

# Análisis de compuestos lignocelulósicos como opción para evaluar la biodegradabilidad de la fracción orgánica en residuos sólidos confinados en México

Otoniel Buenrostro-Delgado<sup>1,4</sup>✉, Iván Yassmany Hernández-Paniagua<sup>2</sup>, Ma. del Consuelo Hernández-Berriel<sup>3</sup>, José Alfredo Nila-Cuevas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. San Juanito Itzicuaró S/N, Col. San Juanito Itzicuaró, C.P. 58302, Morelia, Michoacán. Tel/Fax +52 (443) 334 0475 ext. 115.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. Av. Eugenio Garza Sada 2501, C.P. 64849, Monterrey, Nuevo León, México. Tel. +52 (81) 83 58 2000 ext. 5290.

<sup>3</sup> Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca. Av. Tecnológico s/n, Frac. Ex-Rancho la Virgen, C.P. 52149, Metepec, Estado de México. Tel. (52) (722) 208 72 00 ext. 3630.

<sup>4</sup> Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos AC (SOMERS). Av. Cuauhtémoc 403-T6201, Col. Roma Norte, C.P. 06700, México D.F., México.

## Resumen

En México, la fracción orgánica (FORSU) continúa siendo predominante en la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU), por lo que su estabilización tiene gran relevancia tanto para una gestión adecuada de estos como en generación de biogás y costos de disposición final. El objetivo de este trabajo fue determinar la biodegradabilidad de la fracción orgánica (FORSU) mediante la cuantificación del contenido de compuestos lignocelulósicos de los RSU y la evaluación de las condiciones de confinamiento en el tiradero clausurado de Morelia. Se tomaron muestras de cuatro kg de RSU en 16 pozos distribuidos de forma representativa en el sitio de confinamiento. Se realizaron análisis físicos y químicos a las muestras colectadas: caracterización de subproductos, temperatura, pH, humedad, cenizas, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), y los contenidos de lignina (LI) y holocelulosa (CE+HE) mediante métodos estandarizados. Se utilizó estadística descriptiva para obtener la composición promedio de las muestras. Las correlaciones del estado de degradación (SV) con la biodegradabilidad (LI y CE+HE) y contenido de humedad se obtuvieron mediante análisis de regresión lineal múltiple (RLM). Se determinó que en promedio el 78% de la FORSU confinada es de origen vegetal. La temperatura en la mitad de los pozos muestreados estuvo por debajo del rango mesofílico (30 °C); el pH en un rango de 8.0-8.4 y la humedad varió de 21% a 48%. Los ST y SV oscilaron entre 52-78% y 21-87%, respectivamente. Las concentraciones de LI y CE+HE fueron de 4-20% y 29-53%. Los resultados de los análisis de RLM de SV vs L y CE+HE y de la humedad con LI y CE+HE indicaron valores de  $R^2 = 0.1326$  (gl 2; F 0.99) y  $R^2 = 0.1261$  (gl 2; F 0.93), respectivamente. El coeficiente de correlación de Pearson usado para determinar la relación de la humedad con el estado de degradación mostró un valor de  $R^2 = 0.1261$  (gl 2; F 0.92).

Lo anterior indica una gran heterogeneidad en la composición de los RSU confinados en el sitio de estudio y una baja biodegradabilidad, además de una degradación diferenciada de la FORSU como resultado de las condiciones inadecuadas de confinamiento.

**Palabras clave:** confinamiento, degradación, lignocelulósico, residuos sólidos municipales.

✉ Otoniel Buenrostro Delgado, otonielb@umich.mx

Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. San Juanito Itzicuaró S/N, Col. San Juanito Itzicuaró, C.P.58302, Morelia, Michoacán. Tel/Fax (443) 3.34.04.75 ext. 115

## Analysis of lignocellulosic compounds as an option for the biodegradability evaluation of the organic fraction of solid waste confined in Mexico

### Abstract

In Mexico, the organic fraction (OF) currently remains as the predominant component of urban solid waste (USW) in Mexico. OF stabilisation is highly relevant, particularly for costs management and final disposition of USW and biogas generation. This study aimed to determine the OF biodegradability of USW confined in the closed dump site of Morelia, Mexico.

16 samples of USW were collected in representative sites at the dump. USW composition, temperature, pH, moisture, total solids (TS) and volatile solids (VS) were evaluated to characterise physico-chemically the samples. Additionally, lignin (LI) and holocellulose (CE+HE) concentration were measured using standard methods. The USW average composition was estimated using descriptive statistics. Multiple linear regressions (MLR) were used to determine the relationship between degradation (VS) and biodegradability (LI and CE+HE), and moisture (L and CE + HE). Results showed that 78% of the confined OF derived from vegetable waste; while the temperature was below mesophilic conditions (30 °C) at the half of sampling wells. pH ranged between 8-8.4 and moisture from 21% to 48%. TS and VS varied between 52-78% and 21-87%, respectively. LI concentration was between 4% and 20% and CE+HE between 29% and 53%. The results of the analysis of MLR of VS vs LI + HE and CE and moisture vs CE and HE+ LI indicated values of  $R^2 = 0.1326$  (df 2; F 0.99) and  $R^2 = 0.1261$  (df 2; F 0.93) respectively. The Pearson correlation coefficient used to determine the relative humidity with the state of degradation showed a value of  $R^2 = 0.1261$  (df 2; F 0.92). These results indicate huge heterogeneity in the confined USW composition, and different degradation stages of the OF due to the non-optimal confinement conditions.

**Key words:** Confinement, degradation, lignocellulosic, municipal solid waste.

## Introducción

La gestión adecuada de los residuos sólidos es uno de los problemas más apremiantes al que se enfrentan los países en vías de desarrollo, los cuales en su mayoría continúan depositando los RSU en tiraderos no controlados (Chakraborty *et al.*, 2011). En México, la FORSU es predominante en la composición de los RSU (52%). Particularmente, la FORSU representa el 78% del total de los RSU confinados en el tiradero

clausurado de Morelia, Michoacán, y proviene mayoritariamente de residuos de comida, jardín, papel, cartón y madera. Estos contienen carbohidratos y polímeros aromáticos de origen vegetal, con una alta proporción de compuestos lignocelulósicos; celulosa (CE), hemicelulosa (HE) y lignina (LI), los cuales determinan la biodegradabilidad de los RSU. Por ser polímeros recalcitrantes, inciden en el tiempo requerido para la biodegradación de la FORSU y por ende en el tiempo de estabilización de los sitios de confinamiento y en la generación de biogás (González *et al.*, 2011). La óptima biodegradación de la FORSU es relevante, particularmente en aspectos de costos de operación de los sitios de confinamiento y también en la generación de biogás.

Aunque las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el manejo de RSU, son considerablemente menores que las antropogénicas, tienen un potencial considerable para la generación de energía alternativa. Se estima que de la biodegradación de la FORSU se generan de 50 a 60 millones de toneladas de  $\text{CH}_4$  año<sup>-1</sup> (Dlugokencky *et al.*, 2011). A pesar de esto, son escasos los trabajos que han considerado la biodegradabilidad de los RSU. Más aún, a nuestro conocimiento no existe a la fecha un estudio que haya evaluado la degradación de compuestos lignocelulósicos confinados, ni tampoco el efecto de las condiciones de confinamiento (Tuomela *et al.*, 2000). La biodegradación de los compuestos lignocelulósicos es realizada por poblaciones bacterianas (Actinobacterias) y hongos; sin embargo, su degradación parcial a humus ocurre cuando otros compuestos de más fácil biodegradación han sido consumidos. Pérez *et al.* (2002), mencionan que los contenidos de sólidos volátiles (SV), CE y de la relación holocelulosa/lignina [(CE+HE)/LI] son indicadores apropiados de la biodegradabilidad de la FORSU confinados en un relleno sanitario. De acuerdo a Godley *et al.* (2003) los análisis de LI y (CE+HE) proporcionan resultados más confiables para este tipo de residuos, ya que la mayor parte de la materia orgánica en éstos es de origen vegetal y tienen mayor contenido de estas macromoléculas que son recalcitrantes a los procesos de degradación anaerobia.

La FORSU confinados en el tiradero clausurado de Morelia, tiene diferentes estados de degradación, determinados básicamente por el tiempo de confinamiento y la composición de la materia orgánica. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la biodegradabilidad de la FORSU mediante la cuantificación del contenido de compuestos lignocelulósicos en RSU confinados. Para lo cual, **i)** Se realizó la caracterización fisicoquímica de las muestras de RSU, **ii)** se calculó la concentración de compuestos lignocelulósicos, LI por determinación de la fracción combustible a 500 °C y de CE+HE mediante hidrólisis ácida en los azúcares hidrolizados.

## Materiales y métodos

### Muestreo de los RSU

En el tiradero clausurado de Morelia, se definieron mediante un diseño de muestreo sistemático y estratificado 16 puntos de muestreo a una profundidad de tres metros,

y se tomaron muestras en los meses de la época seca. Se colectaron cuatro kilos de RSU y se colocaron en bolsas de polietileno color negro previamente etiquetadas, las cuales se transportaron y congelaron (-4°C) para los análisis físicos y químicos posteriores.

### Caracterización de las muestras de RSU

Las muestras se descongelaron dejándolas a temperatura ambiente, y posteriormente se realizó la selección y cuantificación de subproductos con base en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-022-1985 (SECOFI, 1985).

Para determinar los compuestos lignocelulósicos en la FORSU, las muestras se molieron en un molino de cuchillas (Kika Werke) y se tamizaron para obtener una muestra más fina. Posteriormente se realizó la preparación de los RSU libre de extractivos mediante el método ASTM D1105-56 (ASTM, 1979). La determinación de CE+HE en las muestras de la FORSU se realizó de acuerdo con el método desarrollado por Wise *et al.* (1946) y la determinación de LI se realizó de acuerdo a la metodología de Colín *et al.* (2007). Con la finalidad de tener confiabilidad en los resultados obtenidos, los análisis se realizaron por duplicado.

### Análisis estadísticos

Los resultados de los análisis de laboratorio, se procesaron mediante estadística descriptiva para obtener la composición promedio de las muestras de RSU. Se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple (RLM) para determinar la relación del estado de degradación (SV) con la biodegradabilidad (LI y CE+HE) y de la humedad con la (LI y CE+HE). Los valores del coeficiente de correlación de Pearson se usaron para determinar la relación de la humedad con el estado de degradación.

### Resultados

Durante el proceso de caracterización de los RSU se identificaron 12 subproductos mayoritarios, mientras otros subproductos se encontraron en menor cantidad o no fueron identificables. Estos se agruparon en el rubro de "otros" y se muestran en la **tabla 1**. La FORSU en los 16 pozos muestreados osciló entre 48% y 85%, con un promedio de 83%, de la cual la de origen vegetal (residuos alimenticios y de jardinería) fue de 78%.

La **tabla 2** muestra los parámetros fisicoquímicos analizados en las muestras de RSU de los 16 pozos del sitio de estudio. Las temperaturas de los RSU en la mitad de los pozos muestreados estuvieron debajo del rango mesofílico (30 °C), los valores de pH se encontraron en un rango predominantemente básico (8.0 a 8.4), con excepción de los pozos 12 y 15, mientras que los valores de humedad variaron entre 21% y 48%. Los ST se encontraron en un rango del 52% al 78% en todos los pozos muestreados, los contenidos de LI y (CE+HE) en las muestras analizadas oscilaron del 11% al 38% y del 38 al 53%, respectivamente.

Los resultados de los análisis de RLM de SV vs L y CE+HE y de la humedad con LI y CE+HE indicaron valores de  $R^2 = 0.1326$  (gl 2; F 0.99) y  $R^2 = 0.1261$  (gl 2; F 0.93),

**Tabla 1. Composición promedio en las muestras de RSU en el sitio de estudio (% peso fresco).**

Subproductos	% peso fresco
Residuos orgánicos	54.42
Cartón	3.98
Madera	0.96
Papel	1.14
Pañal desechable	3.79
Plástico en película	7.42
Vidrio	2.83
Piedras	11.35
Material ferroso	1.97
Plástico rígido	4.45
Loza y cerámica	1.10
Trapo	2.05
Otros	4.53
TOTAL	100

**Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de los residuos sólidos en el sitio de estudio (%).**

Pozo	Temperatura (°C)	pH	ST	SV	LI	(CE+HE)
1	29.8	8.4	68.6 ± 7.5	76.96 ± 1.45	4.78 ± 0.10	51.56 ± 1.24
2	28.1	9.1	61.3 ± 1.7	21.20 ± 1.28	7.47 ± 5.84	53.31 ± 0.68
3	26.5	9.1	64.1 ± 2.7	66.26 ± 1.96	9.52 ± 0.84	37.67 ± 0.74
4	28.5	9.0	52 ± 5	79.75 ± 0.87	19.84 ± 1.61	40.93 ± 0.55
5	27.2	8.3	57.9 ± 7.9	82.38 ± 0.58	9.63 ± 6.22	29.52 ± 0.85
6	24.4	8.3	62.4 ± 2.5	74.82 ± 2.82	8.42 ± 0.55	52.08 ± 1.42
7	33.4	8.2	68.3 ± 6.9	77.50 ± 0.48	13.9 ± 1.30	46.03 ± 0.3
8	41.8	8.7	73 ± 6.3	82.43 ± 1.65	4.17 ± 0.71	51.63 ± 0.6
9	41.9	8.5	67.7 ± 4.5	78.58 ± 0.12	23.10 ± 3.33	39.23 ± 0.4
10	35.3	7.8	66.7 ± 5	77.89 ± 0.92	11.22 ± 0.57	43.45 ± 1.2
11	26.2	8.7	69.9 ± 5.5	80.77 ± 0.57	19.31 ± 1.30	39.91 ± 0.5
12	44.0	7.0	68.5 ± 0.3	83.89 ± 0.23	26.77 ± 2.06	44.21 ± 0.73
13	40.4	9.1	64.5 ± 0.4	82.93 ± 0.79	14.61 ± 0.92	48.83 ± 0.94
14	35.5	8.8	58.5 ± 3.9	79.72 ± 0.77	20.45 ± 0.75	41.93 ± 0.61
15	34.3	6.1	68.8 ± 1.4	78.93 ± 1.51	14.21 ± 1.60	38.09 ± 1.5
16	27.5	7.1	78.2 ± 1.7	84.71 ± 1.09	9.44 ± 0.48	50.25 ± 0.47

respectivamente. El coeficiente de correlación de Pearson usado para determinar la relación de la humedad con el estado de degradación mostró un valor de  $R^2 = 0.1261$  (gl 2; F 0.92).

## Discusión

Los valores de los humedad encontrados en los pozos de muestreo (con excepción de dos) se encuentran por abajo del óptimo para que se efectuó una degradación eficiente de la FORSU. Reinhart *et al.* (2002) reportaron que se requieren contenidos de humedad del 65% al 70% para una degradación eficiente de la FORSU. Estos contenidos de humedad pueden estar influidos por la temporada húmeda en la que se tomaron las muestras, por lo que se sugiere ampliar el muestreo tanto en temporada de estiaje como de lluvias para corroborar el efecto de las lluvias en los contenidos de humedad de las muestras de RSU.

En esta investigación, los valores de pH predominantemente básicos y los bajos contenidos de humedad en los residuos analizados, sugieren bajas velocidades de degradación de la FORSU, a pesar que de acuerdo a los análisis de composición un elevado porcentaje es de fácil degradación. Angelidaki and Sanders (2004) reportaron que valores de pH entre 7 y 8, el metabolismo de los consorcios microbianos se inhibe y por ende, hay una disminución en la velocidad de degradación de la FORSU. Es de resaltar que sólo en uno de los 16 sitios muestreados, los SV se encuentran por debajo del 50%, lo cual indica poca degradación, y que el tiempo de confinamiento de los RSU parece no influenciarla.

Lo anterior queda de manifiesto si se considera que en el sitio se encuentran cuatro zonas con antigüedad diferente de vertido, que oscila de los cinco a los diecinueve años, y a pesar de ello no se detectaron diferencias en los valores promedio de cada zona.

De acuerdo con Chiemchaisri *et al.* (2007), la composición predominante de la FORSU en países en vías de desarrollo proviene de residuos de comida y jardín. La composición de la FORSU del tiradero clausurado estudiado proviene mayoritariamente de residuos de comida y jardín. Sin embargo, los contenidos promedio encontrados de CE+HE (13.6%) y de LI (44.3%) en esta investigación, muestran que la CE+HE concuerda con valores reportados para los mismos tipos de RSU en países en vías de desarrollo. Por el contrario, el contenido de LI se asemeja a lo encontrado en países desarrollados en los que la FORSU es predominantemente de residuos de madera (cartón, papel). Lo anterior se corrobora con lo reportado por Barlaz (2006), quien encontró contenidos de HE de 42% y de LI de 41% en residuos de madera en RESA de Estados Unidos de Norteamérica. Tales contenidos de HE y LI fueron reportados para residuos específicos como cartón, madera y papel. Los resultados encontrados aquí investigación mostraron concentraciones de compuestos lignocelulósicos similares a los reportados para países desarrollados.

El origen de los RSU determinados en este estudio ubica a estos con una biodegradabilidad alta, ya que la mayor parte de estos residuos son de cocina y jardín. Sin embargo, el contenido de compuestos lignocelulósicos en la FORSU los ubica con una biodegradabilidad baja. Lo

anterior fue corroborado con los resultados de los análisis estadísticos, en los que las variables analizadas indicaron que no hay relación entre ellas. Por esto se puede decir, que el confinamiento de los RSU no promueve un adecuado desarrollo de las condiciones fisicoquímicas para una óptima degradación en los residuos confinados. En particular, la humedad cuya variación durante las estaciones del año es crítica y por ende, no favorece el establecimiento de los consorcios microbianos que degradan los compuestos lignocelulósicos de la FORSU de los RSU confinados en el sitio de estudio.

## Conclusiones

Los resultados de los análisis de SV en este estudio, mostraron un alto contenido de materia orgánica sin degradar. Lo anterior aunado a los contenidos de HE+CE y LI, que determinan una biodegradabilidad baja, y la alta variabilidad de la humedad a lo largo del año, propician una biodegradación baja de los RSU confinados en el sitio de estudio.

Los RSU confinados presentaron diferentes grados de degradación y aún no se han estabilizado en su totalidad. Esto es debido a las altas concentraciones de compuestos lignocelulósicos en los RSU confinados, aunado a la variabilidad en el contenido de humedad a lo largo del año que no favorecen el establecimiento de consorcios microbianos que realicen su degradación.

Los contenidos de CE y LI encontrados en combinación con las condiciones fisicoquímicas inadecuadas dentro de la matriz de los RSU, sugieren que si no se incrementa el contenido de humedad, se requerirá de un tiempo prolongado para la estabilización del sitio.

## Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a través de la Convocatoria 2011, con número de proyecto 5.9.

## Referencias

- Angelidaki I, Sanders W** (2004) Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environment Science and Bio/Technology* 3: 117-129.
- ASTM [American Society for Testing Materials]** (1979) *Annual book of ASTM standards, Part 22: Wood, Adhesives*. Philadelphia: ASTM (American Society for Testing and Materials), United States of America.
- Barlaz MA** (2006) Forest products decomposition in municipal solid waste landfills. *Waste Management* 26(4): 321-333.
- Colín-Urieta S, García-Calderon MA, López-Albarrán P, Rutiaga-Quñonez JG** (2007) *Análisis preliminar de la composición química de la madera de Cordia eleagnoides DC*. 4to. Congreso Forestal, IV Simposio Internacional sobre técnicas agroforestales, III Congreso Internacional de Jóvenes Investigadores DEFORS 2007 y I Taller sobre Silvicultura Urbana Periurbana. 7 al 11 abril 2011. La Habana, Cuba. 223 p.

**Chakraborty M, Sharma Ch, Pandey J, Singh N, Gupta PK** (2011) Methane emission estimation from landfills in Delhi: A comparative assessment of different methodologies. *Atmospheric Environment* 45: 7135-7142.

**Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, Kumar S, Hettiaratchi J** (2007) Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill. *Environmental Monitoring Assessment* 135: 41-48.

**Dlugokencky EJ, Nisbet EG, Fisher R, Lowry D** (2011) Global atmospheric methane: Budget, changes and dangers. *Philosophical transactions of the Royal society* 369: 2058-2072.

**Godley AR, Lewin K, Graham A, Smith R** (2003) *Environmental agency review of methods for determining organic waste biodegradability for landfill and municipal waste diversion*. Proc. 8<sup>th</sup> European Biosolids and Organic Residuals Conference, Wakefield, UK, 23-26 Nov. vol. 2.

**González C, Buenrostro O, Márquez L, Hernández C, Moreno E, Robles F** (2011) Effect of Solid Wastes Composition and Confinement Time on Methane Production in a Dump. *Journal of Environmental Protection* 2: 1310-1316.

**Kelly RJ, Shearer BD, Kim J, Goldsmith CD, Hater GR, Novak JT** (2006) Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability. *Waste management and Research* 26: 1349-1356.

**Pérez S, Muñoz T, Martínez J** (2002) Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: An overview. *Int. Microbiol.* 5: 53-63.

**Reinhart DR, McCreanor PT, Townsend TG** (2002) The bioreactor landfill: Its status and future. *Waste Manage Res.* 20: 172-186.

**SECOFI [Secretaría de Fomento Industrial]** (1985) *Norma Mexicana NMX-AA-022-1985*. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-selección y cuantificación de subproductos.

**Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, Itävara M** (2000) Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology* 72: 169-183.

**Wise LE, Murphy M, Dádico A** (1946) Clorite holocellulose, its fractionation and beating on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal* 122: 35-45.