

ESTUDIO COMPARATIVO DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LAS CIUDADES DE QUIXADÁ (CEARÁ, BRASIL) Y CÓRDOBA (ARGENTINA).

CAVALCANTE, REINADO F.¹; REZENDE, FRANCISCO W. G. ¹; SANTOS, PRISCILA DA SILVA¹; PEPINO MINETTI, ROBERTO² Y STEFANUTTI, RONALDO³.

1: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
Campus Quixadá
Avenida José de Freitas Queiroz 5000 - Cedro (63902) – Quixadá, Brasil.
e-mail: reinaldo.ifce@gmail.com, web:www.ifce.edu.br/quixada

2: Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA)
Facultad Regional Córdoba
Universidad Tecnológica Nacional
Maestro López esq. Av. Cruz Roja Argentina - Ciudad Universitaria (X5016ZAA) – Córdoba, Argentina
e-mail: rpm@ciqa.com.ar, web: www.ciqa.com.ar

3: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Universidade Federal do Ceará
Portal do Acesso a Informação
Av. da Universidade, 2853, Benfica (60020) – Fortaleza, Brasil
e-mail: ronaldostefanutti@hotmail.com, web: www.deha.ufc.br

Resumen. *La posibilidad de aprovechamiento del biogás ha fomentado acciones alrededor del mundo que buscan la resolución de dos factores que ejercen presión sobre los recursos naturales: la producción de energía y la disposición adecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU). Estas variables ganan más relevancia en regiones semiáridas con escasa disponibilidad de recursos energéticos como es el caso de la región Central Cearense donde se localiza la ciudad de Quixadá, en Brasil, y de la ciudad de Córdoba, Argentina. De esta forma el presente estudio busca realizar un estudio comparativo del potencial de producción de biogás a partir de RSU de las dos ciudades. Con la ecuación indicada a través de los estudios realizados por el Instituto Internacional de Investigación en Cambio Climático (IPCC) fue posible estimar valores de producción de metano en las dos ciudades. Durante el estudio se observó que la región de Quixadá posee un potencial de producción de 18.616 m³ CH₄/año mientras que la ciudad de Córdoba, un potencial de 665.703 m³ CH₄/año. Se percibió que los valores discrepantes del potencial teórico de producción de biogás en las dos ciudades se deben a las diferentes fracciones de residuos orgánicos de fácil degradación que caracteriza la producción de las mismas.*

Palabras clave: Emisiones atmosféricas, Energías Renovables, Metano, Biogás.

1. INTRODUCCIÓN

La energía se caracteriza como uno de los principales constituyentes de la sociedad moderna y factor indispensable para la producción de bienes a partir de recursos naturales, además del suministro de muchos servicios esenciales. De esta forma, la respuesta a la creciente demanda

energética mundial se configura como uno de los mayores desafíos ambientales de la humanidad en este inicio de siglo. Al observar este escenario, se percibe la necesidad de la búsqueda de fuentes alternativas de energía, que disminuyen la fuerte dependencia de los combustibles fósiles; una actividad de alto valor estratégico para la garantía del desarrollo de las más variadas regiones del planeta [1].

Hemos presenciado la conformación de un nuevo panorama geopolítico mundial donde las preocupaciones ambientales y las variables inherentes al desarrollo sostenible ocuparon el centro de las discusiones. En las diversas regiones del globo se han observado iniciativas y programas bien establecidos que incentivan el uso de fuentes de energía renovables como el etanol y el biodiesel, que pueden obtenerse a partir de diversas plantas vegetales. Más recientemente, el aprovechamiento del poder calorífico del biogás, muy común en los rellenos sanitarios y estaciones depuradoras de aguas residuales, trae nuevas posibilidades para la explotación de esta forma de energía en los grandes centros urbanos.

La mayor problemática en los centros urbanos es la correcta gestión de los residuos sólidos generados, garantizando un equilibrio entre los residuos producidos, el reciclado y el proceso de inserción del material en el ciclo productivo [2]. La acumulación de este material hace que ocurra la generación de gases, resultantes de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Estos gases se componen principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), responsables mayoritarios del efecto invernadero. El biogás está constituido por una fracción de estos gases, los cuales son liberados a la atmósfera incluso en lugares que presentan captación de biogás. Es por eso, que un sistema de captación de biogás busca minimizar la liberación de CH_4 y aprovechar su poder calorífico como fuente de energía limpia y renovable [3].

La posibilidad del aprovechamiento del biogás ha fomentado acciones, alrededor del mundo, que buscan la resolución de dos factores que ejercen presión sobre los recursos naturales: la producción de energía y la disposición adecuada de los RSU. Estas variables ganan más relevancia en regiones semiáridas con escasas disponibilidades de recursos energéticos como es el caso de la región central Cearense donde se localiza la ciudad de Quixadá, en Brasil, y de la ciudad de Córdoba, Argentina. De esta forma el presente estudio busca realizar un estudio comparativo del potencial de producción de biogás proveniente de RSU de las dos ciudades y los beneficios energéticos asociados a esta producción.

2. METODOLOGIA

2.1. Áreas de Estudio

2.1.1. Córdoba, Argentina

La ciudad de Córdoba está geográficamente localizada en el centro de Argentina, más precisamente $64^\circ 11'$ de longitud oeste, $31^\circ 25'$ de latitud sur, a una altura sobre el nivel del mar de 400 metros aproximadamente. Su clima templado es moderado con cuatro estaciones distintas, con inviernos fríos y lluviosos, mientras que los veranos son húmedos, con días cálidos y noches relativamente frías, presentando una temperatura media de 18°C . La ciudad de acuerdo con la Ley Provincial 1295/1893, en conjunto con los decretos municipales

6548/38 y 7102/38 tiene una estructura municipal delimitada por un cuadrado de 24 km, con un área de 57.600 has de las cuales sólo 1.082 son actualmente espacios verdes y parques. Al presente tiene una población de aproximadamente 1.329.600 personas, de acuerdo con el último censo de 2010, siendo la segunda ciudad más poblada de Argentina.

2.1.2. Quixadá, Estado de Ceará, Brasil

Quixadá es una ciudad brasileña ubicada en la región Central Cearense, teniendo como coordenadas geográficas 39° 00' de longitud oeste, 4° 58' de latitud sur. Posee un clima tropical cálido, con características de semiárido, siendo las lluvias concentradas de enero a abril. La mayor parte del territorio se caracteriza por la geografía rica en inselbergs, también conocidos como monolitos, que influyen en el clima local. La ciudad tiene una economía basada en agricultura, industria y servicios, pero buena parte del PBI surge de los sectores de servicios y comercio. El municipio se extiende por 2.019,8 km² y cuenta con 84.995 habitantes de acuerdo con los datos del IPECE de 2016. La densidad demográfica es de 39,9 habitantes por km² en el territorio municipal.

2.1.3 Generación Anual de Residuos

Según los datos del Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento (SNIS), la producción anual de residuos sólidos urbanos puede estimarse a partir de la relación entre la cantidad de población y la producción de residuos per cápita. La Tabla 1 describe la estimación per cápita media de generación de residuos sólidos urbanos en 2016.

Faixa de população (habitantes)	Geração per capita de RSU(kg/hab./dia)
De 795 a 2.000	0,72
De 2.001 a 5.000	0,72
De 5.001 a 10.000	0,72
De 10.001 a 20.000	0,87
De 20.001 a 50.000	0,87
De 50.001 a 100.000	1,01
De 100.001 a 150.000	1,09
De 150.001 a 250.000	1,23
De 250.001 a 500.000	1,30
De 500.001 a 750.000	1,52
De 750.001 a 1.000.000	1,74
De 1.000.001 a 1.500.000	1,95

Tabla 1- Relación entre la población generadora de desechos y sus respectivas cantidades promedio de generación per capitas de residuos sólidos urbanos. Fuente [4].

Correlacionando los datos de la Tabla 1 con las respectivas poblaciones de las dos ciudades de estudio, se observó una tasa de producción per cápita es de 1,01 kg/hab./día para la ciudad de

Quixadá y de 1,95 kg/hab./día para la ciudad de Córdoba. Así fue posible estimar la tasa anual de residuos sólidos producidos en la ciudad de Quixadá en el orden de 31.300 toneladas por año y de 946.343 Tn de RSU por año.

2.2 Cálculo del Potencial de Producción de Biogás

Para la ejecución de la investigación se realizó una revisión bibliográfica de carácter cualitativa realizada por medio de sitios web, artículos científicos y libros que abordaran las características de los factores importantes para el cálculo del potencial de generación de metano a partir de RSU. De acuerdo con el estudio del IPCC (1996), es posible estimar los valores de producción de metano a través de la ecuación 1. Para el presente estudio se utilizó una herramienta con interfaz en Microsoft Excel titulada LandGEM. El procedimiento propuesto para estimar la producción de biogás fue la aplicación de un modelo teórico de estimación para la previsión del volumen de metano generado por un período de tiempo considerado, desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [5], siendo mundialmente validado y aceptado por la comunidad científica internacional hasta estos días. El modelo se basa en la estimación de la producción teniendo en cuenta la presencia de carbono orgánico biodegradable en los RSU.

$$COD = \sum (COD_i \times W_i) \quad (1)$$

Donde:

COD = Fracción de carbono orgánico degradable en la basura;

COD_i = Fracción de carbono orgánico degradable en el tipo de residuo i;

W_i = Fracción del tipo de residuo i por categoría de residuo.

Después del cálculo del COD, se calcula el potencial de generación de metano en el residuo (L₀), a través de la Ecuación 2:

$$L_0 = FMC \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

Donde:

L₀ = Potencial de generación de metano en residuo (Tn CH₄/Tn RSU);

FMC = Factor de corrección de metano = 0,8 (profundo >5m de basura);

COD = Valor obtenido por medio de los cálculos realizados en la Ecuación 1;

COD_f = Fracción altamente biodegradable en el residuo brasilero, $COD_f = 0,014T + 0,28$, donde T: temperatura (°C) en la zona anaeróbica de los residuos, estimada en 35°C suponiendo un enterramiento superior a 5 metros, método utilizado tanto en la ciudad de Quixadá como en ciudad de Córdoba. Asumiendo de esta forma un valor de 0,77.

F = Fracción de metano presente en el biogás. Si el relleno no tiene el valor real de la cantidad de metano presente en el biogás, se puede utilizar la estimación de 0,5, pues generalmente la cantidad de metano presente en el biogás de vertedero es 50%.

16/12 = relación de pesos moleculares de CH₄ y C, también llamada conversión de C a CH₄.

Así mismo, a partir de L_0 , la constante de decaimiento k y el flujo de residuo en el año, utilizando la Ecuación 3 derivada de modelo de decaimiento de primer orden [6] se puede calcular la cantidad de metano emitida por año del relleno sanitario.

$$E_{CH_4} = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(x-t)} \quad (3)$$

Donde:

E_{CH_4} = Emisión de Metano ($m^3 CH_4/año$);

k = Constante de decaimiento en $año^{-1}$ (valor obtenido a partir de la Tabla 3.3 del Módulo 5 – Residuos, de la Guía del IPCC, Volumen 3: Disposición de Residuos Sólidos [5], donde para papel: $k = 0,07$; para residuos orgánicos: $k = 0,17$ y para madera: $k = 0,035$. Por lo tanto, se llega a un valor medio de $k = 0,09$).

R_x = Flujo de residuos al año (Tn RSU/año);

x = Año actual;

t = Año de deposición del residuo en el relleno (inicio de operación).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

De esta forma, utilizando el comportamiento de producción de desechos de las dos ciudades asociadas a los modelos matemáticos propuestos, es posible observar un perfil de producción de biogás y luego establecer comparativos entre las dos ciudades y sus respectivos equivalentes en relación a otros tipos de combustibles.

3.1. Cálculo de Carbono Biodegradable

El cálculo del carbono biodegradable presente en los RSU de las dos ciudades fue obtenido de acuerdo con los datos de la Ecuación 1 asociados a la caracterización gravimétrica obtenida por Ceará (2015) y Córdoba (2014). Los valores de los pesos de cada tipo de residuos utilizan la metodología de cuarteamiento propuesta por IPCC (1996) y por la NBR 1007/2004 [7].

<i>Tipo de residuo</i>	<i>Quixadá</i>	<i>Córdoba</i>
A= papel, cartón	1,9	9,2
B+C=Alimentos y residuos orgánicos	55,9	47,2
D= madera	2	2,07

Tabla 2- Distribución gravimétrica de los desechos englobados por el cálculo de COD en porcentaje.

FUENTE Ceará (2015 [8]) - Córdoba (2014 – consulta telefónica a CRESE)

Así fue posible calcular un valor de producción de carbono orgánico sujeto a degradación (COD) para Quixadá de 0,093 kg de C/kg de RSU y en Córdoba un valor de COD de 0,110 kg de C/kg de RSU.

3.2 Cálculo del Potencial de Generación de Metano

De acuerdo a los valores obtenidos en 3.1 fue posible calcular la relación potencial de generación de metano presente en los desechos de las dos ciudades, calculadas a partir de la relación matemática de la Ecuación 2 donde obtuvimos los valores de L_0 de $39,96 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Tn RSU}$ para los residuos de la ciudad de Quixadá, y de $47,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Tn RSU}$ en la ciudad de Córdoba.

3.3 Cálculo de Emisión de Metano

Conforme a los valores obtenidos en 3.2 y con la relación matemática de la Ecuación 3, fue factible estimar la cantidad de metano que se puede generar en cada ciudad.

Tenemos para Quixadá:

$$E_{\text{CH}_4} = k \times R_X \times L_0 \times e^{-k(x-t)}$$

$$E_{\text{CH}_4} = \mathbf{18.616 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{año}}$$

Y para Córdoba:

$$E_{\text{CH}_4} = k \times R_X \times L_0 \times e^{-k(x-t)}$$

$$E_{\text{CH}_4} = \mathbf{665.703 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{año}}$$

3.4 Estimación comparativa entre la producción de biogás y otros combustibles fósiles

Al relacionar el potencial de producción energética del biogás (tomando como base un poder calorífico de 4500 a 5500 Kcal/m^3 , aunque puede ser mejorado a 9000 Kcal/m^3 quitando el CO_2) generado en los rellenos de las dos ciudades y su comparación con otras formas de combustibles, fue posible observar la cantidad de energía potencial almacenada en el primero. Por ejemplo, en comparación con la nafta, tienen un potencial de 11.782 litros por año en la ciudad cearense y de 421.331 litros en la ciudad argentina, posibilitando el aumento de la oferta de vehículos automotores menos contaminantes a bases de GNC en los territorios estudiados. Esto repercute en impactos directos en la mejora de la calidad del aire de las ciudades estudiadas [10]. Si lo comparamos con el gasoil, la cantidad producido en comparación se estima en el orden de 12.010 litros por año en Quixadá y de 429.486 litros en Córdoba, lo que podría contribuir significativamente a la viabilidad de la logística de recolección de los desechos de estos rellenos, con los usos en los camiones, máquinas para la compactación y el tratamiento de los residuos sólidos, cerrando un ciclo importante de sostenibilidad en el sector [10].

El eventual aumento en la oferta energética del biogás también podría contribuir a la preservación de áreas nativas en las inmediaciones de las ciudades estudiadas. En comparación con la leña, el relleno de Quixadá representa $40,469 \text{ Tn}$ de leña y en Córdoba 1.447 Tn de leña con 10% de humedad por año en Córdoba, siendo de extrema relevancia para la preservación de la fauna y flora de la región y contribuyendo a la formación de los llamados cinturones verdes en áreas cercanas a las ciudades estudiadas.

<i>Volumen de Biogás</i>	<i>Combustible</i>	<i>Comparación del potencial energético del relleno de Quixadá (por año)</i>	<i>Comparación del potencial energético del relleno de Córdoba (por año)</i>
1,58 m ³ a 2,22 m ³	1 litro de nafta	11.782 Litros	421.331 Litros
1,55 m ³ a 2,18 m ³	1 litro de gasoil	12.010 Litros	429.486 Litros
0,46 m ³ a 0,65 m ³	1 kg de leña con 10% de humedad	40,469Tn de leña	1.447,18 Tn de leña

Tabla 3- Valores comparativos entre el biogás y otros combustibles. Fuente [9].

Además, la posibilidad de la venta de los bonos de carbono a través de los proyectos aprobados por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que reciben los certificados de reducciones de emisiones que se comercializan entre 2 a 5 U\$\$ por tonelada de dióxido de carbono equivalente, elevan aún más la viabilidad económica de las plantas de relleno sanitario en las ciudades estudiadas [11]. Aunque actualmente la mayor comercialización se realiza como bonos voluntarios y no como MDL.

Así pues, considerando que el metano es alrededor de 21 veces más perjudicial al efecto invernadero que el dióxido de carbono, realizando la estequiometría de conversión llegaríamos a valores entre 0,83 y 1,04 Tn CO₂eq/Tn RSU. Al multiplicar este valor por la cantidad de los residuos producidos en las regiones estudiadas y considerando una venta de carbono de 20 U\$\$/TnCO₂eq, resultarían valores que podrían llegar hasta U\$\$ 387.216 por año para la ciudad de Quixadá y de U\$\$ 1.384.662 para la ciudad de Córdoba [11].

Este aumento de la oferta energética agregado al valor económico del biogás, genera recursos que pueden ser reinvertidos en mejora tecnológica y preservación ambiental lo que representa un factor estratégico para el logro de la sostenibilidad de los procesos inherentes a la urbanización capaz de iniciar un cambio histórico del perfil de las regiones estudiadas con reflejos positivos en la vida social, económica y medioambiental de las misma.

Es posible observar que la diferencia en el número de habitantes entre las dos ciudades, teniendo la ciudad argentina una población generadora del orden de 16 veces mayor que la ciudad cearense, no representa la misma diferencia en el potencial de generación de biogás para la producción de energía. Este se debe principalmente a diversos factores, como por ejemplo, la diferencia de hábitos de la población de Quixadá con una producción de residuos orgánicos, llegando a una generación 48% mayor que la ciudad argentina de Córdoba. A su vez, fue observado en la ciudad argentina, un perfil de generación mayor en productos orgánicos leves e moderadamente degradables como ser papel, cartón entre otros. Conforme afirman Stockmanns et al. (2017), esta diferencia en la producción de residuos orgánicos impacta directamente en el sustrato disponible en el enterramiento para la acción de las bacterias anaerobias acetogénicas e metanogénicas para la producción de bioenergía.

Se observa además que tanto la ciudad brasileira como la ciudad argentina tienen un potencial medio de producción de biogás semejante a otras regiones con similares sistemas de disposición como el enterramiento de Palmas, en Río Grande do Sul [12] con valores de potencial de producción de 30 a 120 m³/Tn residuos, coincidiendo además con los patrones de producción para residuos económicamente viables de la US-EPA [13] con valores de producción entre 25 e 125 m³/Tn de residuos.

4. CONCLUSIONES

A través de este estudio fue posible identificar los factores importantes que componen el potencial de producción de biogás existentes en las ciudades de Quixadá en la región central Cearense, Brasil y en la ciudad de Córdoba, Argentina, así como su utilización como combustible. A partir de los valores de biogás que podría producirse en cada ciudad, tomando como base el poder calorífico del biogás, fue posible correlacionar el potencial teórico de biogás con otras formas de obtención de energía en las dos ciudades, representando un volumen de aproximadamente 12.010 litros de gasoil para Quixadá y 429.486 litros para la ciudad de Córdoba, lo cual podría emplearse para mejorar de forma sustancial la logística de recolección en los municipios, proporcionando impactos ambientales y económicos significativos. Además, se observó que la eliminación de las emisiones de metano a la atmósfera en las regiones estudiadas posibilitaría la comercialización de créditos de carbono que podrían llegar a valores de hasta 387.216 U\$S/año para la ciudad de Quixadá y de 1.384.662 U\$S/año para la ciudad de Córdoba. Así se divisa que el aprovechamiento de biogás de los rellenos, una solución importante para el alcance de la sostenibilidad de los medios urbanos tanto en la ciudad de Quixadá, Brasil, como en la Ciudad de Córdoba, Argentina.

Se percibió un potencial significativo de beneficios ambientales con la preservación y conservación de recursos económicos, con incremento de renta y fuente de recursos financieros específicos que pueden contribuir para sustentar el sistema de rellenos y beneficios sociales con producción de energía de bajo costo y menor carga contaminante a las ciudades contribuyendo con papel protagónico en el logro del desarrollo sostenible en las dos ciudades estudiadas.

5. REFERENCIAS

- [1] R. A. Hinrichs y M. K. Kleinbach, *Energia e Meio Ambiente*, 3. Ed., São Paulo: Pioneira Thomson Learning, (2003).
- [2] P. G. Dallepiane et al., “Estudo para aproveitamento energético a través de resíduos sólidos urbanos no município de Ijuí/Rs.”, *Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa E Extensão*, Vol. 4, Nº. 1, (2017).
- [3] T. T. Araujo y E. Ritter, “Avaliação De Emissões De Biogás Em Camadas De Cobertura De Um Aterro Sanitário”, *Exatas & Engenharia*, Vol. 6, Nº 16, (2017).
- [4] SNIS, Sistema Nacional de informações sobre saneamento, Acesso em web en www.snis.gov.br, (2016).
- [5] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, “Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero”. Módulo 5: Desechos. Disponible en: . (2001).
- [6] SWANA, The Solid Waste Association of North America, “Comparison of Models for Predicting Landfill Methane Recovery Publication”, (1998).
- [7] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Amostragem de Resíduos Sólidos*. NBR 1007, Rio de Janeiro, (2004).
- [8] CEARA – COPAM, Conselho de Políticas Publicas para Meio Ambiente. *Plano Estadual*

- de Resíduos Sólidos*, Fortaleza, (2015).
- [9] Ministerio de Energía y Minería de la Nación Argentina, *Tabla de conversiones energéticas*, disponible en la web:
<http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3622>, acceso en (2017).
- [10] Cassendra Phun Chien Bong, et al., “*Review on the renewable energy and solid waste management policies towards biogas development in Malaysia*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, (2017).
- [11] I. V. O. Lopes, *Mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL): Guia de orientação*, Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, (2012).
- [12] T.C. Coelho et al., “*Estimativa de produção de Metano em Aterro Sanitário de Palmas – TO*”. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*. Vol. 7, Nº 12, (2011).
- [13] US-EPA - United States Environmental Protection Agency. *Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery – Business focus series*, prepared by United States Agency International Development, Office of Energy and Technology Center for environment, Bureau for Global Programs, Field Support and research, (1997).