

BIODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Alternativa energética y fuente de trabajo

GERMÁN LÓPEZ MARTÍNEZ

Ingeniero Mecánico Fundación Universidad de América, Especialista en Educación en Tecnología Universidad Distrital Francisco José de Caldas (F.J.C.). Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica Universidad de los Andes. Profesor de tiempo completo adscrito a la Facultad Tecnológica, programa Tecnología Mecánica, Universidad Distrital F.J.C.
germanlopezm@yahoo.es

Fecha de recepción: septiembre 01 de 2003

Clasificación del artículo: Revisión
Fecha de aceptación: diciembre 04 de 2003

Palabras clave: Residuos sólidos, reciclaje integral, biogás, biodigestión.

Keywords: Solid residues, integral recycling, biogas, biodigestion

Resumen

Este artículo describe una propuesta para el manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), alternativa a su disposición en rellenos sanitarios (poco eficiente por su alto grado de contaminación), y a la solución ideal, que es la recuperación del 70 al 90% de cada uno de los componentes de los RSU, o “*reciclaje integral*”. Se describe aquí el proceso de digestión de los RSU en biodigestores, los cuales aceleran el proceso natural que sucede en rellenos sanitarios para obtener biogás como combustible, además de estabilizar los RSU restantes para su recuperación posterior. La solución propuesta permite además retener el lixiviado y controlar algunas variables para acelerar la digestión.

Abstract

This article describes a proposal for the management of Urban Solid Residues (USR), which is an alternative available in sanitary fillings (this is not very efficient due to their high level of pollution) and to the ideal solution which is the recovery of between the 70 and the 90% of each of the USR components or “*integral recycling*”. The USR digestion process into biodigestors is described here; these biodigestors accelerate the natural process that occurs in sanitary fillings to obtain biogas as a combustible as well as to stabilize the rest of the USRs for their subsequent recovery. The proposed solution additionally permits the retention of the lixivial and control some variables to accelerate the digestion. permit to keep back the leachate and to control some variables to accelerate the digestion.

1. Introducción

Durante siglos las sociedades rurales han transformado la naturaleza para producir alimentos de fácil asimilación y descomposición posterior, y productos para el consumo a partir de materias primas escasamente transformadas como madera, algodón, hierro y cuero, entre otros; una vez cumplen su objetivo estos productos se convierten en residuos fácilmente degradables por el medio; por ejemplo, los sobrantes de alimento se suministran como alimento al ganado; los desechos agrícolas y los excrementos de animales y personas se usan para abonar la tierra; los residuos de productos derivados de la madera se emplean como leña, etc. (Revista Residuos No. 39, 1997).

Las sociedades urbanas actuales producen gran cantidad de Residuos Sólidos Urbanos (RSU); por sus características muchos de ellos son difíciles de asimilar por la naturaleza, especialmente por el empleo de procesos químicos y mecánicos complejos en la elaboración de productos de consumo masivo, los cuales implican transformaciones sustanciales de las materias primas (es el caso de los productos derivados del petróleo); en muchos casos estos procesos modifican la estructura química básica de los materiales, requiriéndose de muchos años para su degradación por parte de la naturaleza, en contraste con los productos provenientes de las áreas rurales (CEPIS, 1991). Por esta razón, en las ciudades se generan enormes volúmenes de residuos que en un corto lapso deterioran el ambiente y se convierten en un problema ambiental.

2. Manejo de los residuos sólidos urbanos en América Latina

La cantidad diaria de RSU que se genera en América Latina asciende a más de 300.000 toneladas, de la cual se estima que sólo el 75% es recolectada y, de esta, solo el 30% se dis-



pone en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto con quemas indiscriminadas de los desechos y sin ningún tipo de tratamiento de lixiviados, situados muchos de ellos en áreas densamente pobladas. Se denominan lixiviados a los líquidos que se generan a raíz de la degradación de la materia orgánica (lixiviados de origen bioquímico) y los líquidos que se originan de la infiltración de agua al relleno (lixiviados de origen hidrológico) (Ehrig, 1989).

Para recolectar y disponer estos desechos se necesitan aproximadamente 30.000 camiones recolectores y 385.000 m³ diarios de espacio para enterrarlos sanitariamente (OPS/BID, 1997). La cantidad de camiones en ciudades con más de un millón de habitantes varía de 100 a 1.500 para la recolección, y entre 500 a 10.000 barrenderos para limpiar sus calles (Cantanhede, 2002).

Los problemas logísticos, administrativos, organizacionales y financieros asociados a lo anterior, solo pueden ser afrontados por organizaciones operadoras institucionalmente fuertes y organizadas. Aunque de menor cuantía, los problemas son similares en ciudades medianas y pequeñas, con el agravante de estar físicamente más retiradas de los centros de desarrollo tecnológico, de decisión y de información. Mientras el incremento del comercio ambulante y la ocupación informal de los espacios públicos que se agudizan en algunas grandes ciudades del continente tienden a hacer más críticos los problemas de la limpieza pública (Revista Residuos No. 38, 1997).

El manejo de los RSU en la mayoría de los países de América Latina se ha convertido en un problema, más que en una solución; la situación es agravada por diferentes factores como el acelerado crecimiento de la población, la desmesurada concentración de la población en las áreas urbanas, el desordenado desarrollo de las industrias, los cambios no con-

templados en los hábitos de consumo de la sociedad y la ausencia de una planificación en el desarrollo urbano, entre otros (CEPIS/OPS, 1990). Desafortunadamente, en la mayoría de los casos el desarrollo de cualquier región viene acompañado de una mayor producción de RSU, los cuales si no se controlan y manejan adecuadamente afectan el ambiente y la salud de las comunidades (OPS/BID, 1997).

En el mundo entero el reciclaje se ha planteado como alternativa de manejo, pero en muchos países en vía de desarrollo éste se ha convertido en un problema antes que en una solución, dado que la mezcla de RSU eleva los costos de selección y disminuye la eficiencia general del proceso; este hecho es generado por la inexistencia de políticas estatales que obliguen a una selección y separación de los residuos, desde la fuente de origen (Diputación Regional de Cantabria, 1991). Un problema adicional al aumento de los costos de operación es la presencia y descomposición incontrolada de la materia orgánica contenida en los RSU, que afecta significativamente la salud del personal encargado y dificulta su manejo y reciclaje, porque propicia la proliferación de focos infecciosos y plagas transmisoras de enfermedades (Wagner, 1991).

3. El reciclaje integral como solución

Ante la problemática planteada algunos expertos en el tema proponen soluciones acordes con el nivel de desarrollo de países como los latinoamericanos; una de ellas es el *reciclaje integral*, el cual consiste en la recuperación de cada uno de los diferentes tipos de residuos, estimando que entre el 70% al 90% de los materiales desechados son recuperables (OPS/BID, 1997).

Los diferentes compuestos de los RSU se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- *Materia orgánica*, representada en los desechos de alimentos y parte de los

desechos de jardín, los cuales se consideran material biodegradable a corto plazo, porque la naturaleza “puede asimilarlos” rápidamente

- *Plásticos y caucho*, o material biodegradable a largo plazo (Basta, 1990)
- *Papel, cartón, madera y cueros*, o material biodegradable a mediano plazo (Basta, 1991) (Donovan, 1991)
- *Textiles, desechos de construcción* (vidrio, cerámica, ladrillo, cenizas y minerales) y *otros* como huesos, material inerte, metales, etc. (Donovan, 1991).

La materia orgánica biodegradable a corto plazo puede ser transformada por la naturaleza, pero también aprovecharse como generadora de biogás (Lang, 1987), o como biomasa para gasificación; en este último caso, si está separada de los demás compuestos (Prins, 2003), los cuales requieren de largos períodos para ser asimilados por la naturaleza (Young, 1985) y por lo tanto, en lugar de enterrarse en rellenos sanitarios o de ser arrojados en botaderos a cielo abierto, con consecuencias altamente negativas para el ambiente, pueden recuperarse; esta labor se podría realizar con cierta facilidad si se encuentran separados unos de los otros, en especial de la materia orgánica degradable a corto plazo (Moshiri, 1992).

Para lograr la implementación del *reciclaje integral* se requiere que en los países en vía de desarrollo se realicen acciones tales como:

- Establecer criterios únicos sobre los residuos, que en principio implicarían la definición de términos comunes a todos los organismos y procesos: extracción, producción, transporte, reciclaje, gestión, financiación, aspectos legales, etc.

- Crear un sistema de información, control, competencias e investigación unificado, evitando las múltiples y



dispersas competencias, inversiones y actuaciones de hoy y realizando un inventario permanentemente actualizado de la producción de residuos.

- Considerar los residuos como algo único y establecer una clasificación en función de su peligrosidad y potencial de recuperación, y a partir de ella desarrollar las acciones ejecutivas, legales, de subvención, investigación, etc.
- Establecer programas de investigación del reciclaje integral para cada tipo de residuo.
- Establecer bancos de residuos locales y comerciales en los que figuren los datos de los residuos disponibles, las técnicas de su reciclaje y los lugares donde existan, experiencias de su aprovechamiento, comercialización y aplicación o consumo de los productos recuperados.
- Crear ayudas para fomentar el reciclaje sobre la base de consideraciones ecológicas.
- Otorgar un tratamiento económico, financiero y fiscal especial para aquellos componentes o productos que dejen de ser residuos y pasen a ser reciclados y reutilizados de nuevo (Pineda, 1998: 28-29).

Para llevar a cabo estas acciones es necesario que los Estados promulguen y apliquen políticas acordes con la propuesta planteada, además de realizar grandes inversiones que posibiliten la implementación del *reciclaje integral*; adicionalmente debe contarse con cambios en la actitud de las sociedades y en los hábitos de consumo, para lo cual se requiere del concurso de sistemas educativos fuertes, basado en una nueva concepción ecológica del mundo, y de agresivas campañas promocionales. De otra parte, los sectores comercial e industrial (especialmente este último) deben tam-



bién contribuir con acciones concretas, por ejemplo emplear procesos de fabricación que disminuyan la generación de desechos, entre otras (Mc Adams, 1993).

De lo anterior puede afirmarse que el *reciclaje integral* requiere de un período largo para su implementación, en especial por la demora en la toma de las decisiones por parte de los Estados involucrados¹.

4. ¿Qué hacer mientras se implementa el *reciclaje integral*?

En la actualidad los países en vía de desarrollo tienen básicamente dos alternativas de solución: la recuperación de los RSU mediante la implementación del *reciclaje integral*, o su eliminación. En el segundo caso se emplea una solución aparente, basada en la disposición controlada de los residuos en rellenos sanitarios o en su incineración; con esta última alternativa no se eliminan del todo los residuos, sino que estos se esconden o se transforman en elementos inútiles y perjudiciales para el medio (Pineda, 1998: 35). La incineración no es otra cosa que la transformación de los residuos en escoria y gases, para aprovechar de ellos, en alguno de los casos, el calor producido, requiriéndose finalmente de rellenos sanitarios para eliminar parte de la contaminación generada (Kisker, 1990).

A pesar de los grandes avances tecnológicos, en los rellenos sanitarios se ha concentrado la solución final del problema; la actividad desarrollada en ellos se conoce como *gestión integral de residuos*. En un relleno sanitario se efectúa, básicamente, un enterramiento digno de los residuos, en un espacio técnicamen-

¹ Se espera que la propuesta de implementación del reciclaje integral genere debate y discusión en los círculos docentes.

te preparado para evitar, en teoría, el máximo de contaminación (Crawford, 1985). Este es un objetivo raramente alcanzado; la alternativa se convierte más bien en un camuflaje del problema que en una solución verdadera (Arias, 1994). Aunque existe un gran número de investigaciones y estudios, no se ha llegado a un conocimiento pleno sobre el proceso de transformación que experimentan los residuos sólidos dentro de un relleno sanitario, y para su construcción y operación se emplean prácticas empíricas que deberían ser revisadas (Pineda, 1998: 33).

En un relleno sanitario se trata de aislar los desechos y controlar los lixiviados y los gases que se producen y tienden a fluir fuera del mismo, con el fin de evitar impactos ambientales adversos (Tchoba-noglous, 1994: 407-421). A los gases generados a raíz de la degradación de la materia orgánica se les llama biogás, que es una mezcla de gases formados en ambientes carentes de oxígeno. Los lixiviados generan un alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales cercanas, y los gases que fluyen hacia la atmósfera causan su contaminación, ya que están compuestos en esencia por metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2), dos de los gases que más influyen sobre el *efecto invernadero* (Tchobanoglous, 1994: 433-454).

5. Experiencias negativas en rellenos sanitarios

Lamentablemente se han tenido más desaciertos que aciertos en cuanto a la gestión integral de los residuos en rellenos sanitarios; de hecho, existen experiencias negativas en este sentido. Es el caso del relleno sanitario de Doña Juana, ubicada en la ciudad de Bogotá (Colombia), donde el 27 de septiembre de 1997 se deslizaron aproximadamente 800.000 m³ de residuos sólidos que habían



sido dispuestos en la parte activa del relleno, formando una avalancha que esparció dichos residuos sobre los terrenos contiguos hasta llegar al cauce de un río que cruza la ciudad (Río Tunjuelito). La causa de este accidente, según estudios posteriores, fue la acumulación de gases y lixiviados que no pudieron ser evacuados oportunamente (Sadat International Inc., 1997).

Como puede deducirse, el problema en el manejo de los RSU aún persiste, y es más evidente en las grandes ciudades latinoamericanas debido a su alto volumen de producción; por ejemplo, en Bogotá se vierten más de 5.500 toneladas/ día (en 1997 se vertieron en promedio 4.835,1 ton/ día o 147.342,3 ton/ mes), y se hace prácticamente imposible realizar procesos de reciclaje antes de depositar los residuos en el relleno, por el alto volumen de residuos mezclados (Constructora ICONTE, 1999).

6. Un proceso alternativo en el manejo de RSU

Mientras se adoptan las medidas necesarias para implantar un verdadero proceso de recuperación de RSU, o *reciclaje integral*, existen procesos alternos de manejo que permitan recuperar parcialmente los RSU; ellos pueden adaptarse, disminuyendo el impacto ambiental que hoy tienen los rellenos sanitarios y las plantas de incineración. Las alternativas deben partir de la condición actual de los RSU, caracterizada por un alto volumen de producción de residuos de diferentes características, sin seleccionar ni clasificar.

Uno de tales procesos alternativos (que debe ser materia de investigación), consiste en depositar los RSU tal como vienen de la recolección (sin selección previa), en biodigestores grandes, especialmente construidos para lograr los siguientes propósitos: a) obtener el biogás de

manera rápida y controlada; b) separar y controlar los lixiviados generados; c) estabilizar la materia orgánica; d) permitir la recuperación posterior (fuera del biodigestor) de los desechos

sobrantes, libres de materia orgánica inestable, por medio de procesos posteriores de reciclaje. En la Figura 1 se aprecia la propuesta del proceso alterno en el manejo de los RSU descrito.

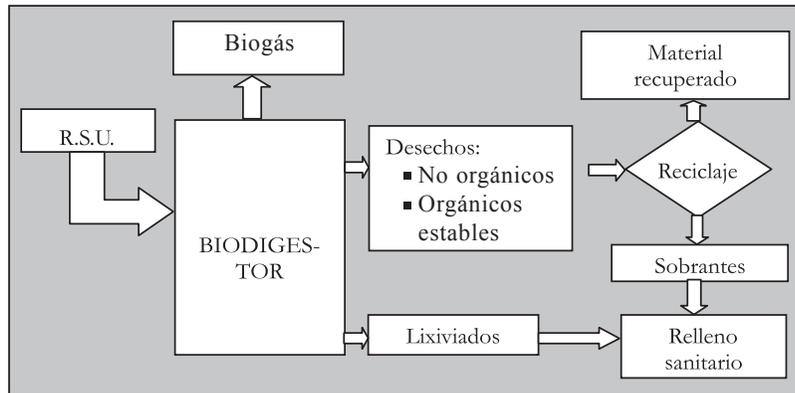


Figura 1. Manejo alternativo para recuperación de RSU

El biodigestor acelera el proceso de digestión de la materia orgánica biodegradable a corto plazo, especialmente de desechos de alimentos, la cual representa más del 50% de los RSU (ICONTE, 1999); de esta forma se logran cumplir los tres primeros propósitos arriba anotados, de manera rápida y segura; el cuarto propósito se alcanza al reciclar los residuos que no se vean afectados en mayor medida por el proceso de digestión anaerobia: plástico, caucho, papel, cartón, y metales, entre otros². El material que no es posible recuperar se deposita en el relleno sanitario, mientras que los lixiviados se almacenan en depósitos apropiados para su posterior tratamiento de disminución de su efecto contaminante; también pueden ser enviado al relleno sanitario, mientras se realizan más investigaciones para lograr su posterior recuperación y utilización.

Para entender la propuesta es necesario comprender cómo se descomponen los RSU en un relleno sanitario.

7. Transformación de los RSU en rellenos sanitarios

Los procesos más importantes que se generan dentro de un relleno sanitario están íntimamente relacionados con la degradación de la materia orgánica presente; según algunos informes técnicos, los RSU en ciudades de América Latina y del Caribe contienen entre un 40% y un 70% de materia orgánica (OPS/BID, 1997). Por ejemplo, en el relleno sanitario de Doña Juana de la ciudad de Bogotá se vierten algo más de 5.500 toneladas/ día de RSU sin seleccionar, a excepción de los desechos hospitalarios que se depositan en otras zonas; se estima que entre el 44% y el 63% es material biodegradable, lo cual hace atractivo el empleo de los RSU como fuente generadora de energía (Constructora ICONTE, 1999).

Los registros mensuales de composición físico-química de los RSU depositados en el Relleno Sanitario de Doña Juana señalan la conformación presentada en la Tabla 1.

² Resultados parciales obtenidos por el autor del presente artículo en una investigación en proceso, que se desarrolla desde el año 2000.

Materia orgánica (material biodegradable a corto plazo)	50,1%
Plásticos y caucho (material biodegradable a largo plazo)	27,7%
Papel y cartón (material biodegradable a mediano plazo)	14,3%
Textiles	2,7%
Vidrio, cerámica, ladrillo, cenizas y minerales	2,3%
Otros (madera, huesos, material inerte, cueros, etc.)	2,9%

Tabla 1. Registros promedio mensuales de la composición físico química de los RSU depositados en el Relleno Sanitario de Doña Juana (mayo de 1998 a septiembre de 1999) (ICONTE, 1999)

Al analizar los datos de la Tabla 1 puede observarse que el principal componente presente es la materia orgánica, constituida en esencia por desechos de alimentos y algo de desechos de jardín, que representan más de la mitad de los RSU (50,1%); su procedencia es principalmente del sector doméstico. El segundo componente en importancia son los plásticos y cauchos (27,7%); los residuos de este tipo son por lo general material de empaque; el tercer componente en importancia es el papel y cartón (14,3%), constituido por materiales de empaque y residuos de papelería.

Los demás compuestos analizados en la composición físico-química se encuentran en porcentajes menores al 5%; la muestra analizada se

encontraba libre de huesos o vegetales putrescibles. Los materiales no biodegradables (vidrio y cerámica; ladrillo, cenizas y minerales) conforman el 2,3%; este bajo porcentaje puede deberse a la no aceptación de residuos de demolición en el relleno por normas internas de operación (Constructora ICONTE, 1999).

La generación de lixiviados y de biogás en rellenos sanitarios son procesos que se encuentran íntimamente relacionados (Nozhevnikova, 1993). Cuando los RSU son depositados en un relleno sanitario sobrevienen una serie de procesos secuenciales de descomposición de la materia orgánica biodegradable presente, que generan la producción de lixiviados y la formación de gas (EMCON, 1982).

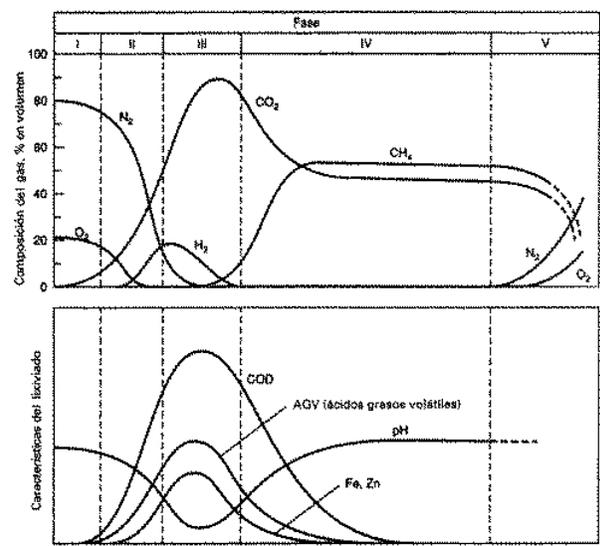


Figura 2. Fases generales de la generación de los lixiviados y gases para un relleno sanitario típico

Fuente: Tchobanoglous, 1994

En la Figura 2 puede observarse el proceso de descomposición de la materia orgánica que ocurre en un relleno sanitario. En ella pueden apreciarse cinco fases, a saber:

- Fase I, de *ajuste inicial*: la materia orgánica biodegradable de los RSU sufre una descomposición microbiana bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado (Herrera, 1989).
- Fase II, de *transición*: el oxígeno desciende y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias; el nitrato y el sulfato se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno; el valor del pH en el lixiviado comienza a caer por el incremento de ácidos grasos volátiles (AGV), y la generación de CO_2 (Herrera, 1989).
- Fase III, o *fase ácida*: en ella se acelera la actividad microbiana, con una alta producción de AGV, se genera la mayor cantidad de CO_2 , el valor del pH es el más bajo, se generan gases de hidrógeno, y las demandas bioquímicas y químicas de oxígeno (DBO y DQO) se incrementan (Lang, 1987).
- Fase IV: o de *fermentación de metano*; un segundo grupo de microorganismos, llamados metano-génicos, convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno en CO_2 y CH_4 (Metano), que llega a ser el gas predominante. El valor del pH sube a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8,0; también se reducen las concentraciones de DBO y DQO y de metales pesados en el lixiviado (Lang, 1989).
- Fase V: o fase de *maduración*: la velocidad de generación de biogás del relleno disminuye significativamente, y se pueden presentar pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno (Herrera, 1989).



La duración de las fases varía según la distribución de los compuestos orgánicos, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad, el grado de compactación de los RSU en el relleno, la relación carbono/nitrógeno, que de acuerdo con algunos investigadores debe estar cerca de 30/1 (Hernández, 1985). Diversas investigaciones han registrado tiempos que varían desde un año hasta más de 20, para completar las cinco fases del proceso anaerobio descrito (SCS ENGINEERS INC, 1989) (Tcovanoglous, 1994). Además de los factores propios de los RSU que afectan el tiempo de la transformación anaerobia existen otros factores externos, por ejemplo de orden climático, en especial la temperatura, las precipitaciones fluviales (Lawrence, 1979), y características propias del terreno donde se construye el relleno: su permeabilidad y estabilidad, entre otros, afectan el contenido de humedad y la compactación de los RSU ya depositados (Salvato, 1971).

8. Biodigestores

Un biodigestor es un depósito que permite la fermentación de la materia orgánica de manera anaerobia produciendo biogás y estabilizando la materia procesada biológicamente; tiene varias zonas, a saber: a) zona de retención de materia orgánica; b) zona de almacenamiento del biogás generado; c) zonas de cargue y descargue (Monroy, 1977).

Los biodigestores se clasifican en continuos y estacionarios o tipo *Batch*. Los continuos se cargan y descargan en forma periódica, por lo general todos los días; los estacionarios son cargados de una vez y se vacían por completo después del tiempo de retención prefijado. Con cualquier tipo de biodigestor, toda materia orgánica es apta para la fermentación

(Ludwig, 1984). El depósito de gas debe estar dimensionado de tal manera que pueda almacenar todo el gas que se produzca durante la fermentación (ITINTEC, 1983).

9. Eficiencia de la fermentación en biodigestores

El proceso de digestión y su eficiencia están determinados por los siguientes factores:

- La *temperatura* influye directamente sobre la velocidad de generación de biogás en los biodigestores. Existen tres intervalos de temperatura en los cuales las bacterias anaeróbicas pueden operar:

Temperaturas superiores a 35°C	Termofílico
Entre 15°C y 35°C	Mesofílico
Entre 0°C y 15°C	Psicrofílico

Tabla 2. Temperaturas de operación de las bacterias en los biodigestores (Tomado de Hartz K, 1.981)

La experiencia ha demostrado que en el intervalo *termofílico* se presenta mayor velocidad de fermentación que en el *mesofílico*, y en éste más que en el *psicrofílico*. Esto significa que el tiempo de retención de los desechos orgánicos en el digestor aumenta con la disminución de la temperatura. En el rango termofílico, el máximo rendimiento se obtiene a una temperatura cercana a los 55°C y en el mesofílico a los 35°C (Hartz, 1981).

- El *tiempo de retención*, o el número de días que determinada cantidad de desechos debe permanecer dentro del digestor. Este factor está correlacionado con la temperatura ambiente promedio del sitio; cuando ésta es alta se puede aplicar un tiempo de retención corto, y cuando es baja se requerirán tiempos de retención más largos.

Entre más largo es el tiempo de retención de la materia biodegradable al interior de un biodigestor, más alto es el contenido de metano y con esto el poder calorífico del biogás; con

tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%; con un contenido de metano inferior al 50%, el biogás deja de ser inflamable (Hartz, 1981).

A manera de ejemplo, en la Tabla 3 se relacionan tiempos de retención en función de la temperatura ambiente, cuando se emplean desechos de origen animal (House, 1978).

Temp (°C)	Tiempo retención (días)
37	45
32	60
28	90

Tabla 3. Tiempos de retención de materia orgánica de origen animal (Tomado de House, 1978)

- El *pH en los biodigestores* está en función de la concentración de bióxido de carbono en el gas y de ácidos volátiles, y de la propia alcalinidad o acidez de la materia prima. Las bacterias involucradas en el proceso son altamente sensibles a cambios en el pH. La franja de operación está entre 6 y 8, teniendo como punto óptimo un pH de 7 (House D, 1978).
- El *contenido de humedad* es otro factor que afecta el tiempo de fermentación (Noriega, 1989).
Unas temperaturas altas y constantes (por ejemplo más de 33°C), unos tiempos largos de retención (por ejemplo 100 o más días) y un buen mezclado de materia orgánica, influyen positivamente en la producción de gas. Temperaturas bajas y oscilantes (15-25°C), tiempos de retención cortos (p.ej. menos de 30 días) y un mal mezclado de la materia orgánica influyen negativamente en la producción de gas (Chaur, J. 1982).

10. Los residuos sólidos urbanos en biodigestores

El objetivo principal en el proceso propuesto es la transformación biológica de la materia or-

gánica de los RSU en un producto final estable, y en el aprovechamiento del biogás generado. Para llevar a cabo esta clase de tratamiento los microorganismos biológicos son de importancia primordial, por necesitar de compuestos orgánicos como fuente de carbono y de energía. La fracción orgánica de los RSU contiene normalmente cantidades adecuadas de nutrientes (orgánicos e inorgánicos) para soportar la conversión biológica de los residuos (Pohland, 1987).

El fenómeno de mayor relevancia en la descomposición de la materia orgánica de los RSU es la degradación anaerobia, la cual termina de producirse mucho tiempo después de la disposición en el relleno sanitario. Este proceso, como se ha dicho, puede extenderse desde algunos años hasta décadas, dependiendo de las características del material degradable presente en los RSU, y de factores como las condiciones de humedad, el tipo de compactación y la técnica de operación del relleno sanitario, entre otras (SCS Engineers, 1989). Con el empleo de un biodigestor se pretende acelerar el proceso y llegar a la fase anaerobia de una manera rápida, ya que pueden controlarse las infiltraciones, fugas de agua y temperatura del proceso.

Los microorganismos presentes en los residuos sólidos consumen rápidamente el oxígeno del aire que queda atrapado en los espacios vacíos tornando el ambiente anaerobio, esto es, desprovisto de oxígeno molecular. Bajo estas condiciones la descomposición de la materia orgánica presente se realiza por medio de fermentaciones que son realizadas por los microorganismos que degradan las partículas orgánicas solubilizándolas y formando grandes cantidades de ácidos orgánicos como el ácido acético, y desprendiendo sustancias



como el amoníaco (Farquhar, 1973). Esta etapa corresponde a las tres primeras fases descritas anteriormente, y se denomina etapa de fermentación o acidogénesis. Al solubilizarse y fermentarse la materia orgánica se pierde la estructura mecánica de la matriz sólida que conforman los desechos y la pila de residuos se asienta consecuentemente.

En un relleno los ácidos orgánicos producidos en las primeras etapas de la descomposición de los residuos escapan en su gran mayoría en el lixiviado y son responsables, en gran medida, de su alto poder contaminante y su mal olor. Esta materia orgánica que se escapa con el lixiviado por lo general ya no está disponible para la generación de gas por el relleno sanitario (Christensen, 1989) (Ehrig, 1989); el lixiviado así generado se denomina *lixiviado joven*. Típicamente, los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario pueden demorarse entre uno y dos años en este proceso (Augenstein, 1991).

En un biodigestor se evita la fuga del lixiviado, y por lo tanto se dispone de él para ayudar a la producción del biogás; también reduce el tiempo del proceso fermentativo, y los ácidos generados que se escapan con el lixiviado son utilizados por las bacterias metanogénicas presentes en los desechos para la producción del biogás (Lee, 1993).

Los microorganismos metanogénicos no se encuentran en grandes cantidades de manera natural en los RSU originales; por lo tanto la producción del biogás en un relleno sanitario es lenta al principio, mientras las poblaciones naturales se multiplican (Berlaz, 1992). Una de las ventajas de utilizar el biodigestor es poder agregar sustancias que contengan microorganismos metanogénicos o que promuevan

su reproducción, para acelerar aún más el proceso de la fermentación; mayor investigación es requerida para determinar cuáles serían estas sustancias, que no generen costos elevados ni afecten en gran medida los demás desechos presentes (Díaz, 2000). Una de tales sustancias, usada como nutriente, son los lodos anaerobios provenientes de las plantas de tratamientos de aguas residuales; ellos contienen gran cantidad de bacterias metanogénicas (Alazard, D. 1997) (Barozzi. 1991).

11. Conclusiones

La propuesta de manejo de RSU aquí planteada pretende constituirse en una alternativa intermedia entre la situación actual de eliminación de los RSU en rellenos sanitarios, con los problemas de contaminación aún no resueltos, y la situación deseable de recuperar al máximo los RSU, o lo que denominan algunos autores “*reciclaje integral*”.

La biodigestión anaerobia de RSU en biodigestores es una propuesta que permite aprovechar la energía a través del biogás producido a partir de la fermentación de la mate-

ria orgánica biodegradable a corto plazo, en tiempos menores a los que se logran en los rellenos sanitarios. Con esta alternativa se logran estabilizar los RSU, permitiendo la recuperación de los materiales reutilizables que no se vean afectados en mayor medida por el proceso de fermentación; así se generarían nuevas fuentes de trabajo en procesos de reciclaje.

Para acelerar la fermentación, en el proceso propuesto se retiene el lixiviado dentro del biodigestor. Adicionalmente se controla su emisión al ambiente. Mas bien este puede ser enviado, de manera controlada, a otros contenedores para posteriores tratamientos; de esta forma se logra disminuir el efecto contaminante que actualmente se presenta en algunos rellenos sanitarios y en todos los botaderos a cielo abierto.

El proceso de fermentación se puede acelerar con el control de variables que afectan el tiempo de retención, como la temperatura del proceso (para este caso se recomiendan valores superiores de 55°C), la humedad de la mezcla, la posibilidad de realizar mezcla mecánica, y la adición de nutrientes favorecedores, entre otros.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALAZARD, D, y MOLINA, F.: *Microbiología de la Digestión Anaerobia y Caracterización de Lodos Anaerobios*. Universidad de Antioquia, Medellín Colombia. 1997.
- [2] ARIAS, A. *Modelo de Asentamiento de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos*. Tesis de Magister, Universidad de Cantabria. 1994.
- [3] AUGENSTEIN, D y PACEY, J.: *Modeling Landfill Methane Generation*, EMCON Associates, Proceedings Sardina 91, Third International Landfill Simposium S. Margherita di Paula, Cagliari, Italy 1991.
- [4] BAROZZI L.: *Comparación entre Procesos Aerobios y Anaerobios en el Tratamiento de Aguas*. Berlín. 1991.
- [5] BASTA, N.; FOUHY, K.; GILGES, K.; SHANLEY, A., y USHINO, S. *Recycling Everything Part I: Plastic Recycling Gains Momentum*, Chemical Engineering. Vol 97. 1990
- [6] BASTA, N.; GILGES, y USHINO, S. *Recycling Everything Part 3: Paper Recycling's New Look*, Chemical Engineering. Vol 98. 1991
- [7] BERLAZ, M., HAM, R, y SCHAEFER, D. *Microbial, Chemical and Metane Production Characteristcs of Anaerobically Decomposed Refuse with and without Leachate Recycling*, Waste Management and Reserch, No 10, 1992.

- [8] CANTANHEDE, Alvaro. *Manejo de Residuos Sólidos Domésticos*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Medio Ambiente, CEPIS. Lima, Perú 2002.
- [9] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/ OPS, *Recolección de Residuos Sólidos*, 1990.
- [10] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/ OPS, *Programa Regional de los Servicios de Aseo Urbano, Módulo de Limpieza de Vías y Áreas Públicas*, 1991.
- [11] CHRISTENSEN, T.H., y KJELDSEN, P.:2.1. "Basic Biochemical Processes in Landfills", en T. H Christensen, R. Cossu y P. Stegmann (eds): *Sanitary Landfilling: Process. Technology and Environmental Impact*, Academic Press, Harcourt Brace, Jovanavich, Londres 1989
- [12] Constructora ICON-TE.: *Informe mensual período 01 a 30 de septiembre de 1999*. Consorcio Operador del Relleno de Doña Juana. C.O.R" Bogotá, 1999.
- [13] COOPER C.; y ALLEY, F. C. *Air Pollution Control: A Desing Approach*, PWS Publisher, Boston, MA, 1986
- [14] CRAWFORD, J; y SMITH, P. *Landfill Technology*, Butterworth, Londres 1985
- [15] CHAUR, J.: "El Biogás". Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, Colombia. 1992
- [16] DÍAZ M, ESPITIA S y MOLINA F. *Digestión Anaerobia. Una Aproximación a la Tecnología*. Departamento de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia, 2000
- [17] Diputación Regional de Cantabria, Fundación Leonardo Torres Quevedo Universidad de Cantabria, *Ase-soría Técnica al Desarrollo del Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos*. Informe final, 1991
- [18] DONOVAN, C. T. *Construction and Demolition Waste Processing: New Solutions to and Old Problem*, Resource Recycling, Vol X. 1991
- [19] DONOVAN, C. T. *Wood Waste Recovery and Processing*, Resource Recycling, Vol X. 1991
- [20] EHRIG, H.: Leachate Quality en T H Christensen, R. Cossu y P. Stegman (eds) *Sanitary Landfill: Processes, Technology and Environmental Impact*, Academic Press, Harcourt Brace, Jovanavich, Lon-dres, 1989.
- [21] EMCON Associates. *Methane Generation and Recovery from Landfills*. Second Printing, Ann Arbor Science, 1982.
- [22] FARQUHAR, G., y ROVERS, F. *Gas Production During Refuse Decomposition*, Water, Air and Soil Pollution, vol 2, 1973
- [23] GENDEBIEN, A., PAUWELS, M, y FERRERO, G. *Landfill Gas: from Environment to Energy*. State of the art in the European Community Context. Third International Landfill Simposium, Cagliari, Italy 1991
- [24] HARTZ K, y KLINK R. *Temperature effects: Methane Generation from Anaerobial Digestion*. Journal of the Enviromental Engineering Division, Proceedings of American Society of Civil Engineeris, 1981
- [25] HERNÁNDEZ, A. *Tratamiento de Basuras Domésticas Mediante la Digestión Anaeróbica*. Instituto de Asuntos Nucleares IAN, Bogotá 1985
- [26] HERRERA, T., LANG, R, y TCHOBANOGLOUS, G. *A Study of the Emissions of Volatile Organic Compounds Found in Landfills*. Proceedings of the 43rd Annual Purdue Industrial Waste Conference, Lewis Publishers, Chelsa, MI, 1989.
- [27] HOUSE D. *The complet biogas handbook*. s.e 1978
- [28] ITINTEC.: "Biodigestores, manejo y operación". Lima Perú. 1983
- [29] KISKER, J. V. L. *A Comprehensive Reporton the Status of Municipal Waste Combustion*. En: Waste Age, noviembre 1990
- [30] KLAUS Von Mitzlaff.: *Engines for biogas*. Estocolmo. Suecia 1988
- [31] LANG R. J.; HERRERA, T, y TCHOVANOGLOUS, G. *Trace Organic Constituents in Landfill Gas*. Waste Management Board, Departament of Civil Engineering, University of California, 1987
- [32] LANG, R. J., STALLARD, W. M, STIGLER, L., HERRERA, T. A., CHANG, D. P. Y., y TCHOBANOGLOUS, G. *Summary Report: Movement of Gases in Municipal Solid Waste Landfills*, University of California, Davis CA. 1989
- [33] LANG R.J., y TCHOVANOGLOUS. *Movement of Gases in Municipal Solid Waste Landfills: Appendix A, Modelling the Movement of Gases in Municipal Solid Waste Landfills*, preparado para California Waste

- Management Board, Department of Civil Engineering, University of California, 1989
- [34] LAWRENCE, A. W, y McCARTY, P.I. *Kineticsof anaerobic digestion*. Journal Water Pollution Control, 1979
- [35] LEE, J.J, y KIM, J.O. *Computer and Experimental Simulations of the Production of Methane Gas from Municipal Solid Waste*, Water Sciencia and Technology, Volume 27, 1993
- [36] LUDWIG, S. *La Planta de Biogás*. Eschbrom. 1984
- [37] McADAMS, Ch. L.: *Venice Park Landfill. Working whit the Comunity*, Journal Waste Age 1993
- [38] MONROY, O. *Biorreactores Anaerobios*, Cuernavaca, Mexico. 1977
- [39] MOSHIRI, G. A., y MILLER, C. C.: *An Integrated Solid Waste Facility Desing Involving Recycling, Volume Reduction, and Wetlands Leachate Treatment*, Universidad de Florida, 1992
- [40] NORIEGA, D. R. *Análisis Utiles en Digestión Anaerobia*. Seminario Internacional sobre Digestión Anaerobia. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 1989
- [41] NOZHEVNIKOVA, A. N., NEKRASOVA, V. K., LEBEDEV, V. S., y LIFSHITS, A. B. *Microbiological Processes in Landfills*, Water Sciencia and Technology. 1993
- [42] OPS/BID, Organización Panamericana de la Salud- Banco Interamericano de Desarrollo. *Diagnóstico de la Situación de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe*, 1997
- [43] PINEDA, S. *Manejo y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos*. ACODAL, Bogotá. 1998
- [44] POHLAND, F.G. *Critical Review and Summary of Leachate and GasProduction from Landfills*, EPA/600/S2-86/073, U. S. EPA Hazzardous Waste Engineering Reseach Laboratory, Cincinnati, OH, 1987
- [45] PRINS, Mark. From *Municipal Solid Waste to Biomass Gasification* ECOS 2003 16th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Copenhagen, Denmark. 2003
- [46] Revista Residuos, año VII. No 38.1997
- [47] Revista Residuos, año VII. No 39.1997
- [48] SADAT INTERNATIONAL INC, Universidad de los Andes, Artur D Little Inc. *Informe del Diagnóstico Geotécnico y Ambiental de las Causas del Deslizamiento en el Relleno Sanitario de Doña Juana*. Santafé de Bogotá. 1997
- [49] SALVATO, J. A.; WILKIE, G, MEAD, B. E.: "Sanitry Landfill-Leaching Prevention and Control", Journal Water Pollution Control Federation, vol. 43, número 10, 1971
- [50] SCS ENGINEERS, INC.: "Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills". Volume I. Landfill Leachate monitoring and Control Systems, California Waste Management Board, Sacramento, CA, 1989
- [51] SCS ENGINEERS, INC. *Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills*. Volume II. Landfill Leachate monitoring and Control Systems, California Waste Management Board, Sacramento, CA, 1989
- [52] TCHOVANOGLOUS, G. HILARY, T, y SAMUEL, V. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Volumen I. Traducido por Tejero, J,; Gil, J, y Szanto, M: de la Primera Edición en Ingles: Integrated Solid Waste Management. 1994
- [53] WAGNER, T. P. *Hazardous Waste Regulations* 2ns ed., Van Nostrand Reinhold, New York. 1991.
- [54] YOUNG, P. J., y HAESMAN, L. A. *An Assessment of the Odor and Toxicity of the Trace Components of Landfill Gas*, Silver Spring, MD. 1985.

INFOGRAFÍA

- [55] www.internet.com.mx/editorial/basuras
- [56] <http://www.hce.energyco.com>
- [57] <http://www.umwelt.inmedi.com.ec/biogas>
- [58] <http://www.censolar.org>
- [59] <http://www.habitat.aq.upm.es/org>