



ENERGY RECOVERY OF BIOGAS IN A LANDFILL

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO

Chávez, D. M.* Duarte, O. M. Ramón, J. A.*****

***Ms. Diana Marcela Chávez Ramírez, Docente de Cátedra,**
*Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agrarias y
del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander, e-mail:*
dianamarcelacr@ufps.edu.co

****Ing. Omar Mauricio Duarte Vera, Ingeniero Ambiental**
Universidad Francisco de Paula Santander, e-
mail:omarmauriciodv@ufps.edu.co

*****Ph. D. Jacipt Alexander Ramón V. Profesor Titular, Programa**
de Ingeniería Ambiental, Universidad de Pamplona, e-mail:
jacipt@unipamplona.edu.co

Abstract:

The final disposal of solid waste through landfill technology is one of the most used techniques in Colombia. According to the characterization of the waste, more than 60% of it, are organics. Product of the anaerobic decomposition of the waste that occurs in a sanitary landfill generates biogas, where the main components Methane and Carbon Dioxide, are considered Greenhouse Gases. In this study the biogas generation potential of the sanitary landfill of the Guayabal Environmental Technology Park was evaluated, with the purpose of energy recovery, decreasing methane emissions. Initially, the factors involved in the generation of biogas were analyzed, the projection was made according to the Colombian model of biogas generation, tests and measurements in the field, and finally, 2 alternatives were studied from the technical and environmental point of view.

Keywords: Biogas, landfill, energy recovery, methane, Greenhouse Gases GEI.





Resumen

La disposición final de residuos sólidos mediante la tecnología de relleno sanitario es una de las técnicas más utilizadas en Colombia. De acuerdo con la caracterización de los residuos, más del 60% de estos desechos son residuos orgánicos. Producto de la descomposición anaerobia de los residuos que se da en un relleno sanitario se genera biogás, donde los principales componentes el Metano y el Dióxido de Carbono, son considerados Gases de Efecto Invernadero. En este estudio se evaluó el potencial de generación de biogás del relleno sanitario del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, con fines de valorización energética, disminuyendo las emisiones de metano. Para ello inicialmente se evaluaron los factores que intervienen en la generación del biogás, se realizó la proyección con el modelo colombiano de generación de Biogás, pruebas y mediciones en campo y finalmente se evaluaron 2 alternativas desde el punto de vista técnico y ambiental.

Palabras claves: Biogás, relleno sanitario, valorización energética, metano, Gases de Efecto Invernadero GEI.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y los hábitos de consumo han conllevado al incremento exponencial en la generación de residuos a nivel mundial. El 94% de los residuos que son presentados al servicio de aseo en Colombia, son dispuestos en rellenos sanitarios. (SSPD, 2015). Los residuos sólidos dispuestos, son en su mayoría de origen orgánico. Producto de la descomposición anaerobia de estos residuos se genera biogás, compuesto principalmente por metano (50-60%), dióxido de carbono (40-50%), estos gases son una significativa fuente de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Dávila, 2009). Colombia se comprometió en la pasada Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), Conferencia de las Partes (COP21), a reducir el 20% de sus emisiones de GEI para el año 2030. Para ello se han formulado una serie de planes y programas sectoriales, que ayudarán a darle cumplimiento a este compromiso. (García, Vallejo, Lou, y Escobar, 2016).

El estudio se realizó en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal (PTAG) de Cúcuta, donde se disponen cerca del

85% de los residuos sólidos generados en el Departamento Norte de Santander.

El objetivo principal fue evaluar el potencial de generación de biogás en el relleno sanitario del PTAG, buscando la valorización energética como acción de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Inicialmente se realizó la evaluación de las condiciones operativas de la disposición de residuos y que intervienen en la generación del biogás. En la siguiente fase se hizo la estimación de generación de biogás y se comparó con las pruebas en campo realizadas con el equipo BIOGÁS 5000. Posteriormente se realizó el análisis de dos alternativas de aprovechamiento del biogás, como son la generación de electricidad y el uso como combustible directo. Se determinó que la totalidad del biogás producido debía aprovecharse para la generación de energía eléctrica con el uso de motores de combustión interna, realizando inicialmente la mejora de diferentes condiciones presentadas al interior de la celda de disposición, partiendo de la implementación de una cobertura final adecuada en la extensión total de la celda, la adquisición de equipos especializados para la captura y aprovechamiento y el





desarrollo de los sistemas de manejo de lixiviado y disposición de residuos.

1.1 Marco teórico

El biogás está compuesto por varios gases, siendo los más representativos el metano (CH_4) y el dióxido de Carbono (CO_2), también se encuentran cantidades pequeñas de amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2), Nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y el ácido Sulfhídrico (H_2S), (Blanco, Santaella, Verónica, y Levy, 2017).

La calidad y cantidad de biogás que se genere en un relleno sanitario varía según diferentes factores ambientales como: composición de los residuos sólidos, humedad de los residuos, características del sistema de operación del relleno sanitario, condiciones climáticas, sistema de extracción de biogás, entre otras. Estos parámetros son estudiados y evaluados para el desarrollo de los modelos de generación de biogás y para establecer las recomendaciones operativas, de manera que se mejore la calidad de la generación (Colmenares y Santos, 2008).

La modelación de la cantidad de biogás generado busca predecir la generación y recuperación del biogás basados en la disposición histórica de los residuos y en las proyecciones de cantidad a disponer, así como las estimaciones de las eficiencias de recolección. (Ludwing, 2009).

El Modelo Colombiano de Generación de Biogás presenta valores pre calculados para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L0), los cuales fueron desarrollados usando datos específicos del clima, de caracterización de residuos y datos específicos sobre el biogás de sitios representativos en Colombia (Global Methane Initiative, 2016).

1.2 Opciones tecnológicas para el aprovechamiento del biogás

Existen varias opciones para la conversión del biogás a energía: generación eléctrica para motores de combustión interna, turbinas, microturbinas, uso como combustible directo, cogeneración, combustibles alternativos, entre otros.

- Uso directo: Reemplaza a otros combustibles como el gas natural, el carbol o la gasolina, a su vez, se utiliza directamente en calderas, secadoras, hornos, u otras operaciones térmicas y en algunos rellenos sanitarios es usado para la evaporación de lixiviados (EPA, 2016).

-La cogeneración: se utiliza para la generación de electricidad o energía termina mediante vapor de agua o agua caliente en turbinas (EPA, 2016).

Colombia ha participado activamente en las cumbres desarrolladas a fin de mitigar el cambio climático. En la convención de Paris COP21 presentó el INDC, Contribuciones Nacionales Determinadas, por sus siglas en inglés, para contribuir a la reducción de GEI. (Ministerio de Ambiente, 2017).

En la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), se formularon Planes de Acción Sectorial de Mitigación (PASm). Una de las acciones iniciales de mitigación en el sector de residuos sólidos es la captura, quema o aprovechamiento del biogás. (García, Vallejo, Lou, Escobar, 2016).

Entre los beneficios económicos y ambientales de la recuperación y aprovechamiento del Biogás tenemos:

-Reducción indirecta del GEI, la producción de energía a partir del biogás reemplaza la utilización de recursos no renovables como el carbón, en el caso específico de Cúcuta se reduciría la carga





energética de la Central Termoeléctrica "Termotasajero".

- Reducción directa o indirecta de otros contaminantes del aire, mejorando la calidad local del aire, ejemplo las concentraciones de compuestos orgánicos no metanogénicos NMOC y compuestos orgánicos volátiles COV. En los procesos de limpieza del biogás se atrapa gran parte de estos gases (Tchobanoglous (2002).

- En proyectos de generación de electricidad, evitar la combustión de combustibles fósiles en centrales eléctricas reduce contaminantes en el aire, incluido el dióxido de azufre (que contribuye a la lluvia ácida), material particulado y óxidos de nitrógeno.

Otros beneficios ambientales es que la recolección y combustión del biogás reduce los olores generados en el relleno sanitario que son causados por los sulfatos y mejora la seguridad en las estructuras de conducción evitando riesgos de explosión.

Se obtienen algunos beneficios económicos de los ingresos percibidos por la venta del combustible o la generación de electricidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se llevó a cabo para la ejecución del estudio de factibilidad siguió el modelo descrito por el manual para aprovechamiento del biogás en proyectos energéticos de la EPA, 2016. Iniciando con el diagnóstico de las condiciones de la celda de disposición que pudieran afectar la generación de biogás. , determinado la necesidad de conocer los aspectos constructivos, operativos, climáticos y además la composición de los residuos y su comportamiento de generación futuro.

Se realizó el diagnóstico de la generación de biogás con respecto a las condiciones que se encuentran actualmente en la celda de disposición, determinando su caudal y su composición con la ayuda del equipo BIOGAS5000, un cabezal de pozo marca QED, un motor de vacío y una planta eléctrica.

Con la ayuda del Modelo Colombiano de Biogás se realizaron las estimaciones de generación hasta el año 2040. Se utilizó información como: precipitación de la zona, sistema de llenado y condiciones operativas de la celda, manejo de lixiviados, estado de la cobertura final, la composición de los residuos, la cantidad dispuesta y la densidad de compactación media.

Se evaluaron dos alternativas de captura del biogás teniendo en cuenta que son las tecnologías más utilizadas y que han tenido el desarrollo normativo en el país.

Finalmente se seleccionó una de las alternativas de aprovechamiento, teniendo la evaluación técnica y ambiental.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los informes mensuales de operación e información histórica, en el relleno sanitario se han dispuesto aproximadamente un total de 3'700.000 toneladas de residuos. Los residuos sólidos del país se caracterizan por tener un alto contenido porcentual de orgánicos, en la Tabla I. Se puede observar los resultados de la caracterización de residuos del PTAG realizada en el año 2016, observando que los residuos orgánicos componen más del 60% de los residuos dispuestos. Se realizaron proyecciones del aumento de la generación de residuos usando el 2,5% como índice de crecimiento, se obtuvo que en el año en el cual finaliza la licencia



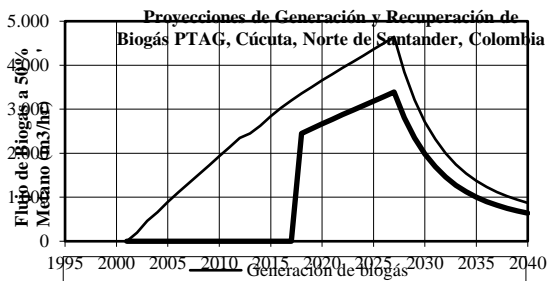


ambiental (2026) se podrían recibir diariamente más de 1100 toneladas de residuos.

3.1 Modelo Colombiano de Generación de Biogás

Se realizó la proyección de la generación y captura del biogás en el PTAG, incluyendo los datos en el Modelo Colombiano de Proyección de Biogás. Según este modelo la eficiencia del sistema de captura se vería afectada debido a las condiciones de la cobertura final, las coberturas intermedias y el manejo de lixiviados presentados en la zona de disposición. El modelo calculó una eficiencia del 73%. Según los resultados encontrados en las proyecciones de generación y captura en el 2026 se tendría en promedio 2.880 m³/hr de biogás. En la figura 1. Se observa la gráfica de generación vs extracción de biogás.

Figura 1. Generación de biogás vs aprovechamiento proyectado por el modelo colombiano de biogás



Fuente. Autores

Se realizaron mediciones de la composición porcentual y caudal del biogás en las chimeneas del relleno como se muestra en la tabla 1. Se seleccionó una chimenea de la zona con adecuaciones de sellado, en el lugar en el cual se ubicó inicialmente el proyecto de extracción de biogás BIONERSIS. Dicha chimenea contó con las adecuaciones necesarias para realizar la instalación del

equipo BIOGAS5000, el cabezal de pozo de QED y el sistema de vacío comprendido por el motor de succión de 7,5HP y su fuente de poder (planta eléctrica a 220V). Por medio de la presión de succión ejercida y el sistema de orificios concéntricos se realizó una medición de caudal de extracción vs composición.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de residuos sólidos realizada en el año 2016

Categoría de Residuo	Porcentaje
Residuos de comida y jardín	63,6%
Papel	2,2%
Cartón	4,5%
Plástico	12,0%
Caucho y cuero	3,3%
Textiles	3,8%
Madera	1,4%
Productos metálicos	0,7%
Vidrios	1,9%
Cerámicos, cenizas, rocas y escombros	0,9%
Huesos	0,1%
Otros	2,2%
Llantas	0,4%
Residuos de marroquinería	3,0%
TOTAL	100,0%

Fuente. Autores

Al realizar la apertura del cabezal de pozo la presión ejercida sobre el sistema aumentó de forma proporcional, y así mismo vario la composición porcentual de salida del biogás. al tener una apertura del cabezal de pozo de 10% la presión de succión del sistema no superaba 1" de H₂O, obteniendo un caudal de salida de 22.5 m³/hr, y una composición porcentual de metano de 42.8%. Al tener una apertura del cabezal de pozo de 50% la presión de succión del sistema aumento hasta 7.8" de H₂O, obteniendo un caudal de salida de 81.8 m³/hr, y una composición porcentual de metano de 40,1%. Al llegar al 100% de apertura del cabezal, la presión de succión, el caudal y la composición porcentual de metano





obtuvieron los siguientes valores: 10,3" de H₂O, 95.7 m³/hr y 33.3% respectivamente. Según la información obtenida se determinó que, a pesar de aumentar el caudal de extracción de biogás al ejercer una mayor presión de succión, la composición del sistema se ve alterada, ya que una presión de succión mayor permite la filtración de aire en la corriente de biogás además de alterar el equilibrio existente entre la velocidad de producción de biogás y el caudal de extracción.

El contenido porcentual del biogás se relaciona directamente con el caudal de extracción, si se realiza una extracción desmedida que altere el balance de la generación de biogás, el contenido de metano en la corriente disminuye y aumenta el contenido de otros gases como el oxígeno. En un relleno sanitario que no cuenta con los sistemas adecuados de evacuación de gases, es complicado realizar una medida certera del caudal generado y la composición porcentual. En el relleno sanitario más del 80% de las chimeneas no cuentan con una estructura adecuada de evacuación de gases, lo cual no permite una proyección de las medidas realizadas en campo.

Se realizó posteriormente la identificación de diferentes alternativas de captura, conducción y limpieza del biogás. Estas fueron evaluadas del manual para el desarrollo de proyectos energéticos con biogás de rellenos sanitarios creado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). En el sistema de captura es necesario realizar adecuaciones estructurales creando los pozos de extracción, que se componen de los cabezales y las tuberías enterradas con sellos adecuados. En este caso se determinó que las tuberías enterradas debían ser verticales debido a su mayor facilidad de instalación y con el fin de eliminar los problemas generados por las coberturas intermedias presentes en la celda. Dependiendo del uso final de

la celda se debe considerar si se crea un sistema superficial o encerrado, además del tipo de circuito a usar en la captura.

Para el diseño del sistema de conducción del biogás se debe tener en cuenta la cantidad de humedad presente en la mezcla del mismo, con el fin de evitar daños en el sistema de combustión se deben instalar sistemas especializados. Al ser la red sobre la cual se aplica la succión directa, la misma debe contar con diferentes válvulas que bloqueen el flujo en caso de requerirse.

La limpieza del biogás comprende los procesos que eliminan las impurezas nocivas para los motores o turbinas encargadas del proceso final del biogás, si se requiere un biogás de alto-Btu es necesaria la remoción de compuestos azufrosos, dióxido de carbono, siloxanos, entre otros, que garanticen que el metano superará el 96% del contenido porcentual de la mezcla. (López, 2016). Si se requiere una calidad de biogás similar a la del gas natural los procesos involucrados en la limpieza, que dependen del origen del cual se generó el biogás y de las condiciones bajo las cuales se dio la digestión anaeróbica. (Dorado, Gabriel, Gamisans, & Monroy, 2017). Entre los procesos existentes se encuentra, el secado del biogás, la eliminación de H₂S, la eliminación del CO₂ y la eliminación de compuestos minoritarios.

Se realizó la evaluación de dos tecnologías para el aprovechamiento del biogás. El uso de biogás para generar energía con motores de combustión interna y la inyección de biogás de alto-Btu en las redes de distribución de gas natural.

La alternativa 1 es usada comúnmente debido a los bajos costos de instalación, el alto rendimiento y la capacidad de adaptación de los motores de combustión. En los aspectos técnicos encontramos que, se pueden encontrar motores de





combustión interna con capacidades que van desde los 800kW hasta los 3MW, la eficiencia de conversión de los mismos se ubica entre el 30 y el 40%, aumentando al realizar procesos de cogeneración. Se deben eliminar las cantidades considerables de siloxanos y H₂S para garantizar la extensión de la vida útil de los equipos.

En los aspectos sociales, la generación de empleo cumple un papel importante, necesitando a corto plazo personal capacitado que participe en el diseño de las instalaciones. El proyecto garantiza una fuente energética con proyección inicial de generación de 3Mw en las etapas iniciales del proyecto y de 6Mw para cuando se alcance el pico de mayor generación calculado en el 2027.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el acceso a la energía eléctrica está relacionada con la mejora de la calidad de vida, introduciendo las energías renovables en países en desarrollo (Blanco, Santalla, & Levy, 2017). Un proyecto de inclusión de Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE) a nivel regional, puede ocasionar un impacto positivo en la percepción del cambio de fuentes tradicionales de energía por otras más sustentables y menos contaminantes.

En los aspectos ambientales, se disminuyen considerablemente los contaminantes atmosféricos emitidos por el relleno sanitario, además de los usados por otras fuentes de energía, en el caso de Cúcuta disminuiría la carga sobre la central termoeléctrica "Termotasajero", evitando el uso excesivo de carbón y agua. El sello adecuado de la celda permitirá el control de la avifauna presente en el relleno sanitario. En los aspectos legales se realizó la revisión de diferentes normativas a nivel nacional, según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) cualquier autogenerador que

pertenezca al Sistema de Interconexión Nacional y su producción sea superior a 1MW será considerado como un generador a gran escala, y este deberá someterse a las consideraciones y reglas que imponga la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Al vincularse a la generación con FNCE tiene acceso a los beneficios determinados en la ley 1715 del 2015 en sus artículos 11, 12, 13 y 14, Los cuales se relacionan con reducción en el pago de la renta, exclusión de IVA para equipos importados, exclusión de pagos arancelarios de equipos importados e incentivos a la depreciación acelerada de equipos. Para realizar la venta de energía al SIN inicialmente se deben buscar las herramientas necesarias para dar cumplimiento a la normativa exigida por la CREG.

En los aspectos económicos generalmente los costos de generación de energía con el uso de biogás de rellenos sanitarios pueden variar mucho dependiendo del equipo de generación de electricidad, el tamaño, los tratamientos necesarios, el equipo de interconexión y la compresión (EPA, 2016). Se está trabajando en la estimación real de los costos.

La alternativa 2 considera la conversión de biogás a BTU-alto para su inyección en redes de gas natural, actualmente existe un gran interés por parte de algunos actores del mercado del biogás en incursionar en este tipo de negocio. A nivel nacional se creó el marco normativo para proyectos de inyección de Biometano (biogás con pureza >95% de metano) a las redes de gas natural y otros. Por medio de la resolución CREG 240 del año 2016 se crearon tres tipos de mercado para la comercialización de este combustible, identificando: la comercialización de biogás en redes aisladas para usuarios industriales no regulados, la comercialización en redes aisladas para usuarios regulados y la inyección a las





redes del sistema de transporte nacional de gas natural (CREG, 2016).

Se establecieron unos parámetros específicos que debe cumplir el Biogás según los requerimientos del uso final, entre los más comunes están: el Poder Calorífico, índice de Wobbe, cantidades porcentuales y de concentración de CH₄, H₂S, CO₂, siloxanos y compuestos halogenados.

Un proyecto de uso directo puede ser una opción viable si el usuario final está ubicado a una distancia razonable del relleno sanitario. Ejemplos de proyectos de uso directo incluyen calderas industriales, calentadores de proceso y hornos cementeros y de cerámica. El desarrollo de un parque industrial que se encuentra proyectado en cercanías al PTAG cobra interés al evaluar esta alternativa de aprovechamiento.

3.2 Selección de alternativa de aprovechamiento:

Se realizó la selección de la alternativa viable, en base a los resultados de las fases anteriores, la capacidad operativa actual del PTAG, los factores que influyen sobre la generación de biogás, la capacidad financiera de la empresa Aseo Urbano S.A.S. E.S.P., los equipos necesarios, las necesidades de la población en el área de influencia, los beneficios ambientales y en referencias de proyectos con condiciones similares a nivel nacional e internacional.

Inicialmente se determinó que en el proceso de extracción se debe construir una red de pozos verticales, debido a que los actuales pozos no cuentan con una estructura adecuada, además teniendo en cuenta la presencia de capas intermedias de cobertura impermeable, se debe contar con una red de conducción perimetral, debido a que se plantea un futuro aprovechamiento fotovoltaico en el terreno

interno de la celda de disposición, además de una zona enterrada que permita el paso hacia la otra zona de operación. En el diseño se debe tener en cuenta las variaciones morfológicas que faciliten la evacuación de condensados, la red de conducción debe contar con filtros de H₂S con el objetivo de garantizar la extensión de la vida útil de los equipos.

Se realizó la selección de la alternativa de aprovechamiento del biogás en la producción de electricidad con la tecnología de motores de combustión interna, teniendo en cuenta que sus aspectos normativos se encuentran plenamente definidos y las condiciones técnicas del relleno lo permitirían.

El uso del biogás como combustible en motores de combustión interna reduce considerablemente los componentes tóxicos y los efectos nocivos que este presenta sobre el ambiente y las personas, además de ser un control de olores muy efectivo (Blanco et al., 2017).

Con el aprovechamiento del biogás y una eficiencia del sistema de captura del 73% se reducirían 3'076.979 tonCO₂-eq por la duración total del proyecto hasta el año 2040. Si se logra mejorar la eficiencia del sistema de captura al 84% se reducirían 3'540.634 tonCO₂-eq según las proyecciones realizadas con el modelo colombiano de biogás. Los valores expuestos anteriormente no consideran las emisiones generadas por el proyecto al generar la electricidad, ya que se produce un gas residual de la combustión, por lo cual se deben implementar procesos de tratamiento de emisiones de combustión.

Al ejecutar el proyecto de aprovechamiento energético, se supliría los 35kW de consumo mensual de las instalaciones del PTAG, disminuyendo el costo de este consumo. Además, según la normativa colombiana se podría realizar la venta de los excedentes convirtiendo el





aprovechamiento del biogás en proyecto de cogeneración de energía. Según la CREG todo proyecto que genere más de 1MW será considerado como un proyecto de generación a gran escala, además de los beneficios adquiridos por el uso de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), como lo son la reducción en el pago de impuestos, la reducción en la devaluación de la maquinaria adquirida y la excepción del pago de aranceles por la importación anual.

En la siguiente etapa de este proyecto se estimarán los costos de inversión y mantenimiento de cada una de las alternativas, evaluando la viabilidad económica de estos proyectos.

4. CONCLUSIONES

El biogás producido en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal PTAG tiene un contenido porcentual promedio de metano superior al 40%, lo que lo hace factible para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento.

A través del Modelo Colombiano de generación de biogás se estimó que el relleno sanitario del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, para el año 2019 se generará 2.503 m³/hr. de biogás, equivalentes a 1473 m³/hr metano, teniendo en cuenta el factor de corrección de metano y una eficiencia de extracción del 73%.

Con las proyecciones del biogás se calcula un potencial de generación promedio de 3MW, con unas reducciones estimadas de 2.915.652 Ton-CO₂ equivalentes, lo cual se convierte en un proyecto atractivo desde el punto de vista de reducción y mitigación de gases de efecto invernadero.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación técnica y ambiental del

aprovechamiento del biogás, se encontró que la generación de energía eléctrica es una alternativa viable que contribuye a la diversificación energética del país y al desarrollo de un modelo de negocio que puede ser aplicable en otros rellenos sanitarios.

Un proyecto de uso directo puede ser una opción viable en el futuro si se tiene un usuario final ubicado a una distancia razonable del relleno sanitario. El desarrollo de un parque industrial y de hornos de cerámica en la zona darían mayor viabilidad a esta opción.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aseo Urbano S.A.S. E.S.P. (2016). Caracterización de los residuos sólidos ordinarios del parque tecnológico ambiental guayabal 2016. San José de Cúcuta.

Barros R., Tiago F., Santos A., Ferreira C., Pieroni M., Moura J., Freitas J. (2018). A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. *Renewable Energy Focus*. 25, pp 4-16.

Blanco, G., Santalla, E., & Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico.

Broun R. y Sattler M. (2016). A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), pp 2664–2673.

Colmenares, W., & Santos, K. (2008). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. *IngenieriaQuimica.org*, 1–33. Retrieved from <http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/relleno-sanitario.pdf>





Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Resolución No 240 (2016). Colombia. Recuperado de <http://www.cnogas.org.co/asp/detnoticia.asp?id=693>

CONPES. CONPES 3874 (2016). Colombia. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

Emkes H., Coulon F. y Wagland S. (2015). A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. *Waste Management*, 43, pp 307–318.

EPA. (2016). LFG Energy Project Development Handbook.

Dávila, J. L. (2009). Biogas de rellenos sanitarios - generalidades.

Dorado, A., Gabriel, D., Gamisans, X., & Monroy, O. (2017). Purificación y usos del biogás Purification. (H. Sierra & D. Gabriel, Eds.), Universidad Autónoma de Barcelona.

Retrieved from <http://publicacions.uab.cat/>

Feng S., Zheng Q, y Xie H. (2015). A model for gas pressure in layered landfills with horizontal gas collection systems. *Computers and Geotechnics*, 68, pp 117–127.

García C., Vallejo G., Lou M., y Escobar E. (2016). El Acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático. Recuperado de <http://www.wwf.org.co/?266971/El-Acuerdo-de-Pars-As-actuar-Colombia-frente-al-cambio-climatico>.

IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales,

Martín, S. (1997). Producción y recuperación del Biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisis de variables y modelización. Universidad de Oviedo.

PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, M. de A. vivienda y desarrollo territorial. (2016). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

SSDP, S. de S. P. (2015). Informe anual de Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia.

