18), siendo la celda numero 3 la que refleja una ligera mayor producción del compuesto, además que fue esta celda la que fue inoculada con el microorganismo, para aumentar la actividad bacteriana dentro de la celda.

En general, las celdas mostraron un buen comportamiento en función a la tasa de producción y al volumen de biogás, siendo así la celda numero 1 la generadora del mayor volumen de metano producido, seguido de la celda 2, está la de mayor tasa de generación de metano y por último celda 3, todo en función de sus condiciones.

## 6. CONCLUSIONES

- La cantidad de biogás pudo ser determinada de manera acertada por los dos métodos aplicados el modelo predictorio **LandGem** de la EPA y el modelo experimental de laboratorio **Orsat**, permitiendo hacer un análisis detallado del comportamiento del gas generado en el relleno sanitario. Del mismo modo, la composición del biogás efectivamente se pudo comprobar por método experimental en el laboratorio, teniendo como referencia la teoría, que los compuestos de éste correspondieron a metano (CH<sub>4</sub>) y Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), así como sus valores porcentuales.
- Los resultados obtenidos son coherentes con la teoría, puesto que la tasa de generación de biogás seria mayor o igual dependiendo del caso de estudio. Por otra parte, la inoculación de microorganismos metanogénicos incrementa la tasa de generación de metano logrando con ello reducir el tiempo de degradación de los residuos dispuestos. La tasa de generación

de biogás en las celdas 1, 2 y 3 alcanzo valores promedio de 0,227 m<sup>3</sup>/semana, 0,159 m<sup>3</sup>/semana, 0,135 m<sup>3</sup>/semana respectivamente. El mayor volumen de biogás generado en la celda 1 se debe a que esta fue cargada con una mayor cantidad de residuos orgánicos de rápida biodegradación, las celdas 2 y 3 contienen una cantidad de residuos relativamente similar en términos de masa y composición.

- Las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. permitieron que el proyecto fuera productor de biogás de una forma normal, con una tendencia a lenta, ya que se encuentra en una zona de clima frio a 2600 m.s.n.m. y moderadamente seco. Debido a que se establecieron ciertas condiciones controladas para la producción del biogás, se consiguió que gracias los recipientes utilizados como celdas fueron sistemas cerrado los cuales no permitían hacer intercambio de masa y por consiguiente, al no liberar los lixiviados de las celdas la humedad en los residuos permaneció constante, permitiendo así despreciar la perdida de humedad por evaporación y por lo tanto, la proliferación de bacterias se hizo a una velocidad progresiva y no acelerada.
- El modelo LanGem permito hacer una predicción acertada del comportamiento de la producción de biogás y el metano en cada una de las tres celdas del relleno sanitario a escala laboratorio. EL tiempo evaluado fue tazado a un máximo de siete años u ochenta y seis meses, en donde cada una de las celdas tienen una disminución considerable de producción del gas pasado el mes 20. Por otro lado cada una de las celdas arrojaron un volumen acumulado metano trascurrido el periodo de predicción de siete año y el cual fue de; 2,051 m<sup>3</sup> para la celda uno, 0,633 m<sup>3</sup> para la celda dos y 0,623 m<sup>3</sup> para la celda 3.

- La tasa de producción de metano para la celda 1 fue de  $0,5301 \text{ m}^3$  (LandGem) y  $0,5100 \text{ m}^3$  (Orsat) cuando la proporción de residuos orgánicos fue del 88%, para la celda 2 fue de  $0,1457 \text{ m}^3$  (LandGem) y  $0,2015 \text{ m}^3$  (Orsat) cuando la proporción de residuos orgánicos fue del 80%, para la celda 3 fue de  $0,1431 \text{ m}^3$  (LandGem) y  $0,1415 \text{ m}^3$  (Orsat) cuando la proporción de residuos orgánicos fue del 55%.
- Cabe señalar que dadas las condiciones en proporción de la materia orgánica entre las celdas 1 y 2 son similares, la producción de metano en la celda 2 es considerablemente inferior a la celda 1, y esto se debe a que en la celda 2 al haber un porcentaje menor de materia orgánica y mayor porcentaje de podas, papel, cartón y otros residuos, la producción del metano se desarrolló de una forma más lenta. Como el análisis de laboratorio se desarrolló en las primeras 5 semanas de la producción del biogás en las celdas, la celda 1 manifestó una producción espontanea del metano en este periodo de tiempo reflejando así este comportamiento súbito muy superior al de la celda 2.
- Por último es necesario señalar que por las situación de pandemia que atraviesa el mundo desde al año pasado, fue difícil poder acceder al laboratorio para realizar la caracterización del biogás por cromatografía de gases, a pesar de ello se realizó la caracterización de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  con base en el método de análisis de Orsat para sistemas de combustión, se consideró apropiado este método puesto que permite eliminar el  $\text{CO}_2$  de la mezcla de biogás y se puede obtener con aceptable precisión la cantidad o porcentaje volumétrico de  $\text{CH}_4$  en la mezcla.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda la presente investigación, como modelo teórico y práctico para investigaciones similares, ya que el modelo LandGem (teórico) corresponde al modelo internacional establecido por la EPA y por el cual puede representar un gravamen de mayor confiabilidad para la presentación de resultados de la fase experimental. El modelo Orsat (practico) corresponde a un sistema que permite la determinación de varios gases secundarios en la composición de gases primarios o de estudio como el biogás, siendo este método uno de los más efectivos en para la determinación de sus fracciones volumétricas.

De la misma forma se recomienda la presente tesis como fuente para proyectos similares y relacionados a la producción de biogás, de metano y dióxido de carbono generados por los rellenos sanitarios y correspondiente al estudio de los mismos. Así también, para proyectos de investigación como el estudio del potencial energético del metano o la contaminación y/o huella de carbono provocada por el dióxido de carbono.

Para la optimización de este proyecto se recomienda hacer ensayos piloto modificando la escala del proyecto para determinar cuáles son las mejores condiciones para aplicar a un relleno sanitario a escala real, así también se plante hacer un seguimiento a la proliferación y efectividad de los microorganismos metanogénicos utilizados, con el fin de evaluar con más precisión la efectividad de los mismos en la producción del metano.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Bian, Romgxing & Xin, Danhui & Xiaoli. (10 de Octubre de 2017). *Un modelo de simulación para las emisiones de metano de los vertederos con interacción de vegetación y cobertura del suelo*. Recuperado el 19 de Septiembre de 2018, de ResearchGate:

[https://www.researchgate.net/publication/320435562\\_A\\_simulation\\_model\\_for\\_methane\\_emissions\\_from\\_landfills\\_with\\_interaction\\_of\\_vegetation\\_and\\_cover\\_soil](https://www.researchgate.net/publication/320435562_A_simulation_model_for_methane_emissions_from_landfills_with_interaction_of_vegetation_and_cover_soil)

Camargo, Y & Velez,A. (24 y 25 de Septiembre de 2009). *EMISIONES DE BIOGAS PRODUCIDAS EN RELLENOS SANITARIOS*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2018, de <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones%20de%20biog%C3%A1s%20producidas%20en%20rellenos%20sanitarios.pdf>

Cepero, Blanco, Suarez. (2012). *Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores*. Matanzas: Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey".

Corrales L, Antolines D, Bohórquez J,Corredorr A. (2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>

DNP. (2016). Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsar%C3%A1n-en-cinco-a%C3%B1os,-advierte-el-DNP-.aspx>

e.K., A. E. (08 de 08 de 2017). *Aqualimpia*. Obtenido de <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>

EPM. (2010). *CUANTIFICACIÓN DE LAS RESERVAS Y EVALUACIÓN DEL RELLENO SANITARIO CURVA DE RODA*. Obtenido de [https://www.grupo-epm.com/site/Portals/1/biblioteca\\_epm\\_virtual/tesis/capitulo3.pdf](https://www.grupo-epm.com/site/Portals/1/biblioteca_epm_virtual/tesis/capitulo3.pdf)

FAO. (2011). *MANUAL DEL BIOGÁS*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

FERRANDO, A. L. (2019). *Modelización matemática de la producción de Biogas en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/129503/Lecuona%20->

%20Modelizaci%C3%B3n%20matem%C3%A1tica%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%20en%20vertederos%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20ur....pdf?sequence=4&isAllowed=y

Salud, B. N. (12 de Agosto de 2017). *Caracterización de la oxidación de metano en un sistema simulado de cobertura de vertedero comparando balances de masa de isótopos moleculares y estables*. Obtenido de Publimed: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28811145>

SUPERSERVICIOS. (2017). Obtenido de [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2.\\_disposicion\\_final\\_de\\_residuos\\_solidos\\_-\\_informe\\_2017.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf)

Universidad de Antioquia. (2002). *GUÍA PARA EL DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MANUALES*. Obtenido de <http://bvs.minsa.gob.pe/local/contenido/5846.pdf>

VERIVOX. (s.f). *DEPONIEGAS*. Obtenido de <https://www.verivox.de/gas/themen/deponiegas/>

Victoria L & Alex S. (2009). *Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás*. Obtenido de [https://www.globalmethane.org/\(X\(1\)S\(nujr3lxmddr2udfplqtxduq\)\)/documents/models/pdfs/ManualdeUsuarioModeloColombiano.pdf](https://www.globalmethane.org/(X(1)S(nujr3lxmddr2udfplqtxduq))/documents/models/pdfs/ManualdeUsuarioModeloColombiano.pdf)

Arvizu, J., & Huacuz, J. (2003). *BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS PARA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD*. Ciudad de Mexico. Retrieved from <https://www.ineel.mx/boletin042003/apli.pdf>

Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). *EMISIONES DE BIOGAS PRODUCIDAS EN RELLENOS SANITARIOS*. Retrieved from [http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios.pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones%20de%20biog%C3%A1s%20producidas%20en%20rellenos%20sanitarios.pdf)

Emkes, H., Coulon, F., & Wagland, S. (2015). A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. *Waste Management*, 43, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.003>

Emkes, H., Coulon, F., Wagland, S., Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., ... Fei, X. (2020). Diseño y Construcción de su sistema Orsat modificado para el análisis de biogás. *Waste Management*, 29(7), 232–241.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.032>

- Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. (2019). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *MethodsX*, 6, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>
- Fedailaine, M., Moussi, K., Khitous, M., Abada, S., Saber, M., & Tirichine, N. (2015). Modeling of the Anaerobic Digestion of Organic Waste for Biogas Production. *Procedia Computer Science*, 52, 730–737. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2015.05.086>
- Fjelsted, L., Christensen, A. G., Larsen, J. E., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2020). Closing the methane mass balance for an old closed Danish landfill. *Waste Management*, 102, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.045>
- Giménez Vera, M., Cardozo, C., & Carrera, C. (2012). *Optimal location of sanitary landfill applying multicriteria techniques in geographic information systems (GIS) in the metropolitan area of the Alto Paraná*. La Plata, Argentina . Retrieved from [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26832/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26832/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- IDEAM. (2020). *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*.
- Jaramillo, G., Liliana, H., & Zapata Márquez, M. (2008). *APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA*. Retrieved from <http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- 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*. Retrieved from <http://bvs.minsa.gob.pe/local/contenido/5846.pdf>
- Mambeli Barros, R., Lúcio Tiago Filho, G., Homero Ferreira da Silva, C., & Fernandes Pieroni, M. (2018). A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste Estudo de um projeto para geração de energia eólica no Brasil: Viabilidade econômica e emissões evitadas. View project STUDY OF THE POTENTIAL GENERATION OF ELECTRICAL EN. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.02.001>
- Noguera, K. M., & Oliveros, J. T. (2010, September). LOS RELLENOS SANITARIOS EN LATINOAMERICA: CASO COLOMBIANO . Retrieved August 7, 2020, from [http://www.accefyn.com/revista/Vol\\_34/132/347-356.pdf](http://www.accefyn.com/revista/Vol_34/132/347-356.pdf)

- Pastro F.D. (2010). *CAPTAZIONE DI BIOGAS DA DISCARICA: ANALISI DEL BIOGAS E SCELTA IMPIANTISTICA OTTIMALE*. Retrieved from [http://tesi.cab.unipd.it/40125/1/591694\\_Dal\\_Pastro\\_Filippo.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/40125/1/591694_Dal_Pastro_Filippo.pdf)
- Romo Millares, C. (2015). *Tendencia tecnológica Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU)*. Retrieved from <https://www.ineel.mx//boletin022015/tenden02.pdf>
- SUPERSERVICIOS. (2017). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos*. Retrieved from [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2.\\_disposicion\\_final\\_de\\_residuos\\_solidos\\_-\\_informe\\_2017.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf)
- Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R., & Valdivia, J. E. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*, 29(7), 2085–2091. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.004>
- Urrego, E. (2020). *PLANTA DE BIOGÁS RELLENO DOÑA JUANA*. Bogotá. Retrieved from <http://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/>
- YILMAZ, A. H. (2003). Modeling of the Anaerobic Decomposition of Solid Wastes. *Energy Sources*, 25(11), 1063–1072. <https://doi.org/10.1080/00908310390233586>