

## **Determinación del potencial energético de los Residuos Sólidos Urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda, Angola**

*Determination of the Energy Potential of the Urban Solid Residuals in Three Municipalities of the County of Luanda, Angola*

**Dra.C. Yudith González-Díaz<sup>1</sup>, [yudith@fiq.uo.edu.cu](mailto:yudith@fiq.uo.edu.cu); Ing. Tania Gato-Clavell<sup>2</sup>, [gatica.2369@live.com.pt](mailto:gatica.2369@live.com.pt); MSc. Rosa Guillot<sup>2</sup>, [rosa.guillot@gmail.com](mailto:rosa.guillot@gmail.com); Dr.C. Luis Pires-Araújo<sup>2</sup>, [luispires.araujo@yahoo.com](mailto:luispires.araujo@yahoo.com)**

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba;* <sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Agustino Neto, Luanda, Angola*

*La conversión biológica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para fines energéticos viene ganando importancia cada día, una vez que los residuos urbanos pasaron a ser considerados una fuente de energía alternativa. Prever la generación de biogás resultante del proceso de descomposición biológica de los residuos sólidos de origen orgánico en los rellenos sanitarios es fundamental para estimar el balance energético y económico de instalaciones de recuperación de gas. Para la determinación adecuada del potencial de generación de gases se empleó la metodología de cálculo presentada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El objetivo de este artículo es cuantificar el potencial de generación de energía eléctrica proveniente del gas metano oriundo de los Residuos Sólidos Urbanos de los municipios Belas, Cacuaco y Viana de la provincia de Luanda en Angola. Se determinó la potencia energética disponible anualmente de los tres municipios. La estimativa demuestra que el flujo de biogás llega al nivel máximo y posee la máxima potencia disponible en el año 2037, obteniéndose para los municipios Belas, Cacuaco y Viana  $3\,330 \cdot 10^3$ ,  $1\,206,13 \cdot 10^3$  y  $2\,809,23 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$  de metano aprovechable, respectivamente, cuyo potencial energético calculado fue de 2 316,52, 135,88 y 3 165,02 kW, respectivamente. Los cálculos realizados permiten no solo evaluar el potencial energético del relleno, sino también evaluar, de cierta forma, el impacto ambiental por la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.*

**Palabras clave:** biogás, rellenos sanitarios, residuos sólidos urbanos, potencia energética.

*The biological conversion of the Urban Solid Residuals (USR) for energy purposes she comes winning importance every day, once the urban residuals became considered a source of alternative energy. To foresee the generation of resulting biogas of the process of biological decomposition of the solid residuals of organic origin in the sanitary fillers is fundamental to estimate the energy and economic balance of facilities of recovery of gas. For the appropriate determination of the potential of generation of gases you employment the calculation methodology presented by the Agency of Environmental Protection of United States. In this context, the objective of this article is to quantify the potential of electric power generation coming from the gas methane originating of the Urban Solid Residuals of the municipalities Belas, Cacuaco and Viana of the County of Luanda in Angola. The available energy power was determined annually of the three municipalities. The instinct demonstrates that the biogas flow*

arrives at the maximum level and it possesses the maximum available Power in the year 2037, obtaining stops the municipalities Belas, Cacuaco and Viana  $3\,330 \cdot 10^3$ ,  $1\,206,13 \cdot 10^3$  and  $2\,809,23 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ /year of profitable methane respectively whose calculated energy potential was respectively of 2 316,52, 1 358,88 and 3 165,02 kW. The carried out calculations not allow alone to evaluate the energy potential of the filler, but also to evaluate, in certain way, the environmental impact for the mitigation of emissions of gases of effect hothouse.

**Keywords:** biogas, sanitary fillers, urban solid residuals, energy power.

## Introducción

La conversión biológica de los residuos sólidos para fines energéticos viene ganando importancia cada día, una vez que los residuos urbanos pasaron a ser considerados una fuente de energía alternativa.

Los métodos biológicos para la producción de combustibles de la basura se basan en el rendimiento de la actividad microbiana, principalmente de bacterias anaeróbicas que, a través de su metabolismo, transforman la materia orgánica en productos combustibles, como el gas metano y el hidrógeno /1/.

La factibilidad de proyectos para el aprovechamiento del biogás en los rellenos sanitarios depende de estimar, con una certidumbre razonable, tanto la producción diaria como la producción acumulativa de  $\text{CH}_4$  en el largo plazo /4/. Tales valores son usualmente calculados con expresiones matemáticas que consideran 100 % de conversión.

Los estudios de estimación de generación de biogás han cobrado fuerza debido al aumento en la demanda energética, y a que los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados sin un manejo apropiado pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, con el consecuente riesgo a la salud pública. Además, la contribución al efecto invernadero del  $\text{CH}_4$ , uno de los gases presentes en el biogás que se genera, es 21 veces más potente respecto al  $\text{CO}_2$ .

Por lo expuesto anteriormente, la estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final ha sido fuertemente analizada por diversos investigadores en todo el mundo, con fines de extracción y utilización como fuente renovable de energía y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero /2/.

El objetivo de este artículo es cuantificar el potencial de generación de energía eléctrica proveniente del gas metano oriundo de los Residuos Sólidos Urbanos de los municipios Belas, Cacuaco y Viana de la provincia de Luanda en Angola.

## Metodología

Las metodologías de cálculo de generación de metano más utilizadas son las presentadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), Banco Mundial e IPCC. Son ecuaciones que tienen en común el hecho de ser ecuaciones cinéticas de primer orden y considerar los mismos parámetros de entrada:

Masa de residuos que ingresa al relleno sanitario anualmente.

Tiempo de actividad del relleno o tiempo después de cerrado.

Tasa de generación de metano ( $k$ ).

Potencial de generación de metano ( $L_0$ ).

En este contexto, la metodología para el cálculo de la emisión de metano aquí presentada, sigue la metodología de cálculo de la USEPA.

La selección de esta metodología se debió a la sencillez para la aplicación y a la deseada confiabilidad en los resultados, además es un modelo específicamente recomendado para rellenos sanitarios aun en la fase de proyecto, pues todavía no se conoce cuál será el flujo anual de residuos.

Para las estimativas de la población, de la generación de residuos y de la producción de biogás, se consideran los siguientes períodos:

- Período estimado para estimativa del crecimiento poblacional y de la generación de RSU: 2017 a 2037.
- Las estimativas de las producciones potenciales de biogás y metano son hechas teniendo como año cero el año de 2017, y teniendo como año de cierre del relleno sanitario el año de 2037.
- Período considerado para el cálculo del biogás: 2017 a 2057.
- La literatura internacional suministra los valores de  $k$  y  $L_0$  (tabla 1). Los municipios objeto de estudio son: Belas, Cacucaco y Viana.

**Tabla 1**  
Valores de k e L<sub>0</sub> propuestos por la USEPA

		Valores sugeridos		
		Clima húmedo	Clima de humedad media	Clima seco
L <sub>0</sub> [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg RSU]	0 – 0,312	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18	0,14 – 0,18
k [año <sup>-1</sup> ]	0,003 – 0,4	0,10 – 0,35	0,05 – 0,15	0,02 – 0,10

*Estimación del flujo de metano en el año considerado*

De acuerdo con el modelo USEPA, la estimación de generación de metano es hecha para cada porción de residuo depositado en el relleno sanitario. En el primer año ocurre el mayor nivel de generación, reduciéndose a lo largo de los años, con su intensidad variando en función de la composición del residuo y de la humedad del lugar. Este modelo es dado por la ecuación:

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)}$$

donde

Q<sub>x</sub>: flujo de metano generado en el año x por el RSU depositado en el año T (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/año).

R<sub>x</sub>: flujo de residuos en el año x (kg RSU).

T: año de deposición del residuo en el relleno sanitario (año).

x: año actual (año).

La evaluación de R<sub>x</sub> debe haber sido hecha anteriormente y es uno de los más importantes elementos de esa estimativa.

La estimativa de suma de los flujos de metano (ΣQ<sub>x</sub>) es dada por la ecuación siguiente, que representa la suma de los flujos de metano correspondientes a las cantidades de residuos depositadas en el relleno año a año.

$$\sum Q_x = F \cdot k \cdot L_0 \sum R_x \cdot e^{-k(x-t)}$$

donde

ΣQ<sub>x</sub>: suma de la n estimativas de flujos de metano (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>).

Esa estimativa es hecha año tras año, lográndose así la emisión de metano del relleno sanitario durante toda su vida útil y por los años siguientes después de su cierre.

*Estimación de la generación de biogás en el relleno sanitario*

Para poder realizar la estimación del biogás generado, son necesarios los datos del relleno sanitario que se proyecta construir los que se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2**  
**Datos del relleno sanitario que se proyecta construir**

Tasa de quema (%)	20
Emisión de gas de efecto estufa evitada por la sustitución de energía eléctrica generada por fuentes no renovables(tCO <sub>2</sub> /MW)	0,2 782
Eficiencia de colecta de biogás (%)	75
Eficiencia de quema de biogás (%)	95

La ecuación siguiente es utilizada para convertir el flujo de metano en los diferentes años (Q<sub>X</sub>) en potencia disponible (P<sub>X</sub>). Esa información es útil para tener una idea de los equipos de generación de energía eléctrica que podrán ser empleados.

$$P_X = \frac{Q_X \cdot P_{C(\text{metano})}}{31536000} E_c \frac{k}{1000}$$

donde

P<sub>X</sub>: potencia disponible en cada año (kW).

P<sub>C</sub>(metano): poder calorífico del metano igual a 35,53 · 10<sup>6</sup>(J/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>).

E<sub>c</sub>: eficiencia de colecta de gases (%).

*Potencial de Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos*

A partir del índice de generación y colecta de RSU *per capita* de los municipios objeto de estudio, se encontró la cantidad de RSU/año generados y colectados en el período de actividad del relleno sanitario por cada uno de los municipios, según se presenta en las figuras 1 y 2.

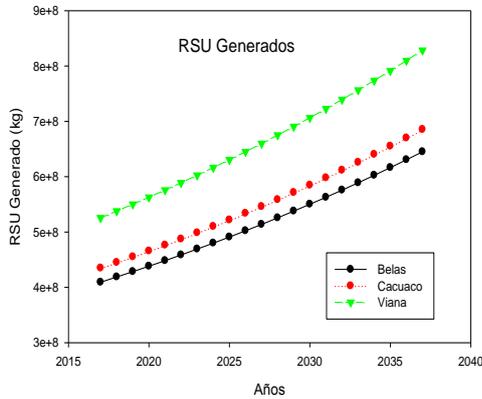


Fig. 1 Generación de RSU

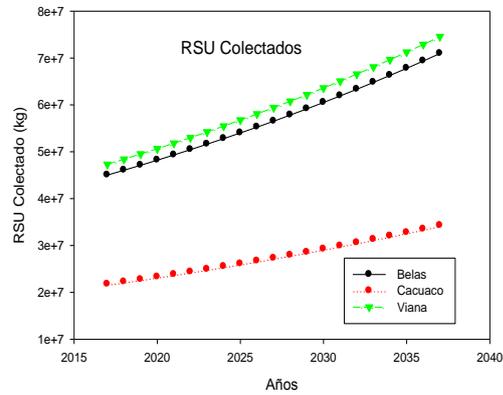
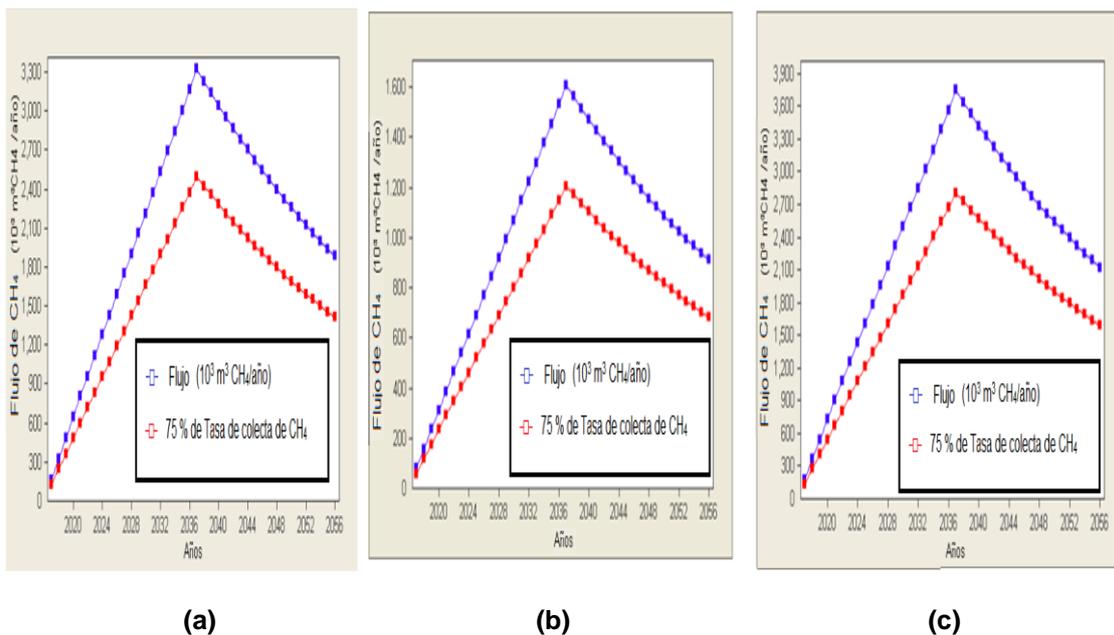


Fig. 2 RSU colecta

Puede observarse en la figura 1, que el Municipio de Viana con relación a los Municipios de Belas y Cacuaço tiene una generación mayor de RSU; sin embargo, en la figura 2, se nota que los municipios de Viana y Belas con relación a Cacuaço presentan mayores tasas de RSUs colectados.

En la figura 3, se muestran las cantidades estimadas de gas metano generadas por año entre 2017 y 2057 en los municipios Belas, Cacuaço y Viana. La cantidad de gas depende principalmente de la cantidad y de la composición de los residuos y no de la configuración del relleno. Esas cantidades de gas fueron calculadas por el modelo USEPA.



(a)

(b)

(c)

Fig. 3 Emisión de metano generada por año entre 2017-2057  
(a) Belas, (b) Cacuaço y (c) Viana

La cantidad de gas metano tiende a crecer proporcionalmente a la deposición de los RSU en el relleno sanitario. Sin embargo, cuando cesa esta deposición, la cantidad de metano tiende a disminuir gradualmente. Nótese que el ápice de la curva coincide con el último año de deposición de RSU en el relleno sanitario.

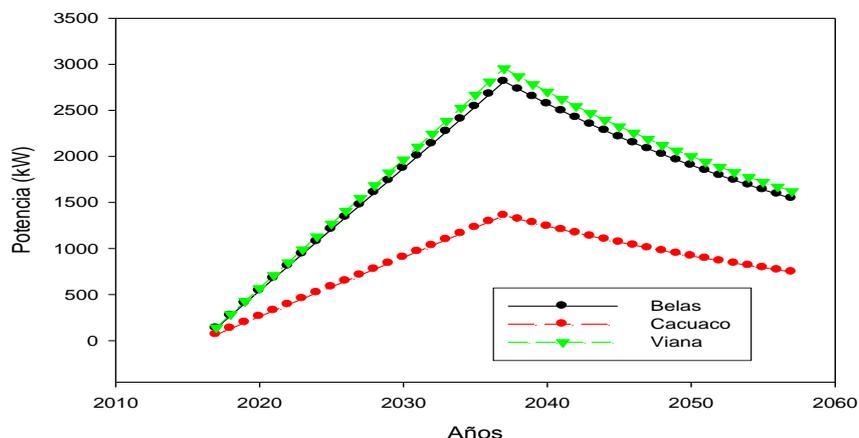
Es preciso aclarar que los rellenos sanitarios poseen dos fases en su vida útil: etapa de funcionamiento, cuando los residuos sólidos urbanos son depositados y degradados en estos sitios; y etapa de clausura, cuando se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento de residuos sólidos. En su etapa de operación los rellenos sanitarios emiten mayor cantidad de metano con respecto a los rellenos clausurados, esto se debe a que la degradación de la materia orgánica ocurre en su mayoría en los primeros años.

Como se muestra en la figura 3, la cantidad de gas metano generada anualmente disminuye de manera exponencial después del cierre del relleno, una vez que, a la medida que el biogás es generado, la cantidad de materia en descomposición que permanece en el local disminuye.

Es muy difícil, o hasta imposible, recuperar todo el biogás generado en un relleno, pues su cobertura no es impermeable. El biogás puede escaparse por la cobertura y por la base del relleno. Para estimar la cantidad de gas metano que puede ser recobrada, se multiplica un valor supuesto de “eficiencia de captación” por la cantidad de gas metano generada.

La eficiencia de la captación depende, entre otros factores, de la calidad de la cobertura del relleno, de la parte del relleno afectada por los pozos de colecta de biogás, del proyecto de los pozos y de la succión aplicada a los pozos. En este caso, se estimó que la eficiencia de la colecta es del 75 %.

La estimación de la potencia disponible es representada en la figura 4. Los cálculos fueron realizados hasta el 2057, para mostrar la tendencia general del potencial disponible después de la clausura del relleno.



**Fig. 4 Potencia disponible en los municipios Belas, Cacucaco y Viana**

Después de realizar la estimación del metano a capturar, se concluye que en el año 2037, el flujo de biogás del relleno llega al nivel máximo y posee la Potencia disponible máxima. Los valores estimados están presentados en la tabla 3.

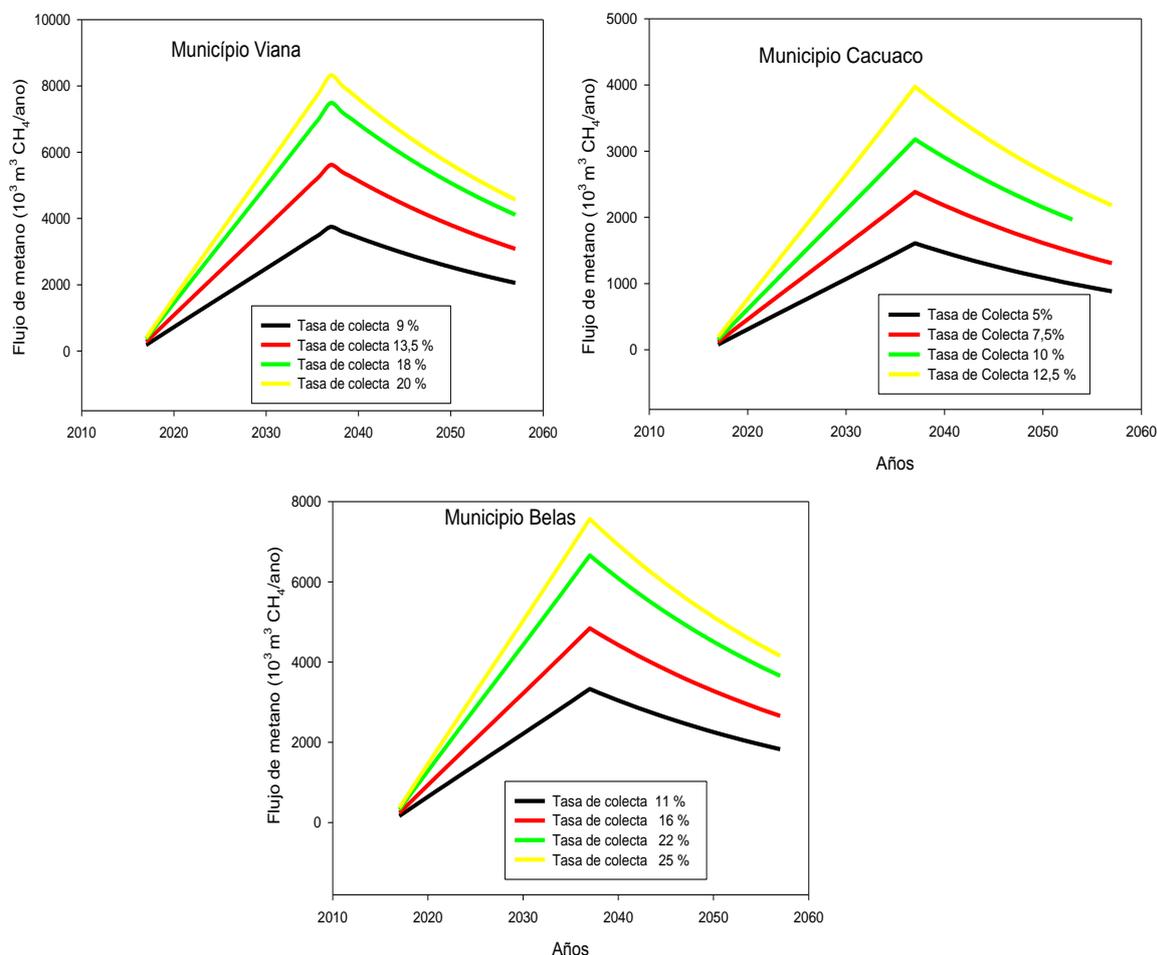
**Tabla 3**  
**Flujo de gas a obtener en el relleno y Potencia disponible en el año 2037**

Municipio	Máximo gas disponible (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /año)	Potencia disponible máxima (kW)
Belas	3 330 · 10 <sup>3</sup>	2 316,52
Cacucaco	1 206,13 · 10 <sup>3</sup>	1 358,88
Viana	2 809,23 · 10 <sup>3</sup>	3 165,02

Estos valores permiten no solo evaluar el potencial energético del relleno, sino también evaluar, de cierta forma, el impacto ambiental causado. El modelo no presenta resultados sobre la emisión del CO<sub>2</sub>, sin embargo, conociendo la composición del biogás, puede calcularse el volumen de dióxido de carbono generado por año.

La máxima capacidad de generación de gas carbónico es en el año de clausura del relleno (año 2037). Después de la clausura, un relleno sanitario continúa con la generación y emisión de gas carbónico demorando varios años en dejar de producirlo.

Una vez determinado el potencial energético en las condiciones actuales de la tasa de colecta se realizan los cálculos considerando un aumento en las actuales tasas de colecta de cada uno de los municipios, los resultados obtenidos se presentan en la figura 5.



**Fig. 5 Potencia disponible en los municipios Belas, Cacucaco y Viana**

Obsérvese que a medida que aumentan las tasas de colectas, el flujo de metano crece, aumentando también el potencial generado.

## Conclusiones

***Del estudio desarrollado sobre la Potencialidad energética de los Residuos Sólidos Urbanos en tres Municipios de la provincia de Luanda puede concluirse que:***

***El Municipio de Viana con relación a los Municipios de Belas y Cacucaco tiene una generación mayor de RSU, mientras tanto los municipios de Viana y Belas, con relación a Cacucaco, presentan mayores tasas de residuos colectados.***

***La cantidad de gas metano tiende a crecer proporcionalmente a la deposición de los RSU en el relleno sanitario. Sin embargo, cuando cesa esta deposición, la cantidad de metano tiende a disminuir gradualmente.***

***La potencia energética disponible anualmente disminuye de manera exponencial después de la clausura del relleno sanitario, porque a la medida que el biogás es generado, la cantidad de materia en descomposición que permanece en el local disminuye.***

***Después de ejecutar el modelo de estimativa del metano capturado, se concluye que en el año 2037 (año de cierre o clausura del relleno) el flujo de biogás de relleno llega al nivel máximo y posee la máxima Potencia disponible.***

***Los cálculos realizados permiten no solo evaluar el potencial energético del relleno, sino también evaluar, de cierta forma, el impacto ambiental causado.***

***A medida que aumentan las tasas de colecta de RSU, el flujo de metano aumenta, aumentando también el potencial generado.***

## **Bibliografía**

CONTRERAS, Luz María. "Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico". *Revista Futuros*. 2006, vol. 4, núm. 16, p. 11-18. Disponible en línea: <http://www.revistafuturos.info>. Consulta: 22 de abril de 2013.

DA SILVA, Geslaine; VILLAS BÔAS, Cecilia; GIANNETTI, Biagio F.; BONILLA, Sílvia. "Aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário". *Revista Agrogeoambiental*. 2011, abril, p. 93-100.

CARVALHO FIGUEIREDO, Juliana. "Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais". Director: Ilka Soares Cintra. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Brasil, 2012.

GALHARDO, Luiz Gustavo; MAGALHÃES, Pedro. "Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário". *Revista Ciência Exatas*. Taubaté. 2005, vol. 11, núm. 2, p.71-76.

MONCAYO, Gabriel. *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*. México: Editorial: Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008. 680 p. ISBN: 978-9942-01-719-2