

# ANÁLISIS DEL BIOGÁS CAPTADO EN UN RELLENO SANITARIO COMO COMBUSTIBLE PRIMARIO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

## Analysis of the biogas obtained in a landfill as primary fuel in an electric power generation system

### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis del potencial de producción de una pequeña central generadora de energía eléctrica, que usa como combustible primario el Biogás proveniente del vertedero de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) la Glorita en Pereira. Para este fin se plantea la conversión de energía mediante una planta térmica de ciclo combinado.

El estudio se centra en la posibilidad de generar energía eléctrica aprovechando los residuos que constituyen en la actualidad uno de los más graves problemas de salud pública y saneamiento ambiental. El análisis aquí presentado se fundamenta en la discusión teórica acerca de la composición promedio del biogás de vertedero producido por los Residuos Sólidos Urbanos en Pereira.

**PALABRAS CLAVES:** Biogás, dióxido de carbono, energía, entalpía, generación, metano, vertedero.

### ABSTRACT

*This paper presents a theoretical analysis of a small power plant which uses biogas as its primary fuel. This biogas is obtained from Urban Solid Wastes (USW) landfills and specifically from La Glorita landfill in Pereira. The thermal plant proposed in this paper is a generic combined cycle power plant.*

*The study here presented is focused on the possibility of generate electricity using wastes that are currently one of the most serious problems on public health and environmental sanitation. This paper also presents a detailed theoretical analysis of the average composition for the biogas produced by a USW landfill in Pereira.*

**KEYWORDS:** Biogas, carbon dioxide, energy, generation, landfill, methane.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es amplia y general la convicción que el medio ambiente necesita de energías limpias, no contaminantes, y que permitan contar con nuevas alternativas de generación de electricidad. Igual importancia tiene la preservación de los recursos no renovables, cuyo agotamiento ha sido y es fuente de preocupación en la medida que los combustibles limpios de reemplazo no están completamente disponibles y su posibilidad de utilización masiva es incierta aún [1].

El concepto de los sistemas de energía basados en biogás es en cierto grado similar al de los sistemas de energía basados en la biomasa. Esta última es muy utilizada en grandes industrias para el aprovechamiento de sus residuos en cogeneración, ya que así el proceso aumenta su eficiencia entre un 70 y 85% [1].

El biogás puede ser producido a partir de estiércol, desechos humanos orgánicos y de la degradación vegetal. Terrenos donde pastan los animales, crecen las plantas y

existe un flujo de aguas residuales son lugares ideales para producir energía a partir de biogás. Sin embargo, esto no es una condición dada en los rellenos sanitarios en donde se ubican los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

A partir de la investigación, se presenta a las plantas de generación de energía eléctrica a partir del biogás como una alternativa de gran eficiencia, similar a la de las plantas térmicas a gas que se utilizan en la actualidad, y que tienen a los combustibles fósiles no renovables como su fuente de energía primaria.

Finalmente, en la actualidad las plantas de generación que tienen como finalidad reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tienen varios estímulos por parte de casi todos los gobiernos de América Latina. Gracias a la importante acogida de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), se ha aumentado en gran medida los beneficios económicos y sociales que se pueden recibir de una planta de generación de energía eléctrica de este tipo.

**Andrés Felipe Panesso**

Ingeniero Electricista.  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
afpanesso@utp.edu.co

**Juan Andrés Cadena**

Ingeniero Electricista.  
Asistente de Investigación  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jucadena@ utp.edu.co

**Juan José Mora Flórez**

Ingeniero Electricista, Ph.D.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jjmora@utp.edu.co

**María del Carmen Ordoñez**

Química Industrial.  
Asistente de Investigación  
Universidad Tecnológica de Pereira  
mdordonez@ utp.edu.co

**Grupo de Investigación en  
Calidad de Energía Eléctrica y  
Estabilidad – ICE<sup>3</sup>**

Por tanto, específicamente en este artículo se realiza un análisis de producción de energía eléctrica para un pequeño proyecto de generación, que utiliza el biogás como fuente de energía primaria, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero. Además, en este artículo se muestra una predicción de la generación de gases de vertedero mediante un modelo de descomposición cinética y cómo la metodología es útil para determinar la producción de energía eléctrica en el tiempo.

Dentro del alcance del artículo aquí propuesto no está incluida la descripción de la adecuación de las instalaciones y el tratamiento previo que se le debe dar al biogás de vertedero para poder ser utilizado adecuadamente, así como tampoco se considera las especificaciones técnicas de la planta de generación. Los cálculos presentados en este documento utilizan la máxima producción de biogás para así calcular la máxima producción posible de electricidad.

## 2. ASPECTOS METODOLÓGICOS BÁSICOS

En la actualidad, los vertederos son una fuente de energía que tiene mucho potencial desperdiciado, ya que éstos se pueden utilizar para el aprovechamiento de energía en forma de biomasa y en algunos lugares como biogás.

Para que en un vertedero se genere biogás es necesario que la basura depositada incluya materia orgánica, y que haya condiciones para la descomposición anaerobia. Adicionalmente se debe considerar que la generación del biogás en vertederos no es invariable con el tiempo, ya que durante los primeros años aumenta (primeras fases de generación del biogás), mientras que a partir del tercer año la ésta desciende lentamente [2].

### 2.1. Composición del biogás de prueba

La descomposición anaeróbica se realiza en ausencia de aire de la celulosa que contienen materiales orgánicos, como estiércol, excrementos de aves de corral, la degradación de algunas plantas, etc. Esto da como resultado una deficiencia de oxígeno en la fermentación durante la producción de gas combustible llamado biogás.

Los gases que se encuentran en los vertederos incluyen amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ) [3]. El metano y el dióxido de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los RSU.

Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones de entre el 5 y el 15%, éste es explosivo, razón por la cual este gas es el principal componente de estudio en el presente análisis. Como en el vertedero sólo

están presentes cantidades limitadas de oxígeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de que el vertedero pueda explotar. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo, si el gas del vertedero migra fuera del lugar y se mezcla con el aire.

En la tabla 1 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un vertedero de RSU, teniendo en cuenta que la distribución exacta varía según la antigüedad del vertedero y las características propias de la basura. Por esta razón es necesario hacer un estudio periódico de los residuos para saber exactamente cuánto volumen de biogás es aprovechable durante un periodo de tiempo determinado [3].

Componente	Símbolo	Base volumen seco [%]
Metano	$\text{CH}_4$	50-70
Dióxido de Carbono	$\text{CO}_2$	35-55
Nitrógeno	$\text{N}_2$	2-5
Oxígeno	$\text{O}_2$	0.1-1
Sulfuros, Disulfuros, Mercaptanos, etc.	--	0-1.0
Amoníaco	$\text{NH}_3$	0.1-1
Hidrógeno	$\text{H}_2$	0-0.2
Monóxido de carbono	$\text{CO}$	0-0.2

Tabla 1. Constituyentes típicos encontrados en el gas de vertedero de los RSU.

### 2.2. Metodología propuesta

Para la realización del análisis de la producción de electricidad por medio de una planta de ciclo combinado usando biogás, se requiere la determinación previa de las principales variables que pueden surgir en este proceso. Algunas variables son: la cantidad de metano incluido en el biogás, la temperatura de conservación del mismo, la eficiencia de la planta, los costos de manejo de residuos, entre otros. A partir de estas variables, se puede determinar la energía producida por un determinado volumen de biogás, que a través de una planta de ciclo combinado se convertirá en energía eléctrica.

El problema de la generación con biogás se plantea a partir datos obtenidos en [3], los cuales indican la cantidad de metano por volumen total del gas de vertedero, además de la utilización de información contenida en tablas de propiedades termodinámicas para el metano [4]. Considerando diferentes modificaciones de algunas variables, los estados del proceso de generación se obtienen como resultado de la condición óptima de operación del biogás y de su recuperación para la aplicación en este proceso.

## 3. MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO

Para desarrollar la metodología de evaluación, primero se deben obtener las ecuaciones que modelan de forma

independiente cada una de las variables y luego relacionarlas de modo que se tenga un modelo global de la situación planteada.

### 3.1. Modelo predictivo para la producción de biogás

Muchos métodos y modelos han sido desarrollados para proyectar el potencial de generación del biogás. La aplicación de modelos ha permitido determinar la producción de metano por concepto de manejo de RSU, con lo que puede calcularse un potencial de generación de electricidad a partir de biogás producido en sitios de disposición final. Los modelos más aceptados son los desarrollados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [5].

Según la información recolectada para el relleno sanitario de “La Glorita” en la ciudad de Pereira, es posible establecer como el modelo más adecuado el basado en la metodología cinética de descomposición primer orden. Éste resulta más apropiado para el cálculo de emisiones en sitios de disposición en forma individual y para la predicción de la generación de biogás durante la vida útil del relleno sanitario utilizando datos de entrada específicos.

El método planteado utiliza una ecuación de degradación de primer orden, como se presenta en (1). Adicionalmente, se asume que la generación de metano depende de la cantidad de RSU depositados en el año  $i$ , y que el metano generado en un año determinado es el resultado de los RSU depositados en el año  $i$  más la generación de metano acumulada por los RSU depositados en años anteriores con referencia al año actual  $T$ .

$$Q_{mT} = F \cdot k \cdot L_0 \sum_{i=1}^n M_i \cdot e^{-k \cdot (T-i)} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{mT}$  = Generación máxima de metano en el año  $T$  [ $m^3_{CH_4}/año$ ].

$F$  = fracción de metano en el biogás [%].

$k$  = constante de generación de metano [ $año^{-1}$ ].

$L_0$  = potencial de generación de metano [ $m^3_{CH_4}/Ton$ ].

$M_i$  = masa de residuo dispuesto en el año  $i$  [Ton].

En la ecuación (1), se estima la generación de metano utilizando las cantidades de los residuos dispuestos, acumulados durante un año. Los valores son calculados basándose en la información previamente recolectada en el relleno sanitario.

El modelo obtenido por el método de degradación de primer orden permite la utilización de los valores de  $k$  y  $L_0$ , derivados con información propia del relleno sanitario y de la precipitación anual.

Los valores típicos de  $k$  y  $L_0$  son obtenidos de datos de rellenos sanitarios, éstos varían entre 0.003 y 0.21/año, y entre 6.2 y 270  $m^3/Ton$  respectivamente. Estos valores

son determinados con modelos teóricos y a partir de pruebas de campo. La tabla 2 presenta algunos valores típicos de las constantes mencionadas para residuos sólidos urbanos característicos de la región [6].

Precipitación anual (mm/año)	$k$ (año <sup>-1</sup> )	$L_0$ ( $m^3/Ton$ )
0-249	0.040	60
250-499	0.050	80
500-999	0.065	84
≥ 1000	0.080	84

Tabla 2. Índices de generación de metano  $k$  y  $L_0$ .

El relleno sanitario La Glorita, está ubicado a una altura de 1423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21°C y una precipitación promedio de 2750 mm/año [7]. Esto lo que hace un ambiente óptimo para el proceso de descomposición anaerobia y aumentando la producción de biogás en el relleno. La tasa de producción de metano puede ser estimada por diversos modelos de producción. El modelo de emisión de gases de rellenos sanitarios LandGEM (Landfill Gas Emission Model) de la US EPA, es una herramienta utilizada para estimar tasas de emisión de sitios de disposición de residuos sólidos urbanos basado en la ecuación de descomposición cinética de primera orden [8].

Es así como el modelo LandGEM se utiliza para estimar las tasas de emisión total de gases de relleno sanitario como el metano, el dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, y otros contaminantes atmosféricos asociados.

Adicionalmente, es posible establecer las toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> reducidas por la captura e incineración del biogás de vertedero por medio de la expresión (2), donde se puede establecer el aporte ambiental en un proyecto de esta categoría.

$$T_{CO_2eq} = \%V_{CH_4} \cdot 21 \cdot Q_{BG} \cdot \rho_{CH_4} \quad (2)$$

Dónde:

$T_{CO_2eq}$  = Toneladas totales generadas de CO<sub>2</sub> equivalente.

$\%V_{CH_4}$  = Porcentaje del volumen estimado de metano en el biogás.

$Q_{BG}$  = Cantidad total de biogás estimado [Ton/año].

$\rho_{CH_4}$  = Densidad del metano = 0.0007168 [Ton/ $m^3_{CH_4}$ ].

Es de anotar que con la aplicación del modelo planteado se obtiene un valor estimado de la generación de metano, pero ese resultado no implica que sea el total de metano que puede ser captado, ya que depende de la eficiencia del sistema de recuperación en el momento de la recolección y extracción del biogás. Los valores típicos de eficiencia de los sistemas de recuperación de biogás se encuentran entre el 50 y 80% [9].

### 3.2. Determinación del poder calorífico

Antes de determinar la energía que un compuesto puede liberar en forma de calor, es necesario conocer el poder calorífico al ser quemado. La figura 1 muestra como se presenta este fenómeno en un proceso de combustión de una masa  $m$  de combustible y entalpía media  $h_{fg}$ .

El poder calorífico depende de la fase del  $H_2O$  en los productos y recibe el nombre de Poder Calorífico Superior (PCS) cuando el  $H_2O$  está en la forma líquida y se llama Poder Calorífico Inferior (PCI) cuando el  $H_2O$  en los productos está en forma de vapor.

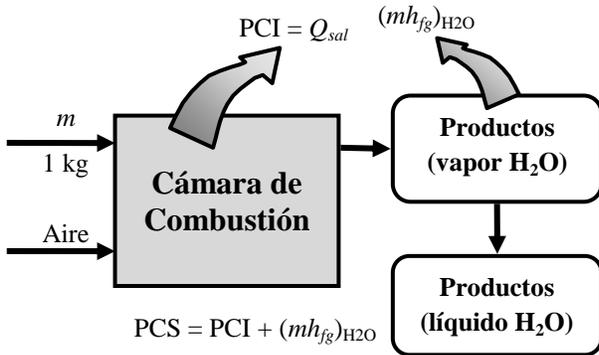
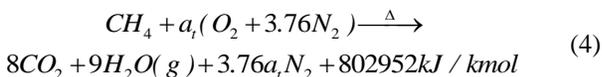


Figura 1. PCS en función del PCI y del calor latente de vaporización en los productos.

Para determinar el valor del poder calorífico inferior del biogás es necesario determinar primero el poder calorífico del metano, dado que éste se encuentra en mayor proporción dentro del biogás, además es el compuesto de más fácil reacción y mayor liberación de energía cuando se requiere quemar el combustible para su aplicación. El cambio de entalpía por combustión entre el producto y el reactivo se representa como la cantidad de calor cedido al exterior como se muestra en (3).

$$h_c = H_{prod} - H_{reac} = Q_{sal} \quad (3)$$

La entalpía de combustión de un compuesto ( $h_c$ ), representa la cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema durante un proceso de flujo estable a un estado especificado [4] [10]. En el caso del biogás, hay que considerar las variables que interrelacionan la combustión del metano en la siguiente ecuación estequiométrica y asumiendo que el  $H_2O$  se encuentra en forma de vapor.



La figura 2 representa el proceso de liberación de energía que se produce en la reacción observada en (4). De aquí se obtiene que el cambio de entalpía para esa reacción entre el metano y el aire estándar es 802952 kJ/kmol.

Para condiciones de presión atmosférica (@1 atm) y temperatura ambiente (@25 °C), el poder calorífico para el metano puro a condiciones normales, es similar al del gas natural ( $C_nH_{3.8n}N_{0.1n}$ ) a las mismas condiciones (810000 kJ/kmol).

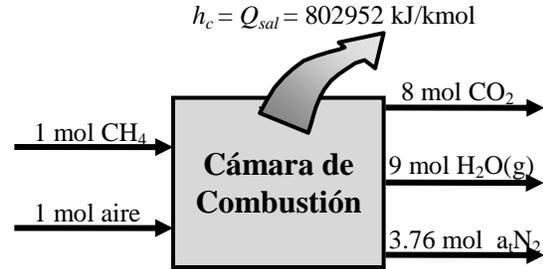


Figura 2. Representación de la cantidad de energía liberada en un proceso de formación de un compuesto, a condiciones estándar.

Además, para cualquier gas ideal en condiciones normales, se ha establecido que ocupa un volumen aproximado de 1 mol, lo cual por facilidad de operación se expresa en unidades métricas, como se presenta en (5).

$$1m^3 = 1000L \cong 0.044643kmol \Rightarrow 802952kJ / kmol = 35846.071kJ / m^3 \quad (5)$$

Sin embargo, como ya se mencionó, el biogás está formado por varios compuestos en diferentes proporciones, por tanto para este estudio se supondrá que para un volumen definido de biogás, el metano se encuentra en una proporción media tal como aparece en (6) y en relación a los datos de la tabla 1.

$$1Biogás = 0.6CH_4 + 0.35CO_2 + 0.03N_2 + 0.01O_2 + 0.01demás \quad (6)$$

De aquí se tiene que el poder calorífico inferior del biogás obtenido a partir de los RSU debido al metano es de aproximadamente el 60% del total de la composición. Entonces, el poder calorífico del biogás de vertedero para una ciudad como Pereira es de 21507.643 kJ/m<sup>3</sup> aproximadamente. La expresión (7) muestra la relación entre el poder calorífico del biogás y el porcentaje de metano que contiene.

$$PCI_{BG} = \%CH_4 \times PCI_{Metano} \quad (7)$$

$$PCI_{BG} = 0.6 \times 35846.071kJ / m^3 = 21507.643kJ / m^3$$

Una consideración importante es que el valor del poder calorífico inferior del biogás ( $PCI_{BG}$ ) puede variar de acuerdo a la antigüedad del vertedero y a la calidad de los residuos sólidos urbanos, por esto es conveniente hacer un muestreo periódico de los residuos y comprobar así la calidad del gas antes de la combustión.

Por facilidad de análisis, en este artículo se utilizan las unidades de energía en kWh, por tanto se presenta la conversión en (8) y de esta forma es más sencillo hacer relaciones entre un proceso y otro, dentro de la generación de energía térmica a eléctrica y considerando la eficiencia del grupo turbina-alternador [11].

$$1kcal = 14.1858kJ \cong 0.001163kWh \tag{8}$$

$$\Rightarrow 1kJ \cong 2.778 \cdot 10^{-4} kWh$$

Además, si se considera que la energía que entra en forma de calor a la caldera de la planta de ciclo combinado está directamente relacionada con la cantidad de combustible que se quema (volumen  $V$ ), y conociendo el  $PCI$  del biogás, entonces se obtiene (9) usando la conversión presentada en (8).

$$21507.643 [kJ / m^3] \times V [m^3] = 21507.643 \times V [kJ] \tag{9}$$

$$\therefore E_{BGI} = PCI_{BG} \times V = 5.9748 \times V [kWh]$$

El anterior poder calorífico es ahora la cantidad de energía térmica que ingresa al ciclo de gas de la planta ( $E_{BGI}$ ). Por último, para estimar la potencia eléctrica generada por el biogás se utiliza la expresión (10).

$$P_G = E_{BGI} * \gamma * \eta \tag{10}$$

En la expresión obtenida en (10) se encuentran involucradas la energía térmica que ingresa a la planta ( $E_{BGI}$ ), la eficiencia del sistema de recuperación de biogás ( $\gamma$ ), y la eficiencia eléctrica de la tecnología utilizada para la generación de electricidad ( $\eta$ ), para el caso de una planta de ciclo combinado es de alrededor del 57% [3].

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el Relleno Sanitario La Glorita se realiza la disposición final de residuos sólidos domiciliarios, industriales y comerciales mediante su depósito definitivo en el suelo. De esta forma se da solución a las necesidades de evacuación de alrededor de 18000 Ton/mes de basuras (216000 Ton/año) de 17 municipios del occidente del Eje Cafetero y norte del Valle. La última licencia de funcionamiento vigente (en el año 2007), para el manejo de los RSU de la ciudad de Pereira y el respectivo manejo del relleno sanitario, la obtuvo la empresa ATESA de Occidente, la cual específica (en el año 2010), que la vida útil del relleno es de 12 años. Así, su clausura está calculada para el año 2022, siendo posible implementar un proyecto de captura y quema de biogás, el cual puede funcionar alrededor de 15 años después de la clausura del relleno [12].

Para calcular el potencial de producción de biogás en el relleno sanitario La Glorita, se utiliza el modelo LandGEM, con los siguientes datos:

- Cantidad promedio de RSU depositados, 216000 Ton/año.
- Año apertura relleno 2007, año de clausura 2022.
- Precipitación promedio en la ciudad de Pereira 2750 mm/ año.
- Contenido de Metano 60%.
- $k = 0.08 \text{ año}^{-1}$ .
- $L_0 = 84 \text{ m}^3_{CH_4}/\text{Ton}$ .
- Eficiencia del sistema de recuperación del biogás: baja (50%), media (60%) y alta (80%).

Los resultados que arroja el programa comprende el periodo de 2007 hasta el año 2056. Es de aclarar que el proyecto planteado asume un inicio de las operaciones en el año 2011, con una productividad proyectada hasta el año 2035, fecha en la que la producción de metano está por debajo del 50% de su valor pico.

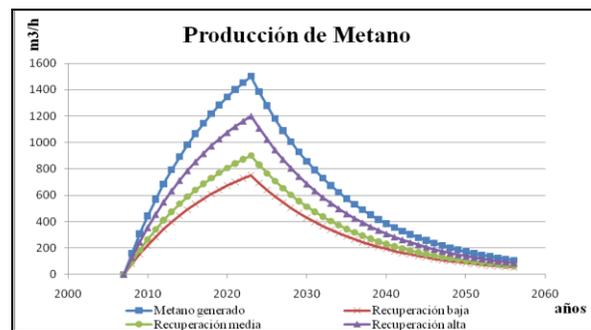


Figura 3. Producción de metano por año.

La figura 3, muestra la generación total metano por año, donde el valor pico se alcanza en el año 2023 para las eficiencias baja, media y alta del sistema de recuperación, con valores de  $751 \text{ m}^3_{CH_4}/\text{h}$ ,  $901 \text{ m}^3_{CH_4}/\text{h}$  y  $1200 \text{ m}^3_{CH_4}/\text{h}$  respectivamente, para luego ir decreciendo gradualmente.

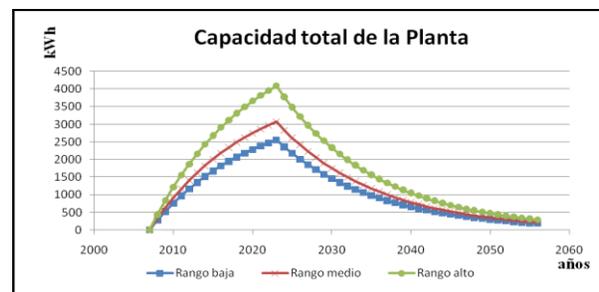


Figura 4. Capacidad total generada con planta de ciclo combinado.

Mientras que en la figura 4 se puede observar la capacidad de generación de la central de ciclo combinado, la cual se calcula con el valor pico de recuperación de metano, y obteniendo una capacidad máxima instalada de 2557 kW, 3068 kW y 4090 kW para cada una de las eficiencias del sistema de recuperación.

Adicionalmente, con base en la ecuación (2) se obtiene la cantidad de toneladas equivalentes de  $CO_2$  reducidas por

año debidas a la captura e incineración del biogás de vertedero. La tabla 3, contiene las toneladas reducidas de CO<sub>2</sub> para análisis de comercialización de bonos en el mercado del carbón por medio de los Certificados de Reducción de Emisiones (CER).

Año	Total de biogás generado (Ton/año)	CO <sub>2</sub> Equivalente (Ton/año)
2011	10937,94	98,79
2012	13167,82	118,93
2013	15226,26	137,52
2014	17126,43	154,68
2015	18880,52	170,52
2016	20499,74	185,15
2017	21994,47	198,65
2018	23374,29	211,11
2019	24648,01	222,61
2020	25823,81	233,23
2021	26909,21	243,04
2022	27911,16	252,08
2023	28836,07	260,44
2024	26619,05	240,41
2025	24572,48	221,93
2026	22683,26	204,87
2027	20939,29	189,12
2028	19329,40	174,58
2029	17843,28	161,15
2030	16471,43	148,76
2031	15205,04	137,33
2032	14036,02	126,77
2033	12956,88	117,02
2034	11960,71	108,03
2035	11041,13	99,72

Tabla 3. Cantidad equivalente de CO<sub>2</sub> reducido por año.

A partir de la información obtenida y como trabajo futuro, se puede establecer una relación entre las emisiones reducidas y las ganancias proyectadas hasta el final de la vida útil de la planta por concepto de la venta de bonos de carbón. Para realizar esta evaluación se requiere consultar las reglamentaciones vigentes asociadas al mercado de energía renovable en el mundo y en Colombia.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados del estudio de implementación de una central de ciclo combinado, aprovechando el potencial energético del relleno sanitario La Glorita mediante la captura e incineración del biogás generado, muestran que hay una situación favorable. Se observa la viabilidad inicial para desarrollar proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio utilizando el biogás generado en el relleno y obteniendo Certificados de Reducción de Emisiones, por los cuales se pueden obtener ingresos adicionales a los obtenidos por la venta de energía eléctrica producida.

Además y como ventaja importante, la implementación de este proyecto mejoraría la calidad de vida de la

comunidad cercana al relleno sanitario, ya que se reducen los vectores biológicos perjudiciales que actualmente son un problema de la zona (aves de carroña, ratas, entre otros), se reduce la emisión de gases de efecto invernadero, y con el beneficio de utilizar energías no convencionales. De igual forma, el operador del relleno sanitario mejoraría su imagen corporativa frente a la comunidad local y nacional, pues con este proyecto aportaría al mejoramiento ambiental de la región.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Arrigoni, "La Generación Eléctrica mediante el uso de Residuos Sólidos Urbanos," *Mundo Eléctrico Colombiano*, Vol. 23. No. 76. pp. 100-101. 2009.
- [2] A. Beyebach, "Opinión, El biogás de vertederos," *Ambienta*, pp. 66-69, Sept. 2005.
- [3] D. Alzate, A. García, "Análisis de viabilidad para el aprovechamiento energético de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos," Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 2009. p. 26.
- [4] Y. A. Çengel, M. A. Boles, "Termodinámica," Cuarta Edición, McGraw-Hill companies inc. México. C2003. pp. 692-694.
- [5] E. G. Dominguez, L. R. Silva, H. Bradl. *Evaluation of the Methane and Electrical Energy Potential and Carbon Credits Revenues from the Goiânia Landfill*. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES. August 2008. pp. 1-6.
- [6] F. García, "Determinación cuantitativa y cualitativa de los contaminantes atmosféricos emitidos por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, estudio de caso: relleno sanitario curva de rodas," Tesis de Maestría. Universidad de Antioquia. 2003.
- [7] Occidental de Construcciones S.A., "Relleno La Glorita: Plan de manejo," Tomos I y II, Documento elaborado para la CARDER Risaralda. 1998.
- [8] US EPA, "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide," U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. 2005. Available: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>
- [9] L. M. Johannessen, "Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills," The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank. 1999.
- [10] J. A. Manrique, K. Ward, D. E. Richards, P. de A. Martinez, "Termodinámica," Sexta Edición. McGraw-Hill. Interamericana de España. España. C2001. pp. 632-636.
- [11] R. Quesada, N. Salas, M. Arguedas, R. Botero, "Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás," *Revista Tierra Tropical*, Universidad EARTH. Vol. 3. No. 2. pp. 139-147.
- [12] ATESA de Occidente S.A., [Online]. Available: <http://www.atesadeoccidente.com/tratamiento>. Fecha de consulta [18-08-2010].