



Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios

Anaerobic digestion of green waste as an alternative for the reduction of greenhouse gas emissions in landfills

Beatriz H. Aristizábal Z.^{a*}, Estefanía Vanegas C.^a, Juan Pablo Mariscal M.^a, Miller Alonso Camargo V.^{a,b}.

Recibido: Junio 16 de 2015
Recibido con revisión: Septiembre 14 de 2015
Aceptado: Diciembre 01 de 2015

^{a*}Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Química
Km. 9 vía Aeropuerto,
Manizales
Tel.: +(57) 8879300
bharistizabalz@unal.edu.co

^bSchool of Civil Engineering,
University of Leeds
Leeds LS2 9JT, UK

Energética 46, diciembre(2015), pp.29-36

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



RESUMEN

La disposición de residuos sólidos urbanos en Colombia se realiza principalmente en rellenos sanitarios, los cuales tienen una limitada vida útil para su operación. Actualmente, cerca del 50% de estos sistemas se encuentran en la etapa final de su vida útil, por lo que se requiere evaluar alternativas de tratamiento y disposición para dichos residuos. Los residuos sólidos urbanos generados en Colombia contienen un alto contenido de material orgánico, lo cual contribuye a la emisión fugitiva de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios; en tal sentido, el uso de digestión anaerobia resulta una alternativa tecnológica apropiada con el beneficio de facilitar el aprovechamiento de metano (CH₄) como fuente de energía. Este trabajo busca realizar una comparación directa entre las emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios y en el proceso de digestión anaerobia como opciones para la disposición y tratamiento de residuos orgánicos urbanos en Colombia. Para tal fin, la cuantificación de gases de efecto invernadero se realizó mediante el desarrollo de un caso de estudio para la disposición de residuos de poda en la ciudad de Manizales, siguiendo modelos de cuantificación teórica para las emisiones diarias de metano y dióxido de carbono. Los resultados obtenidos muestran diferencias considerables entre las técnicas de cálculo utilizadas, especialmente para la evaluación de digestión anaerobia por el carácter general de los factores de emisión. Sin embargo fue posible estimar que cerca de 50 ton de metano y 1200 ton de dióxido de carbono, reportados como CO₂ equivalente, dejarían de ser emitidos anualmente en la ciudad de Manizales en caso de implementarse la digestión anaerobia como alternativa a la disposición actual de residuos de poda en el relleno sanitario.

PALABRAS CLAVE

Digestión anaerobia; residuos de poda; gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

Landfilling is the main disposal technology for municipal solid wastes (MSW). Currently, about 50% of the landfill systems are close to the end of their useful life. It is necessary to evaluate alternative of disposal and treatment for MSW. Municipal solid wastes generated in Colombia contain a high proportion of organic material, which contributes to the generation of greenhouse gas emissions (GHG) in landfills. In this regard, anaerobic digestion is an alternative technology for waste treatment. Additionally, the produced methane (CH₄) could be used as an energy source. This paper seeks to make a direct comparison between GHG emissions produced in landfills and the anaerobic digestion process as options for the disposal and treatment of municipal organic wastes in Colombia. The emissions of GHG were calculated considering a study case in the landfill disposal of garden wastes in the city of Manizales. Theoretical models were used to quantify the emissions of methane and carbon dioxide. The calculation methodologies applied in this study showed considerable differences in its results, mainly for the assessment of anaerobic digestion by emission factors. However, it was possible to estimate that about 50 tons of methane and 1200 tons of carbon dioxide, would be avoided annually in the city of Manizales if the anaerobic digestion was used as an alternative to the current waste disposal technology.

KEYWORDS

Anaerobic digestion, municipal solid waste (MSW), greenhouse gas (GHG) emissions.

1. INTRODUCCIÓN

La generación indiscriminada de residuos urbanos, la cultura de consumir recursos naturales como si fueran inagotables y de desechar todo aquello que ya no es útil, ha provocado graves daños al planeta y sus recursos; tal situación ha obligado a la sociedad a repensar su forma de vida y de convivencia con la Tierra. Por tal motivo, la implementación de estudios de impacto ambiental ha sido un factor

determinante para formular, diseñar e implementar nuevos proyectos con un mínimo impacto. Esto se ha logrado mediante la formulación de diversas metodologías impulsadas por la inclusión de nuevas normativas que resaltan la importancia de la protección ambiental y de minimizar los posibles impactos ambientales de un proceso dado.

Una de las formas de realizar la evaluación ambiental de un proceso determinado es mediante el análisis de su impacto por emisiones de gases causantes del calentamiento global, y que de forma genérica se definen como Gases de Efecto Invernadero (GEI) o Greenhouse Gases (GHG), por su definición en idioma Inglés. La disposición de residuos sólidos urbanos es una actividad que contribuye a mejorar las condiciones sanitarias y calidad de vida de nuestras poblaciones, pero que lamentablemente se centra en soluciones de corto plazo, como la recolección y disposición de residuos en rellenos sanitarios, dejando de lado opciones más sostenibles como reuso, reciclaje y valorización de residuos.

El presente trabajo tiene como objeto realizar una revisión actualizada sobre la generación y disposición de residuos orgánicos en el país, seguido por un caso de estudio que pretende realizar una evaluación ambiental basada en la emisión de GEI del tratamiento biológico de digestión anaerobia de residuos de poda, comparado con el impacto que genera la disposición actual en relleno sanitario. El caso de estudio seleccionado es el del relleno sanitario La Esmeralda en la ciudad de Manizales, el cual permitirá plantear alternativas que contribuyan a resolver a largo plazo el problema de disposición de residuos sólidos urbanos, teniendo en cuenta que la vida útil remanente de este relleno sanitario es de aproximadamente 8 años [Superservicios, 2013].

1.1 Contexto de los residuos sólidos urbanos en Colombia

En Colombia se generan alrededor de 31000 toneladas diarias de residuos municipales, de las cuales el 65% es fracción orgánica [Cadavid, 2012], menos del 10% se recicla y del 72% al 85% termina dispuesto en rellenos sanitarios, sin ningún tipo de tratamiento o valorización previa (ver Figura 1) [Superservicios, 2013]. Los residuos

de poda y los de alimentos son los principales componentes de la fracción orgánica de los residuos. En Cali, la fracción de poda representa el 6.6 % del total de residuos en la ciudad [Mendoza & Lopez, 2004], en San Andrés el 9.21% [CYDEP, 2007] y en la ciudad de Manizales representa un 5% [Londoño et al., 2014].

En la ciudad de Manizales, el relleno sanitario La Esmeralda recibe alrededor de 400 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (excluyendo los desechos biomédicos) provenientes de varios municipios de Caldas. En 2013, 258 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos fueron producidos en la ciudad de Manizales de los cuales 43% correspondió a fracción de material orgánico [Mendoza & López, 2004; Superservicios, 2013]. Del total de residuos generados en Manizales, un menor porcentaje es reciclado y vendido por cuenta de los 571 recicladores que trabajan en la ciudad, alcanzando ingresos de 20 millones de pesos mensuales [Jiménez, 2014].

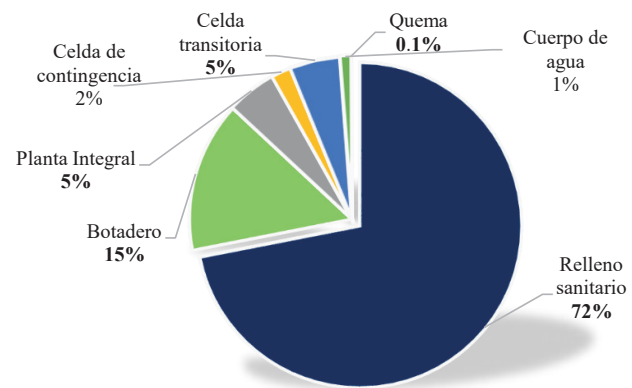


Figura 1. Distribución de municipios por tipo de sistemas de disposición final 2013.

Fuente: [Superservicios, 2013]

En Colombia ya se han realizado diversos estudios relacionados con el tratamiento biológico de residuos orgánicos, especialmente la digestión anaerobia de residuos de poda. Estudios realizados en la sede Palmira de la Universidad Nacional de Colombia, encontraron que por cada kilogramo de residuos de poda biodigerido anaeróticamente se puede producir hasta 354 L de biogás. Estas investigaciones buscan su aplicación a escala industrial para dar solución a la disposición de aproximadamente 217 toneladas que se generan en el año en Palmira, las cuales podrían llegar a producir 230 MWh de energía térmica o 140 MWh de energía eléctrica [Bolaños, 2014].

1.2 Digestión anaerobia para aprovechamiento de residuos de poda

Existen diversas técnicas para la valorización de residuos orgánicos, incluyendo entre otras: (a) aprovechamiento alimenticio mediante la producción de concentrados de animales; (b) aprovechamiento biológico mediante procesos como compostaje, lombricultura y biodigestión; y (c) aprovechamiento energético a través de procesos

térmicos como la licuefacción, carbonización y gasificación. Para los residuos lignocelulósicos como el caso de los residuos de poda, diversos estudios han mostrado que procesos biológicos como la digestión anaerobia son una alternativa viable para degradar la materia orgánica presente y al mismo tiempo producir biogás como producto final. Este producto puede ser aprovechado directamente como fuente de energía (i.e., gas domiciliario, gas vehicular, etc.) o para la cogeneración de energía térmica y eléctrica (Figura 2).

Los residuos de poda conciernen todos aquellos residuos provenientes de agricultura y jardinería (i.e., pasto, flores, ramas y hojas), y su composición química consiste principalmente de tres tipos de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Debido a su estructura química, composición rica en carbono y alto valor energético, los residuos de poda han reportado potencial para la producción de biocombustibles (i.e., bioetanol y biogás) y la generación energía térmica y eléctrica [Michalska et al., 2012].

La generación de biogás se logra mediante el proceso de biodigestión (digestión anaerobia) en el cual la materia orgánica es descompuesta por un consorcio de grupos de microorganismos bajo condiciones libres de oxígeno; la composición del biogás incluye principalmente metano (50-75% CH_4) y dióxido de carbono (25-50% CO_2). En términos de generación de energía, la digestión anaerobia es el método más eficiente de generación de bioenergía a partir de biomasa, en comparación con otros procesos biológicos y termoquímicos [Zheng et al., 2014]. Además, tiene beneficios ambientales y operacionales como la producción de energía renovable, la posibilidad de reciclar nutrientes, reducción de volúmenes de residuos, sistemas de fácil construcción y poca demanda de supervisión [Murto et al., 2004].

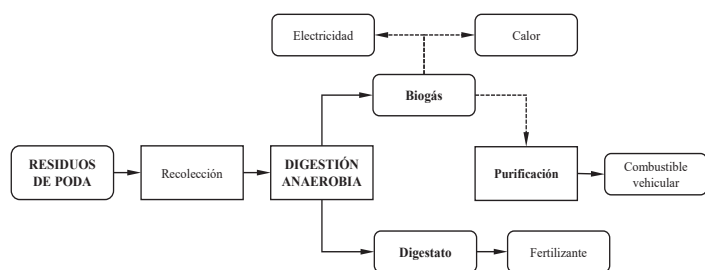


Figura 2. Esquema de alternativas de valorización de residuos de poda por digestión anaerobia

Fuente: Elaboración propia

En estudios previos, la digestión anaerobia de residuos de poda ha reportado un rendimiento de producción de metano entre 145 y 510 L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$, pero variaciones entre las condiciones experimentales no permiten realizar comparación directa entre resultados. Por ejemplo, [Stewart et al., 1984] reportaron una producción de metano de 310 L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$ en estudios realizados en un reactor de mezcla completa y flujo continuo (CSTR) en una etapa usando trébol y paja de centeno, con una carga orgánica volumétrica de 2.25 $\text{kg SV}/\text{m}^3 \text{ d}$. En el caso de pastos para forraje, [Murphy & Nizam1, 2010] reportaron un rendimiento de metano

de 320 a 510 L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$; mientras que en experimentos en cochada (batch) a escala laboratorio realizados por [Baserga & Egger 1997; KTBL & Gasertrage 2005] los rendimientos de metano fueron de 280-330 L/kg SV con 55% de contenido de metano en el biogás. [Hanson et al. 2002; Cirne et al., 2007] usaron lechos a escala laboratorio conectados con un filtro anaerobio y reportaron rendimientos de metano de 145 y 270 L $\text{CH}_4/\text{kg SV}$, respectivamente.

1.3 Gases de efecto invernadero

La temperatura terrestre depende del equilibrio entre la energía que entra y la que sale del sistema atmosférico del planeta. Los gases de efecto invernadero (GEI) como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y dióxido de nitrógeno (N_2O) absorben energía, retrasando o previniendo la pérdida de calor hacia el espacio. Los GEI más importantes emitidos directamente por los actividades humanas incluyen CO_2 , CH_4 , N_2O y otros en menor proporción [EPA, 2014]. Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico, han aumentado ostensiblemente desde 1750 como resultado de actividades humanas [IDEAM, 2009] (Figura 3). El aumento en las emisiones y la acumulación de gases de efecto invernadero han ocasionado que la temperatura promedio de la atmosfera aumente con implicaciones directas sobre la variación y frecuencia de eventos climáticos extremos en todas partes del mundo [EPA, 2014].

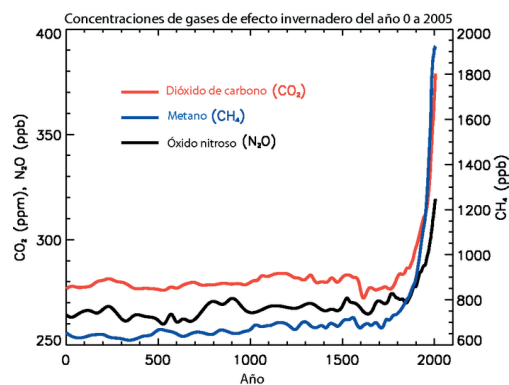


Figura 3. Concentración de GEI en la atmósfera a través de los años.

Fuente: [EPA, 2014]

Las emisiones de metano (CH_4) en sitios de disposición de residuos sólidos constituyen la fuente más grande de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de residuos [IPCC, 2006]. Las moléculas de metano tienen un tiempo de vida en la atmósfera mucho menor que las de dióxido de carbono, pero son más eficientes atrapando radiación solar; por lo tanto, el potencial de calentamiento global del metano es 20 veces mayor que el del dióxido de carbono en un periodo de 100 años [EPA, 2014].

En 2004, Colombia contribuyó con el 0.37% de las emisiones mundiales de CO₂ equivalente (49 Gton de CO₂); de las emisiones totales de GEI de ese año en el país (180010 Gg), el sector de residuos aportó cerca de 5.7% (10278 Gg), de las cuales el 88% (9048 Gg) fueron debido a la disposición de residuos sólidos y el 12% restante se relacionó con los sistemas de tratamiento de aguas residuales [IDEAM, 2009]. Por otro lado, es importante destacar que las emisiones de metano representan el 30% del total de emisiones de GEI en Colombia [IDEAM, 2009] por lo que acciones encaminadas a reducir las emisiones de este gas son de gran importancia. El desarrollo de tecnologías adecuadas para el control de emisiones fugitivas de metano y el fomento de esquemas de aprovechamiento de este gas como fuente de energía en todos los procesos que lo generan son de gran relevancia, y esto incluye por supuesto el manejo, aprovechamiento y disposición de los residuos orgánicos.

2. METODOLOGÍA

La evaluación de GEI generados por residuos de poda se realizó a partir de dos técnicas de cálculo: factores de emisión y una aproximación mediante rendimientos de metano en procesos de biodigestión. Para esto se utilizó la información sobre factores de emisión disponible en la base de datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en idioma inglés) [IPCC, 2006], así como valores reportados en la literatura para este tipo de residuos.

[Moller et al., 2009] realizó un análisis de los GEI emitidos en el proceso de biodigestión, y divide las emisiones en 2 grandes grupos: directas e indirectas. Las primeras están relacionadas con las emisiones directas del proceso incluyendo combustión de combustible y pérdidas fugitivas de gas del reactor. Las emisiones indirectas están asociadas también con el proceso, pero realmente toman lugar fuera de él, como por ejemplo la provisión de energía requerida para el proceso y la producción de materiales para la construcción del proceso, o el uso de la tierra para la disposición del digestato. Los cálculos realizados en este estudio corresponden a las emisiones directas generadas por pérdidas fugitivas de biogás en el reactor de biodigestión.

Como caso de estudio se evaluarán las emisiones de CH₄ provenientes de la disposición de los residuos de poda. Este análisis se lleva a cabo para la ciudad de Manizales, donde el 5% de los residuos sólidos urbanos corresponde a residuos de poda [Londoño et al., 2014], teniendo una tasa de generación diaria de 12.5 toneladas del residuo. A partir de la información de generación diaria en la ciudad de estos residuos, se determina la generación teórica de metano actual con la disposición

en relleno sanitario y la cantidad potencial generada en un sistema de biodigestión comercial.

2.1 Factores de emisión

Se define como un coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico que constituye la fuente de las últimas emisiones [IPCC, 2006]. Estos factores se encuentran disponibles en la literatura y se usan para este caso como se muestra en la Ecuación 1:

$$\text{Emisión } X_{i_k} = w_i * FE_k - R \quad (1)$$

Donde w es masa del material responsable i de la emisión del contaminante X por el tipo de proceso k , FE es el factor de emisión y R la cantidad de metano recuperada para ser aprovechada. Debido a que el objetivo de la biodigestión es recuperar el gas completamente, la fracción que no se recupere se debe a las pérdidas de gases en el proceso, que se encuentran en un rango de 0 a 10% [IPCC, 2006].

Este trabajo utiliza los valores de emisiones fugitivas reportados por [Galgani et al., 2014]: 30 y 1 kg CH₄/ton de residuo para emisión en relleno sanitario y para fugas en sistemas de biodigestión respectivamente. Estos valores coinciden con los reportes de IPCC que oscilan entre 20 y 40 kg CH₄/ton para los rellenos sanitario y de 0 a 8 kg CH₄/ton para biodigestión. Los valores reportados presentan un rango amplio debido a que las emisiones de metano dependen de las condiciones y el manejo adecuado o inapropiado del relleno sanitario así como de las características propias de los residuos en cada región.

2.2 Potencial máximo de generación de metano por residuos de poda

Las emisiones de metano fueron calculadas para ambos procesos no sólo con el factor de emisión, sino también mediante el potencial de generación de metano (Lo), para el caso de relleno sanitario y potencial bioquímico de metano (PBM) para la digestión anaerobia. El potencial de generación de metano (Lo) representa la cantidad de metano CH₄ generado por un residuo sólido descompuesto y es también conocido como rendimiento de metano o potencial de generación de gas de relleno sanitario [Kumar & Sharma, 2014]. El valor de Lo depende del tipo y la descomposición de los residuos dispuestos en el relleno. Un residuo con contenido más alto de celulosa tendrá un valor más alto de Lo, mientras que un residuo con mayor contenido de lignina tendrá un valor más bajo de Lo. Este trabajo utiliza el valor de 72 m³/Mg residuo, reportado para poda en rellenos sanitarios por [Kumar & Sharma, 2014].

El Potencial Bioquímico de Metano (PBM) es un método de medición del máximo volumen de biogás producido por digestión anaerobia que puede ser determinado experimental o teóricamente. Debido a que se encuentran varios valores del PBM para residuos de poda reportados en la literatura dependiendo del tipo de proceso (batch, continuo) y otras condiciones propias de cada experimento, se realizó un promedio de varios valores reportados y con el cual se realizaron los cálculos de emisiones de metano.

Se encontraron diferencias significativas no sólo en los valores de PBM sino también en los sólidos volátiles y totales de los residuos de poda, como puede verse en la Tabla 1. Las grandes diferencias se deben a que en algunos estudios la poda fue pretratada mediante procesos como secado, y la caracterización reportada es de la poda previamente tratada, por lo cual se obtienen valores de sólidos totales y volátiles tan altos en algunos casos. Esto no permite conocer las características originales de la poda fresca, dificultando la conversión del PBM de unidades de sólidos volátiles o totales a unidad de masa fresca.

Fuente	Sólidos Volátiles (SV), %	Sólidos Totales (ST), %	Rendimiento de biogás
(Brown & Li, 2013)	91.7	94.3	0.053 m ³ CH ₄ /kg SV
(Hanson et al., 2002)	88	92	0.179 m ³ CH ₄ /kg SV
(Cirne et al., 2007)	27	31	0.27 m ³ CH ₄ /kg SV
Propia	18.1	20.5	0.157 m ³ CH ₄ /kg SV
Promedio			0.164 m³ CH₄/kg SV

Tabla 1. Rendimiento de PBM, sólidos volátiles y totales de los residuos de poda.

Fuente: Elaboración propia

También es posible calcular las emisiones de dióxido de carbono emitidas por ambos procesos. En el caso de los rellenos sanitarios, en modelos como LandGEM se asume una concentración de metano de 50% y el 50% restante como dióxido de carbono en volumen, y se calcula a partir del contenido de metano y el porcentaje de metano usando la Ecuación 2 [Superservicios, 2013]:

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} \cdot \left\{ \left[1 / \left(\frac{P_{CH_4}}{100} \right) \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

Donde

Q es la producción y P el porcentaje. Para el caso de la digestión anaerobia, no se encuentra reportado un factor de emisión de dióxido de carbono para este tipo de proceso, pero pueden calcularse las emisiones de este compuesto considerando una composición típica del biogás producido de 55% metano y 45% en volumen de dióxido de carbono [Bond & Templeton, 2011].

Con las emisiones de metano ya cuantificadas, se realizó un análisis de potencial de calentamiento global de los GEI, el cual arroja las emisiones de dióxido de carbono equivalentes. Una emisión de CO₂ equivalente es la cantidad de emisión de CO₂ que ocasionaría, durante un horizonte temporal dado, el mismo forzamiento radiactivo integrado a lo largo del tiempo que una cantidad emitida de un GEI. Las emisiones de CO₂ equivalentes se obtienen multiplicando la cantidad de GEI emitida por su potencial de calentamiento global (Ecuación 3) para un horizonte de tiempo dado, de acuerdo con la información de la Tabla 2 [IDEAM, 2009]

$$FCG = Emisión\ del\ GEI\ x\ * \ PCG\ del\ GEI\ x \quad (3)$$

Donde

FCG es el factor de calentamiento global.

Nombre	Fórmula Química	Potencial de Calentamiento Global (PCG o GWP) Horizonte: 100 años
Dióxido de	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido Nitroso	N ₂ O	310

Tabla 2. Potencial de Calentamiento Global en unidades de CO₂ equivalentes para los principales GEI.

Fuente: IDEAM, 2009

Finalmente, se realizó una estimación de la energía eléctrica que sería producida con el biogás generado de la digestión de los residuos de poda. Este cálculo se realiza mediante el poder calorífico inferior del metano, 13.9 kWh/kg [Arrieta, et al., 2006]. La Ecuación 4 es utilizada para calcular la energía producida.

$$\frac{kWh}{día} = PCI \left[\frac{kWh}{Kg} \right] * E \quad (4)$$

Donde

PCI es el poder calorífico inferior y E son las emisiones en kg/día del gas de estudio, en este caso el metano.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se obtuvieron emisiones de 387 kg CH₄ diarios por disposición en relleno y 1.29 kg CH₄ diarios por tratamiento de biodigestión mediante el cálculo por factores de emisión (Tabla 3). Sin embargo, estos factores no especifican para qué tipo de materia prima o residuo se generan esas cantidades de gases en el proceso, por lo cual las emisiones obtenidas mediante factores de emisión se pueden considerar una aproximación y no valores tan exactos o cercanos a la realidad. Es por esto que los resultados de las emisiones de metano calculadas por factor de emisión y por potencial de metano resultan tan diferentes entre ellos.

Mediante el PBM y Lo, los cuales si se calculan teniendo en cuenta no sólo el proceso sino el tipo de materia prima o residuo usado en el proceso (poda en este caso) se obtuvieron emisiones de 118.5 y 256.9 kg

Tratamiento	Método de cálculo	Valor parámetro del método	Fuente Parámetro	Emisión de CH ₄ [kg CH ₄ /día]
Digestión Anaerobia	Factor de Emisión	1 kg CH ₄ /ton	(IPCC 2006)	1.29
	PBM	94.83 kg CH ₄ /ton	Promedio Tabla 1	118.54
Relleno Sanitario	Factor de Emisión	30 kg CH ₄ /ton	(Galgani et al., 2014)	387
	PBM	20.6 kg CH ₄ /ton	(Kumar & Sharma, 2014)	256.9

Tabla 3. Emisiones de CH₄ en Manzales por disposición de residuos de poda en relleno sanitario y por digestión anaerobia.

Fuente: Elaboración propia

de metano por día generados por digestión anaerobia y relleno sanitario respectivamente (Tabla 3).

Si se realiza un análisis de la reducción de emisiones en caso de implementar un sistema de digestión anaerobia en lugar de disponer en relleno sanitario en cada metodología, se encuentra que dejarían de ser emitidas cantidades significativas a la atmósfera en Manzales, más de 100 kg día calculadas por factor de emisión y potencial de metano (Tabla 4), teniendo en cuenta que el biogás producido en la biodigestión sería aprovechado.

Método	kg CH ₄ / día mitigados por biodigestión
Potencial de Metano	138.4
Factor de Emisión	385.7

Tabla 4. Emisiones diarias de CH₄ que dejarían de ser emitidas si se implementara digestión anaerobia a residuos de poda en lugar de disponer en relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que en estos cálculos no se tienen en cuenta las emisiones que se generan en el proceso de aprovechamiento del biogás (Figura 2), por ejemplo la cogeneración en el caso de ser utilizado para producir energía eléctrica. Sin embargo, si se quisiese tener en cuenta esta etapa del proceso para evaluar el impacto ambiental también habría que considerar cuánto se estaría dejando de impactar el medio ambiente por la generación de energía hidroeléctrica, pues la energía producida por biodigestión supliría una fracción de la demanda de la ciudad reduciendo la demanda del sistema interconectado de energía.

Se obtuvo que 1.1 kWh diarios podrían ser obtenidos teóricamente del biogás producido por digestión anaerobia con los residuos de poda en Manzales. Teniendo en cuenta que una familia promedio manizalita estrato 3 consume alrededor de 118.6 kWh mensuales [SUI, 2015], la energía eléctrica producida por la digestión de los residuos de poda supliría el 27.5% de la

demanda diaria de un hogar estrato medio de la ciudad.

En la Tabla 5 se muestran las emisiones obtenidas de dióxido de carbono en cada uno de los procesos. Este cálculo se realizó utilizando los valores obtenidos de metano y suponiendo una composición de 55%/45% de metano y dióxido del biogás producido respectivamente [Bond & Templeton, 2011]. Puede notarse que la cantidad que dejaría de emitirse a la atmósfera si se trataran los residuos de poda mediante biodigestión es bastante considerable, aproximadamente 360 kg de dióxido diarias, según el cálculo por potencial de metano obtenidos mediante la resta de los 578 kg emitidos actualmente por el relleno sanitario menos los 218 kg dióxido que se emitirían por biodigestión.

Proceso / (Método)	kg CO ₂ / día Manzales (Potencial de Metano)	kg CO ₂ / día Manzales (Factor de emisión)
Digestión anaerobia	218.22	2.3
Relleno Sanitario	578.21	870.75

Tabla 5. Emisiones de CO₂ en Manzales generadas en los dos procesos de estudio.

Fuente: Elaboración propia

El impacto de las emisiones de metano a la atmósfera en el medio ambiente puede evaluarse según el potencial de calentamiento global (GWP). Para este gas, se reporta un potencial de calentamiento global de 21 en un horizonte de 100 años [IMN, 2014]. Utilizando la información calculada por potencial de metano, se obtuvo que los kg de metano producidos en Manzales en relleno sanitario son equivalentes a 5394.9 kg diarios de CO₂ para un potencial de calentamiento global en un horizonte de 100 años, con un total de emisión de CO₂ equivalentes de 5973 kg diarias en Manzales. Si se trataran los residuos de poda por digestión anaerobia, se emitirían alrededor de 2707.56 kg de CO₂ equivalentes, es decir que se estarían dejando de emitir 3265.44 kg de CO₂ equivalentes comparado con lo que se emite actualmente. Es importante resaltar que los cálculos aquí realizados para emisiones de metano, dióxido de carbono y dióxido de carbono equivalentes son potenciales teóricos, lo cual representa las emisiones máximas a emitir de estos gases de efecto invernadero.

4. CONCLUSIONES

La evaluación ambiental del proceso de digestión anaerobia medido desde su impacto atmosférico posee bajas emisiones comparadas con las actuales, generadas por el relleno sanitario La Esmeralda. De implementarse dicha tecnología a los residuos de poda, dejarían de emitirse alrededor de 138 kg diarios de metano en la ciudad de Manizales.

Este proceso de generación de bioenergía presenta una aplicación importante en el país y la región, en donde la problemática relacionada con la vida útil de los rellenos sanitarios es generalizada. La implementación de rutas alternativas para la valorización de residuos orgánicos presenta interés y debe integrarse dentro de las políticas de gestión de residuos en el país, con el fin de garantizar la sostenibilidad de estos sistemas y acoplarlos con la reglamentación de la Ley de Energía Renovable de Colombia, promulgada en el año 2014.

Cabe resaltar que los resultados aquí obtenidos abarcan la evaluación ambiental no del proceso global de producción de energía a partir de residuos orgánicos, sino del volumen de control seleccionado en este estudio, que comprende únicamente el proceso de biodigestión, o la producción de biogás. Sería de interés realizar en trabajos futuros una evaluación global del proceso y donde se tenga en cuenta cómo y en qué porcentaje podría aportar la energía eléctrica producida a partir de biogás al sistema interconectado de energía actual.

REFERENCIAS

- Arrieta, A., García Posada, J. M. & Burbano Martínez, H. J., 2006. Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano. *Ingeniería y Desarrollo*, Issue 20, pp. 19-34
- Baserga, U. & Egger, K., 1997. Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung, Tanikon: Bundesamt für Energiewirtschaft.
- Bolaños Valencia, I. V., 2014. Digestión anaerobia como alternativa de manejo y aprovechamiento sostenible de los residuos de poda de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira: Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Ambiental.
- Bond, T. & Templeton, M. R., 2011. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable*, Issue 15, pp. 347-354.
- Brown, D. & Li, Y., 2013. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*, Issue 27, pp. 275-280.
- Cadavid Rodríguez, L. S., 2012. Reducing the Environmental Impact of Wastewater Screenings and Producing Valuable By-products through the Application of Anaerobic Technologies, Leeds: University of Leeds.
- Cirne, D., Lehtomäki, A., Björnsson, L. & Blackall, L., 2007. Hydrolysis and microbial community analyses in two-stage anaerobic digestion of energy crops. *Appl Microbiol*, pp. 516-27.
- CYDEP, 2007. Contrato N° 001 (023 / 06) Informe 2. Consultoría que defina las condiciones económicas, financieras, ambientales, regulatorias y legales bajo las cuales se entregará el servicio público de aseo en la Isla de San Andrés, Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Fidupetrol.
- EPA, 2014. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Disponible en: <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html> [Fecha de acceso: 22 Febrero 2015].
- EPA, 2014. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/earlink1/espanol/cambioclimatico/ciencia/causas.html> [Fecha de acceso: 22 Febrero 2015].
- Galgani, P., Ester, v. d. V. & Gijsbert, K., 2014. Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental-economic assessment in the context of voluntary carbon markets. *Waste Management*, Issue 34, pp. 2454-2465.
- Hanson, A., Samani, Z. & Yu, H. W., 2002. Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion. *Waste Management*, pp. 22:1-5.
- IDEAM, 2009. Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jiménez, O. A., 2014. Informe sobre la política pública de inclusión de recicladores de oficio en la cadena de reciclaje, s.l.: Programa Cómo vamos Fundación Corona.
- KTBL & Gasertrage, 2005. Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Darmstadt: Association for Technology and Structures in Agriculture.
- Kumar, A. & Sharma, M. P., 2014. Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Issue 5, pp. 50-61.
- Londoño Carvajal, A., Marín Arias, J. E., Ocampo López, O. L. & González Hoyos, N. d. J., 2014. Estimación de la producción de lixiviados en rellenos sanitarios. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Mendoza Salgado, P. & López Trujillo, V., 2004. Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio piloto de flujo ascendente. Manizales: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia- Sede Manizales.
- Michalska, K., Krystian, M., Liliana, K. & Stanislaw, L., 2012. Influence of pretreatment with Fenton's reagent on biogas production and methane yield from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, Issue 119, pp. 72-78.
- Moller, J., Boldrin, A. & Christensen, T. H., 2009.

Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste Management*.

- Murphy, J. D. & Nizami, A. S., 2010. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 14, pp. 1558-1568.
- Stewart, D. J., Bogue, M. J. & Badger, D. M., 1984. Biogas production from crops and organic wastes. 2. Results of continuous digestion tests. *New Zealand Journal of Science*, 27(3), pp. 285-294.
- SUI, 2015. SUI Sistema Único de Información de Servicios. Disponible en: <http://bi.superservicios.gov.co/o3web/jdesktop.jsp> [Fecha de acceso: 3 Marzo 2015].
- Superservicios, 2013. Disposición Final de Residuos en Colombia 2013.
- Zheng, Y., Jia, Z., Fuqing, X. & Yebo, L., 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, Issue 42, pp. 35-53.