

LA DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO A LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LOS MERCADOS MUNICIPALES

Otoniel BUENROSTRO¹, Silke CRAM², Gerardo BERNACHE³ y Gerardo BOCCO¹

¹Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia, Apartado Postal 27-3 (Xangari), Morelia 58089 Michoacán, México

²Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México

³CIESAS de Occidente, Avenida España 1359, Colonia Moderna, Guadalajara 44190 Jalisco, México

(Recibido marzo 1998, aceptado septiembre 1999)

Palabras clave: digestión anaerobia, residuos sólidos orgánicos, mercados municipales

RESUMEN

Los residuos sólidos generados en los mercados municipales y tianguis, por lo general se manejan y disponen mezclados con el resto de los residuos municipales, aumentando con ello el problema de contaminación ambiental, a pesar de que aquéllos son una fuente potencial rica en materia orgánica. Esta investigación se realizó con el objeto de experimentar la eficiencia de la digestión anaerobia para tratar los residuos orgánicos generados en estos sitios. Se efectuaron determinaciones físicas y químicas, cuyos resultados sugieren que este tipo de fermentación es eficiente para tratar estos residuos, por su alto contenido de humedad, el carácter ácido y la consistencia fibrosa del material. El proceso se evaluó a nivel de laboratorio en un digestor anaerobio de tipo hindú en el cual se determinó un tiempo de retención óptimo de 7 días para la digestión de la materia orgánica.

ABSTRACT

The generation of solid wastes in markets and tianguis is managed and disposed of with other municipal refuse, which has an impact on the environment. Although these organic wastes are a potential source of organic matter. This project was carried out to evaluate the efficiency of an anaerobic digestion as a treatment of the organic fraction generated in these sites. Physical and chemical analysis were carried out. The results indicate that anaerobic decomposition is a safe and efficient method for this kind of solid wastes, which are wet, acid and fibrous. The experimentation phase was carried out in laboratory with an indian digester. A seven day retention time was determined as the optimum for the process of matter digestion.

INTRODUCCIÓN

Usualmente los residuos sólidos son considerados negativos y periféricos a las actividades de sus generadores y no como una posible fuente de ingresos; por lo general se deshacen de ellos mediante su dispersión o ver-

timiento en tiraderos. La generación nacional de residuos sólidos municipales (RSM), se calcula en alrededor de 85,000 ton/día, de las cuales el 52 % es materia orgánica. Esta proporción ha venido decreciendo en los últimos años por la transformación socioeconómica y consecuente cambio en patrones de consumo del país

(SEDESOL/INE, 1994). Tal es el caso de los residuos sólidos generados en mercados y tianguis. Estos sitios son fuentes muy importantes de producción de residuos sólidos a nivel municipal y cuya problemática en México se ha agudizado por su manejo y disposición inadecuados.

En la actualidad, a pesar del cambio en los hábitos de consumo y de comercialización entre la población mexicana, los mercados y tianguis continúan ocupando un lugar predominante en la comercialización de bienes y por ende en la generación de residuos sólidos. Bernache (1995), reporta una contribución de 9 % de estas fuentes al total de RSM en la ciudad de Guadalajara (Jalisco).

En cuanto a sistemas de tratamiento y de disposición final de los residuos sólidos, la separación y la recuperación de subproductos, el composteo aeróbico y la incineración han sido hasta la fecha los sistemas de tratamiento de mayor aceptación a nivel mundial. Esto, no obstante el impacto ambiental ocasionado por la quema sin control de los residuos, o la baja eficiencia con la que se lleva a cabo la separación y la recuperación de subproductos, derivado de la deficiente organización y del desinterés público y privado por la preservación del ambiente y la optimización del uso de los recursos.

La pirólisis, la digestión anaerobia, la deshidratación y la producción de alimentos, están teniendo actualmente una mayor aceptación (Padilla y Guzmán 1995, Velasco *et al.* 1996). Ello se puede atribuir a la creciente demanda de materias primas y a mayor presión social por la preservación del ambiente. La oxidación, la hidrogenación y la compactación son alternativas de tratamiento que se encuentran en etapa experimental, por lo que aún no se cuenta con resultados definitivos que permitan ser empleados en los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos (Brinton y Droffner 1994).

El composteo es una técnica para la reincorporación de los residuos a los procesos naturales y productivos que por siglos ha sido utilizada en el mundo, principalmente en China e India (Arias 1978). Su implementación en México como proceso de tratamiento se ha visto reducida a la instalación de plantas en ciudades como el Distrito Federal, Toluca, Monterrey, Guadalajara y Oaxaca.

En el proceso de composteo, la transformación de los residuos ocurre principalmente a través de la acción de microorganismos, presentándose en dos etapas: una física (desintegración) y otra química (descomposición) (ENSIC, 1984). La descomposición de la materia orgánica puede ocurrir en presencia de oxígeno (aerobio) y en ausencia de éste (anaerobio) (Ruiz 1994).

En diversos estudios se citan promedios de materia orgánica de 50 a 60 % en los residuos para que sean susceptibles de aprovecharse por medio de un proceso de fermentación (Weber 1982, Rabbani *et al.* 1983). Goosmann (1978), menciona que el composteo es incosteable si la fracción orgánica es menor al 30 % del peso total y que los residuos que son más adecuados para el proceso de

composteo son los provenientes del jardín, cocina, papel y cartón (excepto madera). De acuerdo con Harrison (1994), el rango óptimo de materia orgánica es de 40 a 60 %, remarca que a pesar de las múltiples ventajas del composteo como técnica eficiente para optimizar la conservación de los recursos, aún se practica en forma muy limitada.

En cuanto a la elección de un proceso de fermentación en el que predomine la producción de composta, una característica importante que deberán tener los residuos es que sean predominantemente de origen vegetal. Los residuos sólidos orgánicos de este tipo que se generan en los mercados municipales tienen proporciones de hasta 85 % (Buenrostro *et al.* 1999).

Las características físicas y químicas de los residuos sólidos orgánicos son de trascendental importancia para la correcta selección del tipo de proceso de fermentación. Los desechos sólidos orgánicos generados en los mercados tienen contenidos de humedad alrededor del 86 %, así como un pH predominantemente ácido. Estas dos características sugieren que la digestión anaerobia es el proceso de fermentación más idóneo.

El objetivo de esta investigación fue experimentar la eficiencia de la digestión anaerobia para tratar los residuos orgánicos que se generan en los mercados municipales de la ciudad de Morelia, Michoacán. Para tal fin fue necesario llevar a cabo un análisis de generación en estos sitios, así como determinar ciertas características físicas y químicas de los residuos orgánicos para evaluar su viabilidad para el proceso anaerobio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de residuos orgánicos para efectuar los análisis físicos y químicos se obtuvieron del análisis de generación en los 6 mercados establecidos en la ciudad de Morelia. Los mercados Revolución y Nicolás Bravo se localizan en el primer cuadro de la ciudad (zona centro), mientras que los mercados Vasco de Quiroga, Independencia y Benito Juárez se encuentran en el segundo cuadro. El mercado de Abastos, de reciente construcción (finales de la década de los 80), se ubica en la periferia (noreste de la ciudad).

La caracterización y la cuantificación de subproductos se efectúa durante una semana continua en los 6 mercados establecidos en la ciudad (Buenrostro *et al.* 1999). Los pasos metodológicos se describen en la **figura 1** y se examinan a continuación.

Análisis físicos y químicos en los residuos sólidos orgánicos

La preparación de las muestras en el laboratorio para su análisis se realizó de acuerdo con la norma NOM-

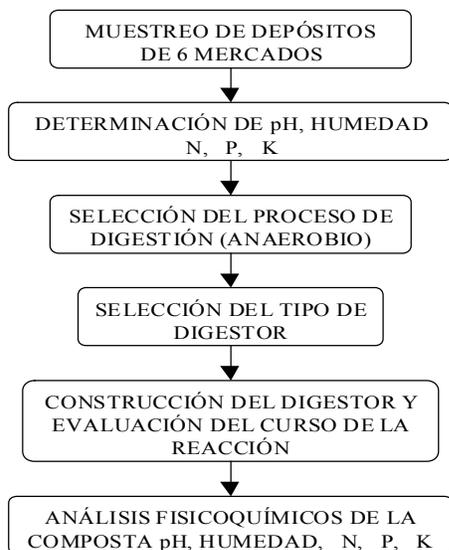


Fig. 1. Flujograma sobre el proceso de composteo mediante digestión anaerobia

AA-52-1985. Se efectuaron determinaciones de humedad, pH, nitrógeno, fósforo y potasio, para conocer las características físicas y químicas de los residuos y sobre esta base decidir el tipo de proceso de fermentación. Los análisis físicos se hicieron con 5 repeticiones y los químicos por duplicado. La humedad se determinó por la norma NOM-AA-16-1984, el pH por la (NOM-AA-25-1984), el nitrógeno por el método Kjeldahl (NOM-AA-24-1984), el fósforo por colorimetría con cloruro estañoso y molibdato de amonio (NOM-AA-32-1976) y el potasio por flamometría (SECOFI 1985).

Con respecto al carbono total no fue posible realizar su determinación porque no se dispuso de la infraestructura y del equipo requerido en el momento del estudio.

Para el buen desarrollo de este trabajo resultó más conveniente llevar a cabo la investigación en dos fases:

1. Determinación de parámetros físicos y químicos, para conocer las características de los residuos.

2. Experimentación del composteo con digestión anaerobia en condiciones de laboratorio.

Construcción del reactor

Se construyó un reactor anaerobio a nivel de laboratorio de tipo vertical semicontinuo (tipo Gobar o hindú) (Trujillo y Gutiérrez 1986). La construcción se efectuó con lámina galvanizada en forma cilíndrica de 40 cm de diámetro por 70 cm de altura, con un volumen de 98 litros que se recubrió con antioxidante en la parte interior. La parte superior se cubrió con una tapa que se sujetó con tornillos y se instalaron dos válvulas de paso, una para medir la temperatura y otra para permitir la salida de gases. También se instalaron dos válvulas de globo, una de 2.5 pulgadas, situada en la pared superior del reactor para la entrada del material y

otra de tres pulgadas en la parte posterior para la salida del efluente. El digestor se cubrió con material de fibra de vidrio para disminuir la pérdida de calor y se colocó un termostato para mantener la temperatura constante a 35°C.

Carga del digestor y evaluación del curso de la reacción

El reactor se cargó inicialmente con 40 kg de residuos orgánicos que se extrajeron de muestras de los 6 mercados analizados, preparados previamente, de acuerdo con la norma NOM-AA-52-1985 (SECOFI 1985). En materia orgánica agrícola se consideraron todos los residuos de origen vegetal (residuos de frutas, vegetales, legumbres, madera, etc.), en materia orgánica pecuaria se incluyeron todos los residuos de origen animal (plumas, vísceras, hueso, excretas, cuero, etc.)

Se controló la temperatura a 35°C dentro del digestor y se mantuvo en condiciones anaerobias. Para evaluar el curso de la reacción se estimaron parámetros como porcentaje de sólidos en los residuos (SV), tiempo de residencia de los residuos para su digestión (TR), así como carga volumétrica (Bv). Se sugiere un valor alrededor del 10% de materia seca, ya que una mayor concentración hace más difícil la homogeneización de los residuos dentro del digestor y disminuye la actividad microbiana (Young 1986).

El porcentaje de sólidos (SV) en la muestra de residuos a digerir se obtuvo a raíz de las determinaciones de humedad en las muestras.

El tiempo de residencia (TR) de los residuos y la cantidad de sólidos volátiles degradados, se evaluó mediante la extracción de 5 muestras del digestor de peso conocido al término de 7, 12, 18, 23 y 28 días y se recargó con la misma cantidad de material extraído.

La cantidad de muestra a extraer, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de velocidad de carga del reactor} = \frac{\% \text{ de sólidos (SV)}}{\text{Tiempo de residencia (TR)}}$$

Las muestras extraídas del digestor se colocaron cada una de ellas sobre papel periódico y después sobre una malla metálica y se expusieron a la acción directa del sol por un lapso de 7 horas (de 11:00 a.m. a 18:00 p.m.) para su desecación. Posteriormente se pesaron en una balanza analítica y por diferencia de peso entre la cantidad de sólidos introducidos al digestor y la cantidad de sólidos extraídos, se calculó el porcentaje de sólidos volátiles degradados.

Determinación de nitrógeno, fósforo y potasio en la composta

Se determinó nitrógeno, fósforo y potasio al producto en seco, para comparar los cambios en las concentraciones de estos macronutrientes durante el proceso de

digestión de la materia orgánica. Ello para contrastar los resultados obtenidos con lo reportado en la bibliografía, sobre pérdidas de estos macronutrientes, tanto en digestión aerobia como anaerobia.

RESULTADOS

Análisis físicos y químicos en las muestras de residuos orgánicos

Se efectuaron 5 determinaciones de humedad y pH para asegurar mayor representatividad en los análisis y con ello tener más confiabilidad en los resultados, pues se observó gran variabilidad de un análisis a otro en la misma muestra.

Los porcentajes de humedad en las muestras obtenidas de los seis mercados analizados están en un rango del 80 al 86 % en peso. El valor promedio de humedad está en un 83.19 %. Los valores de pH van de ácido a ligeramente ácido (pH entre 3.7 y 6.3) (Tabla I). En el curso de los análisis se constató la disminución del pH, conforme el paso del tiempo, ello por la acción digestiva de las diferentes comunidades de microorganismos que producen ácidos grasos volátiles, como acético, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico y valérico, que son intermediarios del proceso anaerobio. Sobre esta base se tomaron las muestras de residuos sólidos antes de las 24 horas posteriores a su disposición en los contenedores de los mercados y después se mantuvieron en refrigeración durante los análisis de laboratorio, para disminuir la digestión microbiana y que las determinaciones del pH fuesen más confiables.

TABLA I. CONTENIDO DE HUMEDAD (% EN PESO) Y pH EN MUESTRAS DE RESIDUOS ORGÁNICOS (VALORES PROMEDIO)

Mercado	% de humedad	pH
Benito Juárez	80.04	5.3
Revolución	84.18	5.1
Nicolás Bravo	83.65	5.1
Independencia	80.56	5.2
Abastos	86.06	4.9
Vasco de Quiroga	84.65	4.8
Promedio	83.19	5.06

Los valores de nitrógeno total, oscilan entre 9 y 14 %. Se observó una gran variación en los resultados de las determinaciones de este macronutriente para cada una de las muestras analizadas. Del fósforo total se obtuvieron porcentajes promedio de 0.27 a 0.42 y del potasio de 0.73 a 0.93 % en peso (Tabla II).

Con respecto a la relación carbono/nitrógeno, esta es fundamental para cualquier proceso de digestión, ya que

estos macronutrientes son dos de los requeridos principalmente por los microorganismos para la formación de biomasa y la obtención de energía. La norma NOM-AA-21-1985 (SECOFI 1985), especifica la técnica para determinar materia orgánica en los residuos municipales. Sin embargo, ésta no fue utilizada, ya que para el digestor sólo se utilizaron residuos sólidos orgánicos de origen vegetal y pecuario, cuyo contenido es 100 % orgánico. Estos residuos se obtuvieron a raíz de la separación de subproductos del estudio de generación.

TABLA II. VALORES PROMEDIO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN MUESTRAS DE RESIDUOS (% EN PESO FRESCO) Y EN COMPOSTA (% EN PESO SECO)

Nutriente	Residuo sólido	Composta
Nitrógeno	11.07	9.43
Fósforo	0.36	0.31
Potasio	0.86	0.63

Construcción del reactor

Se seleccionó un digestor en posición vertical, ya que los residuos producidos en los mercados poseen gran contenido de agua que incide mucho en su volumen y peso específico; además dadas las condiciones socioeconómicas de nuestro país también se pensó en que fuese un proceso económico, con tiempo de residencia corto, de manejo sencillo y eficiente y que no ofreciera grandes riesgos ambientales ni para la salud pública.

Carga del reactor y evaluación del curso de la reacción

El máximo de sólidos degradados a los 7 días fue de alrededor de 96 % (Tabla III), con lo que se puede concluir que este lapso fue el periodo de retención óptimo en el que el proceso de digestión de los residuos se complementa de forma eficiente. Después de los 28 días se observó que el porcentaje de sólidos degradados bajó drásticamente, por lo que se decidió detener el proceso.

Análisis químicos en la composta

En la Tabla II también se muestran los resultados de las determinaciones de nitrógeno, fósforo y potasio que se realizaron a la composta, una vez que se sometió al proceso de secado.

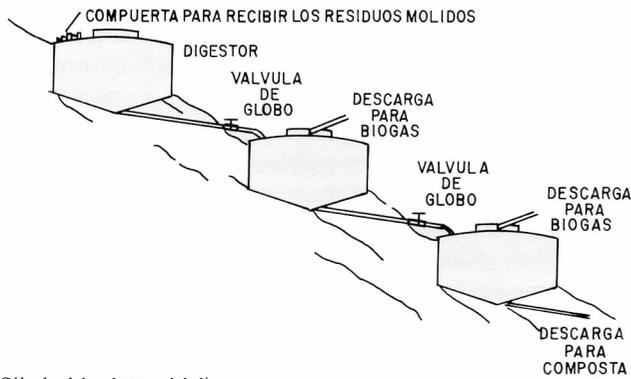
Propuesta de construcción de un digestor anaerobio a nivel piloto

Para el tratamiento de los residuos orgánicos generados en los mercados de Morelia, en los cuales se estimó una generación promedio de 15 ton/día, se propone la instalación de tres digestores de 46 m³ cada uno, fabri-

TABLA III. SOLIDOS DESTRUIDOS (% EN PESO SECO)

Tipo de Material	Tiempo de residencia				
	7 Días	12 Días	18 Días	23 Días	28 Días
Efluente extraído (g)	2537.5	2300	2273.5	2169.5	2170
Peso de sólidos en el efluente (fresco) (g)	426.66	386.63	382.17	364.69	364.77
Peso de sólidos (seco) (g)	17	65.7	76.2	57	77
% de sólidos degradados	96.05	83.01	80.07	80.18	78.9

cados con cemento y ladrillo, colocados a desnivel uno de otro e interconectados por medio de válvulas de globo, a fin de asegurar la remoción de los residuos. Para esto se sugiere una pendiente natural del terreno y la optimización de los costos de operación (Fig. 2).



Cálculo del volumen del digestor.
 Cantidad de residuos orgánicos a tratar: 15 ton/ día.
 Peso volumétrico de los residuos: 0.769 ton/m³
 Volumen del digestor requerido para 15 ton/día: 19.505 m³/día.
 Tiempo de residencia de los residuos dentro del digestor: 7 días.
 Volumen requerido para el total de residuos de 7 días: 137 m³

Fig. 2. Perspectiva de los tres digestores anaerobios

El diseño de cada uno de los digestores es en forma cónica (Fig. 3), con un diámetro de 6 m y ¾ partes del volumen total para el cilindro y ¼ parte para el volumen del cono.

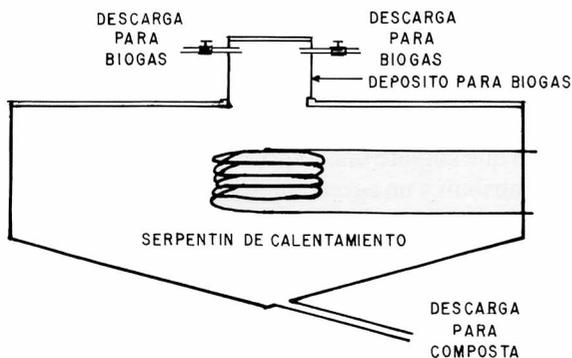


Fig. 3. Vista lateral del digestor

La altura del cilindro, de acuerdo con los cálculos sería de 1.22 m. La altura del cono sería de 0.82 m. En este último se instalaría una válvula de paso para la salida del biogas producido. Este se utilizaría para calentar agua que se canalizaría a través de un serpentín y para mantener una temperatura constante dentro del digestor (Fig. 4).

Estas dimensiones son para el volumen total, mientras que para el diseño real se considera un volumen de seguridad de 20 % más.

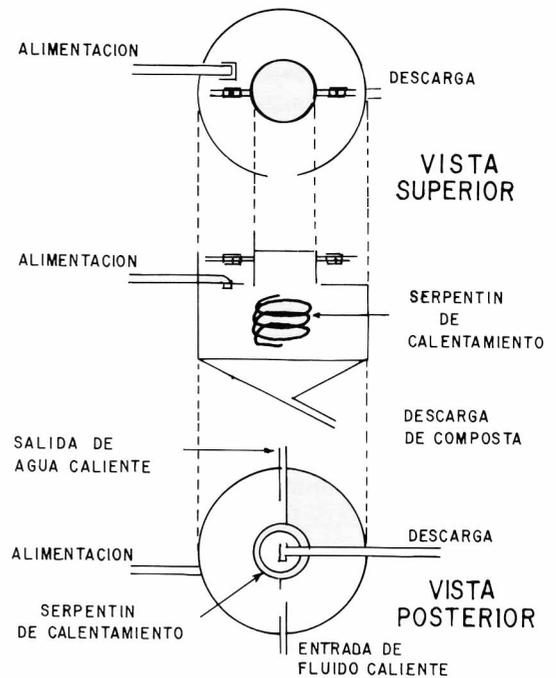


Fig. 4. Vista superior y posterior del digestor

DISCUSIÓN

Los residuos sólidos orgánicos que se generan en los mercados del municipio de Morelia, por lo general se manejan y disponen mezclados con otro tipo de residuos domiciliarios, aumentando con ello el problema de contaminación ambiental. Los residuos orgánicos que se generan en los mercados poseen características físicas y químicas,

que los convierten en una fuente viable para la fabricación de composta. Ésta además de ser un mejorador orgánico de la estructura del suelo, contiene nutrimentos que son importantes para el desarrollo de las plantas.

Por otro lado se pudieran generar empleos, mediante la implementación de este tipo de procesos. Esto puede ser una opción económica y factible para el tratamiento de los residuos orgánicos de mercados y reducir la cantidad de residuos sólidos municipales en alrededor del 10 %. Además repercutiría en un ahorro para el municipio por concepto de gastos de recolección y disposición de los residuos y aumentaría la vida útil del relleno sanitario. Otro aspecto muy importante es la disminución del impacto al ambiente por la disposición incontrolada de esta clase de residuos y la posibilidad de reintegrarlos al ambiente de manera que puedan ser absorbidos por los sistemas ecológicos. Para ello se propone inicialmente utilizar la composta en reposición de áreas verdes de los mismos municipios o en viveros como substrato para plantas forestales y ornamentales, mientras se hace una evaluación biológica más detallada de la composta para su utilización en cultivos.

La experimentación se llevó a cabo en un digestor anaerobio continuo en posición vertical tipo hindú, que se ha venido utilizando como alternativa para el procesamiento de otro tipo de residuos orgánicos, como estiércol y aguas negras, en los que los contenidos de humedad son muy altos como para establecer un proceso de digestión aerobia.

En cuanto a la selección del sistema de digestión se planeó básicamente para la disposición de los residuos orgánicos que se generan en los mercados y en el que predomina la producción de composta sobre cualquier otro subproducto. Una característica importante de este sistema es que requiere predominantemente de residuos vegetales sobre los residuos animales (Amaya y Cendejas 1979). Esta característica la cumplen los que se producen en los mercados municipales de la ciudad de Morelia, en los cuales la materia orgánica vegetal se encuentra en proporciones de hasta 85 % del total de residuos (Buenrostro *et al.* 1999).

El contenido de humedad en los residuos sólidos fue uno de los principales factores que sugirió el uso de la digestión anaerobia, ya que los porcentajes de humedad obtenidos en las muestras son mayores que los reportados como adecuados para un proceso de digestión aerobia. Rabbani *et al.* (1983), proponen contenidos de humedad entre un 50 a 70 %. De acuerdo con las características de los residuos orgánicos de los mercados de la ciudad de Morelia, cuyo contenido de humedad oscila entre 80 y 86 %, se tendría que someter el material, una vez molido y homogeneizado, a un proceso de desecación previa, o en su caso agregar algún otro material, cuyo contenido de agua fuese bajo. Ello para llevar el contenido de humedad de los residuos a los niveles requeridos en un proceso de digestión aerobia, situación que aumentaría los costos de

producción.

El carácter ácido de los residuos fue otro factor determinante en la selección del tipo de proceso porque los organismos que intervienen en la digestión anaerobia soportan intervalos de tolerancia a pH más amplios, aunque el efecto del pH en el proceso de digestión ha sido poco estudiado (ENSIC 1984).

El contenido de nitrógeno que se determinó para los residuos orgánicos analizados en este trabajo, coincide con el 7 a 10 % reportado para residuos similares (Cointreau 1982). En cuanto a la variación del contenido de nitrógeno entre las diferentes muestras de residuos, se puede atribuir al contenido heterogéneo de nitrógeno en las distintas macromoléculas de origen vegetal y pecuario en los residuos. Aunque éstos se sometieron a un proceso de molienda y homogeneización previa a los análisis, la molienda de ciertos residuos, como hueso, plumas, etc. no fue tan eficiente.

La pérdida de nitrógeno durante el proceso de digestión fue un parámetro importante en este trabajo, ya que tratándose de macronutrimentos, la conservación del nitrógeno es la más importante, pues se pueden tener pérdidas de este elemento por lixiviación o a través de escape de amonio y volatilización de gases nitrogenados.

Aviva y Portnoy (1994) mencionan que estas pérdidas pueden ser afectadas por la relación C:N, el pH, el contenido de humedad, la aireación, la temperatura, la forma en que se encuentran los compuestos nitrogenados al inicio del composteo y la absorción o capacidad de retención de los materiales a compostear.

Se determinaron pérdidas de nitrógeno de 14 a 15 %, hecho que concuerda con lo descrito en la bibliografía y que confirma que el proceso anaerobio es el más adecuado para no tener grandes pérdidas de nitrógeno. Hoitink y Keener (1995), encuentran pérdidas de nitrógeno total en composteo anaerobio de residuos de jardín de 10 a 15 %, mientras que en composteo aerobio de 22.8 %.

Con respecto a las determinaciones de potasio se observó que los valores se mantienen en un rango similar antes y después de la digestión. Ello se puede atribuir a la estabilidad química de este macronutriente y no a que se pierde por volatilización, como en el caso del nitrógeno.

Por otra parte, se determinó que el porcentaje mayor de sólidos degradados se dio en un tiempo de residencia de siete días. Después de este periodo se mantuvo a la baja, lo que sugiere una inhibición de la digestión. Esto se puede atribuir a un agotamiento del substrato para el desarrollo de las diferentes comunidades de bacterias, lo que indica una capacidad de carga volúmica mayor del digestor. Esto quiere decir que tuvo que extraerse más composta y cargar más residuos, para que se continuara con el proceso de digestión sin abatimiento de las comunidades bacterianas.

La carga volúmica (Bv) del digestor se determinó de acuerdo con el contenido de sólidos totales en el material a

compostear (16.81 %), que están dentro del rango reportado como óptimo para digestores anaerobios (Baquedano *et al.* 1983, Young 1986). Sin embargo estos últimos se han obtenido de estudios en digestores anaerobios con carga discontinua y a temperatura ambiente. En este trabajo se pensó en un digestor con carga continua y se controló la temperatura en un rango constante, lo cual pudo influir positivamente sobre el crecimiento de las comunidades bacterianas y la consecuente disminución del tiempo de residencia.

Se seleccionó un digestor de carga continua para ofrecer una alternativa de composteo de los residuos orgánicos que se generan diariamente en los mercados y que por sus características de fácil degradación no pueden ser retenidos temporalmente para su procesamiento ya que se ocasionaría un impacto negativo al ambiente. Otra opción es construir cantidad suficiente de digestores para procesar todos los residuos, pero esta situación es una inviable económicamente.

Aunque no fue posible evaluar la relación carbono/nitrógeno de los residuos, el total de sólidos destruidos sugiere un buen desarrollo del proceso de digestión, que puede ser indicador de un contenido excelente de estos macronutrientes en los residuos orgánicos de mercados. La relación ideal de C/N es de 25-35:1. Generalmente los residuos orgánicos municipales que básicamente contienen residuos orgánicos vegetales tienen una relación C/N óptima (Tchobanoglous *et al.* 1977). Tampoco se evaluó la producción de biogas que puede ser otro subproducto muy importante de la reacción para utilizarlo como combustible, sobre todo en las áreas rurales del país. El proceso de digestión se evaluó en el laboratorio y se propone su realización a nivel piloto, así como profundizar en los análisis de bióxido de carbono y metano que se producen de la reacción.

La importancia de este trabajo reside en la evaluación del proceso de digestión anaerobia, empleando residuos orgánicos generados en los mercados municipales en forma natural; es decir, sin dilución previa y sin agregar ningún otro material. Este factor es de suma importancia cuando se considera el empleo de este proceso en áreas rurales, pues aparte de bajar los costos de instalación del equipo por la disminución del volumen del reactor, estas áreas tienen serias deficiencias presupuestarias, lo que influye de manera determinante en la toma de decisiones para un proceso de tratamiento y disposición de residuos sólidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el CONACyT y forma parte del proyecto de investigación doctoral del primer autor. La fase analítica se realizó en el Departamento de Química de la Facultad de Química de la UMSNH. Se agradece el apoyo técnico del ingeniero José Garza Caligaris.

REFERENCIAS

- Amaya R. y Cendejas H. (1979). Un ensayo sobre como producir combustible y fertilizante de los desperdicios agrícolas. Aplicación de la tecnología en el medio rural, UMSNH. México, 17 p.
- Arias J. (1978). Digestión anaerobia de desechos orgánicos: Prioridad estratégica para el ecodesarrollo. Reunión Nacional sobre Energía no Convencional. Palmira, Morelos, 16 p.
- Aviva A. y Portnoy R. (1994). Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soil. *Environ. Qual.* 23,1184-1189.
- Baquedano M., Young M. y Morales L. (1983). *Los digestores: Energía y fertilizantes para el desarrollo rural*. INIREB. Xalapa, 30 p.
- Bernache G. (1995). *Ecología y sociedad en Guadalajara*. CIESAS de Occidente, México, 16 p.
- Brinton W. y Droffner M. (1994). Microbial approaches to characterization of composting process. *Comp. Sci. Utiliz.* 2,12-17.
- Buenrostro O., Bernache G., Cram S. y Bocco G. (1999). Análisis de la generación de residuos sólidos en los mercados municipales de Morelia, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 15, 27-32.
- Cointreau S. (1982). *Environmental management of urban solid wastes in developing countries. A Project Guide*. Urban Development Department. Washington, 130 p.
- ENSIC (1984). Sanitation environmental reviews No. 13/14. Recycling of solid wastes. Asian Institute of Technology, Bangkok, 103 p.
- Goosman G. (1978). Mechanical processing and composting. waste disposal and resources recovery. *Proc. Seminar on Solid Waste Management* (B. N. Lomani and G. Tharun, Eds.). Asian Institute of Technology, Bangkok, pp.133-146.
- Harrison H. (1994). Recycling organic wastes: research, engineering and outreach. *Cornell Engine. Quart.* 28,18-23.
- Hoitink H.A. y Keener H.M. (1995). Composting organics in the Netherlands. *Bioc.* 36, 37-38.
- Padilla E. y Guzmán A. (1995). Utilización de desperdicios agroindustriales para el cultivo de setas. *Agroc.* 6,8-11.
- Rabhani K.R., Jindal R., Kubota H. y Obeng L. (1983). Environmental sanitation reviews No. 10/11: composting of domestic refuse. ENSIC. Asian Institute of Technology, Bangkok, 107 p.
- Ruiz F.J. (1994). La agricultura orgánica. En: *Alternativas para el campo mexicano*. Tomo II. Fontamara Eds. México, pp. 152-181.
- SECOFI (1985). Relación de normas oficiales mexicanas aprobadas por el comité de protección al ambiente. Contaminación del suelo. México, 104 p.
- SEDESOL/INE (1994). Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente. México, 220 p.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (1977). *Solid wastes: engineering principles and management*. McGraw Hill, Nueva York, 280 p.
- Trujillo Z. y Gutiérrez P. (1986). Comportamiento de digestores anaerobios de desplazamiento para el tratamiento de estiércol de cerdo bajo condiciones mesofílicas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, UMSNH.

Velasco M.R., Martínez del Campo A., Saldaña Q.G y Tejada I. (1996). Utilización de residuos semisólidos (fondajes) de tanques de fermentación de melaza de caña de azúcar en alimentación animal. *Técnica Pecuaria* 34, 29-37.

Weber H. (1982). Experiences in boiling of compost plants in

developing countries. En: *Recycling in developing Countries* (K.J. Thome-Kozmiensky, Ed.) E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik, Berlín, pp. 163-168.

Young M. (1986). *Digestores anaerobios: criterios de selección, diseño y construcción*. INIREB, Xalapa, 51 p.