

Reactor anaerobio de flujo ascendente en lotes secuenciales para determinar la generación de metano de los residuos orgánicos del CEAGESP

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8526>

M. J. Lucero ¹, R. C. Contrera ²

¹Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador, El Salvador

²Departamento de Hidráulica y ambiental, Universidad de São Paulo, Brasil

E-mail: mario.lucero@catolica.edu.sv

Resumen — Brasil genera 180.000 t/d de residuos sólidos, de los cuales el 51 % es materia orgánica, por lo tanto, el tratamiento de residuos sólidos es un punto importante de gestión con base en la Política Nacional de Residuos Sólidos del año 2010. El presente trabajo consiste en evaluar la tasa de generación de metano a partir de residuos orgánicos recolectados del CEAGESP, a través de un reactor anaerobio de flujo ascendente con recirculación de lixiviados. El tiempo de reacción fue de 14 d y la masa de desecho introducida en el reactor fue de 750 g. El volumen de lixiviado utilizado fue de 7.0 L. La temperatura se controló mediante una cámara de calentamiento a 30 ± 2 °C. La tasa de biogás obtenida en promedio fue de 0.52 m^3 biogás/kg SV y un porcentaje de metano del 77 %, obteniendo una tasa de metano de $0.36 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. La eliminación de SV fue de 82 % en promedio.

Palabras Clave – biogás, digestión anaerobia, residuos sólidos urbanos

Abstract — Brazil generates 180,000 t/d of solid waste, of which 51 % is organic matter, therefore, the treatment of solid waste is an important management point based on the National Solid Waste Policy of the year 2010. The present work consists of evaluating the rate of methane generation using organic residues collected from CEAGESP, through an anaerobic ascending flow reactor with leachate recirculated. The reaction time was of 14 d. and the mass of waste introduced into the reactor was of 750 g. The volume of leachate used was 7.0 L. The temperature was controlled by means of a heating chamber at 30 ± 2 °C. The biogas rate obtained on average was of 0.52 m^3 biogas/kg SV and a methane percentage of 77 %, obtaining a methane rate of $0.36 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. The elimination of SV was of 82 % on average.

Keywords — anaerobic digestion, biogas, municipal solid waste

I. INTRODUCCIÓN

El problema de los residuos sólidos (RS) es una tarea difícil en todo el mundo, ya que es uno de los principales problemas de saneamiento ambiental a escala mundial. Según estadísticas del Banco Mundial, la población urbana en el año 2005 era de 2.980 millones de personas en el mundo, con una generación de residuos aproximada de 3,532,252 t/d [1]. Otro factor importante que pone de manifiesto la problemática de los residuos sólidos en el mundo es la forma en que se disponen los residuos, hasta el 2012 predominaban los rellenos sanitarios y en los países de bajos y medianos ingresos los botaderos a cielo abierto [1]. En 2016 se estimó

que se generaban 2,010 millones de toneladas, de los cuales un 32.7 % se depositaba en rellenos sanitarios [2].

Brasil, en 2010, instituyó la Política Nacional de Residuos Sólidos, que tiene como objetivo establecer estrategias que ayudarían a resolver el problema de los residuos; a través de la Ley n° 12.305 de 2010 [3]. La cual establece directrices para la gestión integrada de los residuos considerando el desarrollo sostenible y las dimensiones política, económica, ambiental, cultural y social como elementos fundamentales de la gestión. La Ley está reglamentada en el Decreto 7704 de 2010 [4]; que establece normas para la ejecución de la Política Nacional de Residuos Sólidos.

Según el Plan Nacional de Residuos Sólidos, en 2008 Brasil tenía una población urbana de 159,961,545 habitantes generando 183,481 t/d de residuos resultando en una producción per cápita de 1.1 kg/hab.d. [5]. La composición gravimétrica fue la siguiente: 51,2 % materia orgánica, 34,5 % reciclables y 14,3 % residuos [6]. En 2022 la generación de residuos sólidos fue 224,141 Ton/d., para una población de 214,728,362 con una PPC de 1.04 Kg/hab. d. [7]

La ciudad de São Paulo presentaba en 2010 una población de 11,253,503 personas [5]; la generación total de Residuos Sólidos Urbanos, RSU en la ciudad de São Paulo en 2014 fue de 14,635.84 t/d [8]; y la composición gravimétrica de los RSU, según el Plan de Gestión Integrada de Residuos Sólidos de la ciudad de São Paulo, tiene 51,2 % materia orgánica, 34,5 % reciclables y 14,3 % residuos [6]. El CEAGESP en São Paulo generó en el 2022 48,505,89 Ton./año, siendo 6,800.77 Ton./año de material reciclable [9].

II. METODOLOGÍA

Inicialmente, los residuos eran recolectados en la Compañía de Entrepuestos y Almacenaje Generales de São Paulo, CEAGESP, ubicada en Vila Leopoldina, São Paulo; Dirección: av. Dr. Gastão Vidigal, 1946 - Vila Leopoldina, São Paulo - SP, 05316-900. Los residuos fueron recolectados en varios puntos dentro de CEAGESP de acuerdo a las sugerencias de sus empleados. Los cuales manifestaron que no contaban con estudios sobre la composición gravimétrica de los residuos, por lo que se decidió estimar una composición aproximada con la ayuda de funcionarios de la CEAGESP.

La composición de cada fracción fue la siguiente:

- Hojas: lechuga, col, cebollino, acelgas, hojas de maíz, hinojo.
- Verduras: cebolla, patata, okra, berenjena, rábano, pepino, calabacín, tomate, berenjena, pimiento morrón, judías verdes.
- Frutas: manzana, carambola, sandía, aguacate, mandarina, maracuyá, melón, anona, mango, naranja, piña, durazno y papaya.

Después de separar las fracciones, cada una fue triturada y pesada por separado, utilizando una picadora de forraje - GP-1500AB. Cada muestra se pesó utilizando una balanza de laboratorio no analítica, pero con suficiente precisión. El número total de muestras fue de 35 con un peso de 750 g cada una, definidas por 150 g de hojas, 300 g de vegetales y 300 g de frutos. Las 35 muestras se elaboraron para diversas etapas de la investigación. Después de la composición, cada muestra se colocó en un recipiente de plástico de 1 L, luego se numeró y congeló. Al momento de utilizar cada muestra, se descongeló con 24 h de antelación en un recipiente hermético para no perder los líquidos que se puedan formar durante la descongelación. Las características del residuo inicial se muestran en la tabla 1. Se analizaron 5 muestras del residuo para su caracterización de la cuáles se obtuvo que la relación SV/ST en promedio fue del 90 %.

Tabla 1. Características de residuo crudo recolectados en el CEAGESP

Muestra	Masa (g)	Agua (g)	ST (g)	SV (g)	SF (g)	SV/ST (g/g)	SV/Muestra (g/g)
1	50.28	45.02	5.25	4.76	0.49	0.90	0.0948
2	50.23	44.91	5.31	4.79	0.51	0.90	0.0955
3	50.53	45.20	5.32	4.82	0.50	0.90	0.0954
4	50.22	44.93	5.28	4.77	0.51	0.90	0.0951
5	50.60	44.50	5.55	5.07	0.48	0.91	0.1014
Media	50.26	44.91	5.34	4.84	0.50	0.90	0.0964
DP	0.11	0.17	0.08	0.09	0.01	0.002	0.0020
Composición	100 %	89.4 %	10.6 %	9.6 %	1.0 %		

El inóculo utilizado en el filtro anaeróbico fue recolectado en el fondo de una laguna de lixiviados anaeróbicos en el relleno sanitario São Carlos-SP, actualmente (2016) desactivado. El inóculo fue tamizado y posteriormente activado utilizando etanol a una temperatura de 30 ± 2 °C. El lixiviado utilizado en el experimento procedía del relleno sanitario operado por Estre Ambiental en la ciudad de Paulina en São Paulo. El lixiviado fue recolectado por la propia Estre y entregado al laboratorio de saneamiento de la USP.

Tabla 2. Puntos de muestreo del reactor

Tipo de muestra	Puntos de muestreo														
Día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Líquida	X	X	X	X	X		X			X			X	X	X
Gaseosa	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sólida	X														X

La configuración del reactor fue de flujo ascendente con una capacidad de lixiviado de 7.0 L, con recirculación del lixiviado por bombeo, lo que favoreció la hidrólisis de la materia orgánica. El líquido se introdujo por el fondo del reactor, el cual se muestra en la fig. 1.



Fig. 1. Reactor de flujo ascendente

Los principales parámetros de medición fueron los que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de seguimiento del experimento

Parámetros	Técnica Analítica	Unidad
pH	Directo, Potenciométrico	---
ST	Standard Methods, Gravimétrico	g
SV	Standard Methods, Gravimétrico	g
Biogás	Dispositivo <i>Marriote</i>	mL
Temperatura	Directa, Termómetro Digital	°C

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante los 4 lotes con Tiempo de Detención Hidráulica (TD) de 14 d fueron los siguientes: La fig. 2 muestra la generación acumulada de biogás de los 4 lotes, alcanzando una última generación de 37,655 ml en promedio.

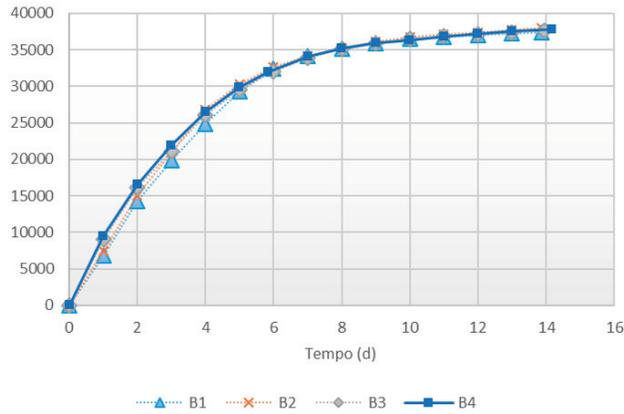


Fig. 2 Generación de biogás acumulada

La fig. 3 muestra la generación diaria de biogás, en la que se observa que el pico de generación se alcanzó el primer día. El máximo osciló entre 6,800 a 9250 ml, el segundo día se obtuvo una generación de 7,250 ml. Hasta llegar debajo de 500 ml en el día 14.

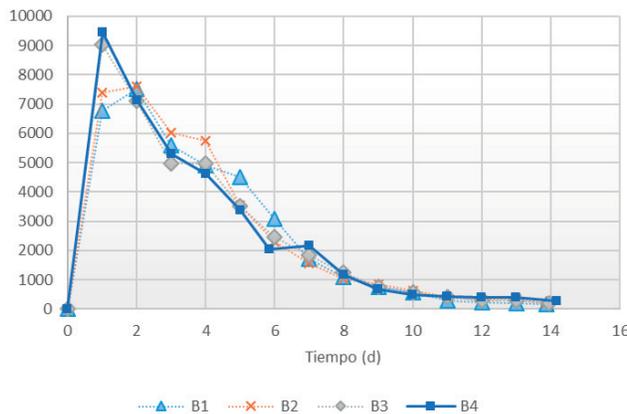


Fig. 3. Generación diaria de biogás

La composición del biogás, expresada como porcentaje de metano, se muestra en la fig. 4. El porcentaje de metano inició en el día 1 de 50 %, posteriormente, se fue incrementando hasta llegar a su valor máximo de 73 %, 82 %, 75 % y 78 % para B1, B2, B3 y B4 respectivamente. El promedio general fue de 77 %.

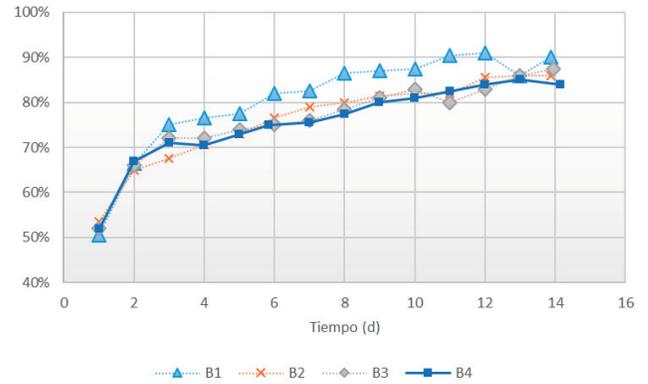


Fig. 4. Porcentaje de metano en el biogás

El pH durante los lotes mostró el comportamiento que se muestra en la fi. 5. En el día de inicio del experimento el pH del reactor osciló entre 7.7 y 8.0; el mínimo se registró en el día 1 con valores entre 7.1 y 7.2. luego incrementó gradualmente hasta llegar a valores entre 7.8 y 8.1. Wang plantea que el pH óptimo para que el proceso sea eficiente este entre 6.8 y 7.2, aunque el proceso puede darse en el rango de 5.5 a 8.5 [10]. Ya que se utilizan microorganismos de una laguna de lixiviado estos se encuentran adaptados a pH entorno de 8.

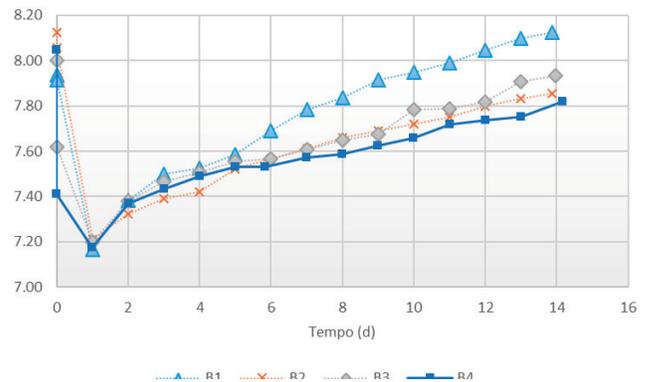


Fig. 5 pH

Las tasas de generación sobre los lotes se muestran en la fig. 6.

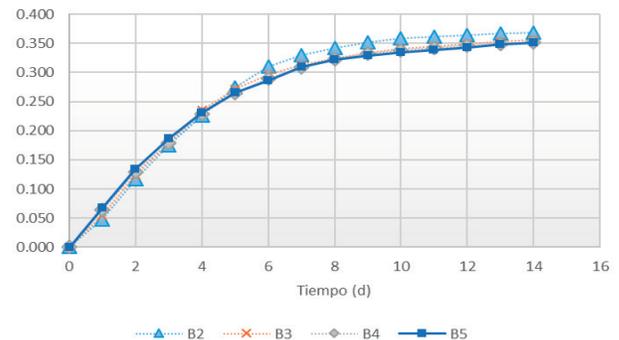


Fig. 6. Tasa de generación de biogás

La tendencia de la temperatura interna del reactor se muestra en la fig. 7. Esta osciló entre los 28 y 30 °C, con la excepción de algunos días para la repetición B1 los días 2 y 3 estuvo arriba de 30 y 32 °C respectivamente; posteriormente se mantuvo en el rango de 28 ± 2 °C.

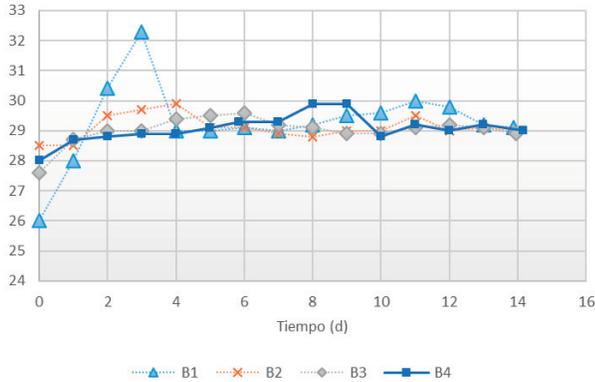


Fig. 7. Comportamiento de temperatura interna del reactor

La tabla 4 presenta las tasas de generación de biogás y gas metano, resumiendo los resultados obtenidos de la investigación.

Tabla 4. Tasas de generación de biogás y gas metano

Corri da	Volumen		SV _{inicial} [g]	SV _{final} [g]	% Eli m. [d]	T D [d]	Tasa de Generación		% Meta no
	Biogás [mL]	CH ₄ [mL]					Biogás [m ³ biogás s/ Kg SV]	Meta no [m ³ CH ₄ / Kg SV]	
B1	3737 5	266 73	72.33 01	12.41 02	82. 8 %	1 4	0.52	0.37	71 %
B2	3796 0	257 05	72.33 01	11.65 54	83. 9 %	1 4	0.52	0.36	68 %
B3	3763 0	254 27	72.33 01	10.55 69	85. 4 %	1 4	0.52	0.35	68 %
B4	3785 5	253 91	72.33 01			1 4			67 %
Mé di a	3770 5	257 99		11.54 08	84. 0 %		0.52	0.36	69 %
DP	203	437		0.492 0	0.0 07		0.003	0.005	1 %

IV. DISCUSIÓN

La tasa de generación promedio utilizando residuos de CEAGESP fue de 0.52 m³ de biogás/Kg SV con 77 % de metano; la generación de gas metano fue de 0.36 m³ CH₄/ Kg SV con TD de 14 d. Nazir et al [11] reportan generaciones de metano para FORSU de 0.15 a 0.43 m³/kg SV y para residuos vegetales (frutas, hortalizas, entre otros) una generación de 0.32 m³/kg SV. Gunaseelan [12] presenta tasas de generación con residuos de planta de 0.03 a 0.51 m³/kg SV con diferentes

tipos de reactores. La eliminación de SV en las repeticiones con residuo de CEAGESP fue del 84 % en promedio.

V. CONCLUSIONES

Los resultados presentados para la configuración inicial del reactor arrojan resultados favorables en comparación de las eficiencias de generación de biogás y eliminación de sólidos, obteniendo una tasa promedio de 0.52 m³ de biogás/kg SV y 0.36 m³ de CH₄/kg SV de gas metano.

REFERENCIAS

- Goulette, S. (2000). What a waste. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 139(3), 167–169. <https://doi.org/10.1680/muen.2000.139.3.167>.
- Kaza, Silpa, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Woerden, V. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In *The world bank* (Issue December). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
- Presidencia de la República de Brasil. (2012). Ministério do Meio Ambiente, Lei 12.505/10 de 02 de Agosto Política Nacional de Direcionamento Resíduos Sólidos (PNDRS) 2ª Edição.
- Presidencia de la República de Brasil. (2022). DECRETO No 10.936, DE 12 DE JANEIRO DE 2022. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91.
- Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística. Informaciones estadísticas São Paulo. <http://cod.ibge.gov.br/493>.
- Ayuntamiento de Sao Paulo. (2014). Plano De Gestión Integrado De los Residuos Sólidos de la Ciudad de Sao Paulo. <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>.
- ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública). (2022). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022*. <https://abrelpe.org.br/panorama/>.
- Ministerio de las Ciudades. (2016) Diagnostico do Manejo de Residuos Sólidos Urbanos - 2014. Brasília, 2016. <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2014>.
- CEAGESP. (2022). *Relatório de Gestão 2022*. https://ceagesp1-my.sharepoint.com/personal/servicos_portal_ceagesp_gov_br/_layouts/15/onedrive.aspx?ga=1&id=%2Fpersonal%2Fservicos_portal_ceagesp_gov_br%2FDocuments%2FTransparência Ativa %2FAuditorias %2FRelatório de Gestão %2FRelatorio_Gestão_2022.pdf&parent=%2Fpersonal%2Fservicos_portal_ceagesp_gov_br%2FDocuments%2FTransparência Ativa %2FAuditorias %2FRelatório de Gestão.
- Wang, Z., Hu, Y., Wang, S., Wu, G., & Zhan, X. (2023). A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176(August 2022), 113208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113208>.
- Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., & Omar, R. (2012). Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: A review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 95(2), 321–329. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4152-7>
- Gunaseelan, V. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy*, 13(1–2), 83–114. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00020-2)