

Producción de hidrógeno a partir del metano que emiten los desechos orgánicos

Por Alejandro Jaramillo Luconi

Este proyecto pretende atacar varios problemas de índole ambiental y energética a la vez, comenzando inicialmente por el que más afecta a los ecosistemas que existen en Costa Rica: la contaminación de aguas debido a la falta de tratamiento de aguas residuales. Esta situación no ocurre necesariamente por la falta de sistemas sanitarios adecuados, sino por la falta de atención que se les da, sea por negligencia o porque implican costos que los usuarios no siempre están dispuestos a pagar, puesto que sus respectivos sistemas no les afectan directamente.

Al desarrollar un mecanismo que además de tratar aguas residuales y/o desechos orgánicos de diversos tipos, también logre generar un bien que genere ahorros e incluso ingresos, es posible motivar a las personas a que dicho mecanismo funcione adecuadamente en todo momento.

Por otro lado, si hubiera que analizar la búsqueda del hombre para la generación de energía, se puede observar que a medida que avanza la tecnología, también lo hace el rendimiento de los combustibles utilizados, y se puede ver claramente el proceso de descarbonización que ello supone.

Es fácil determinar que el siguiente paso inevitable para solucionar la creciente demanda de energía debe ser una fuente renovable de energía, donde su producción se produce a tasas superiores a su consumo. Además, es necesario continuar la tendencia a buscar fuentes de energía cada vez más puras y más fácil de trabajar, en términos de simplicidad en la reacción de combustión.

Es evidente que con el tiempo el mundo no tendrá la necesidad de recurrir a hidrocarburos, cuyas emisiones se liberan en la atmósfera en forma de gases contaminantes. Un candidato para sustituir a los combustibles actuales es el hidrógeno (H₂), cuya combustión tiene como residuo agua pura.

Esta investigación tiene por objeto proporcionar un medio para resolver situaciones difíciles que afectan a muchas personas alrededor del planeta, al mismo tiempo ser capaz de producir un combustible, que ha sido pensado por muchos autores como el almacenamiento de energía más limpio y eficiente que el hombre conoce hasta la fecha.

Descripción del problema

Contaminación de cuencas hidrográficas.

La contaminación de las cuencas hidrográficas en Costa Rica es un problema creciente, que va ligado con el aumento de proyectos en el área de la construcción (habitacionales, comerciales o de industria), que aunque cuenten con un diseño adecuado para el tratamiento de aguas residuales, presentan deficiencias que pudieron surgir tras una serie de posibilidades: falta de mantenimiento adecuado, por desinformación o desinterés de las personas o entidades correspondientes. Tales deficiencias son causantes, en gran medida, de la contaminación de los cuerpos de agua. Ante esta situación, se lograron obtener los siguientes datos:

- 3 m³/s de aguas residuales son descargadas sin ningún tipo de tratamiento a los ríos de la GAM.
- 3,5% de las viviendas de la GAM dispone de alcantarillado sanitario; sin embargo, la mayoría ha sobrepasado su vida útil.
- 67% de las viviendas de la GAM posee tanques sépticos, donde un 70% no funciona, debido a la falta de mantenimiento asociada a la negligencia de algunos usuarios, o al hecho que en ocasiones el uso de esta tecnología no es adecuada para la instalación de zonas de drenaje asociadas a dichos tanques.

La Cuenca del Río Tárcoles, que representa el 4,2% del territorio, sirve de ejemplo para identificar la realidad nacional, pues alberga al 55% de la población costarricense, al 80% de las industrias y en ella se procesa más del 50% de la producción de café y la actividad agrícola y pecuaria ocupa un lugar sobresaliente. Irónicamente, siendo una cuenca tan importante para el país, recibe cerca del 67% de la carga orgánica del país y es una de las cuencas más contaminadas de toda Centroamérica.

En la Figura 1 se muestra que las fuentes de mayor peso en la contribución de DQO en la cuenca del Tárcoles son las aguas residuales domésticas, las aguas residuales industriales y las aguas drenadas por el alcantarillado pluvial con un 42%, un 33% y un 18% respectivamente.

En la Figura 2 se puede observar que gran parte de la concentración del DQO es atribuible al sector agropecuario y alimentario. Con esto es evidente que al concretar soluciones prácticas para los efluentes de estas actividades, se corregirá gran parte del problema de la Cuenca del Tárcoles.

Lógicamente no sólo se trata de un problema de salud para la población que habita en la cuenca del Tárcoles, sino que además de una condición que atenta contra la vida en general dentro de los diferentes ecosistemas en ella.



Figura 1

Fuente: Dirección de Gestión de Calidad del Ambiente, MINAET

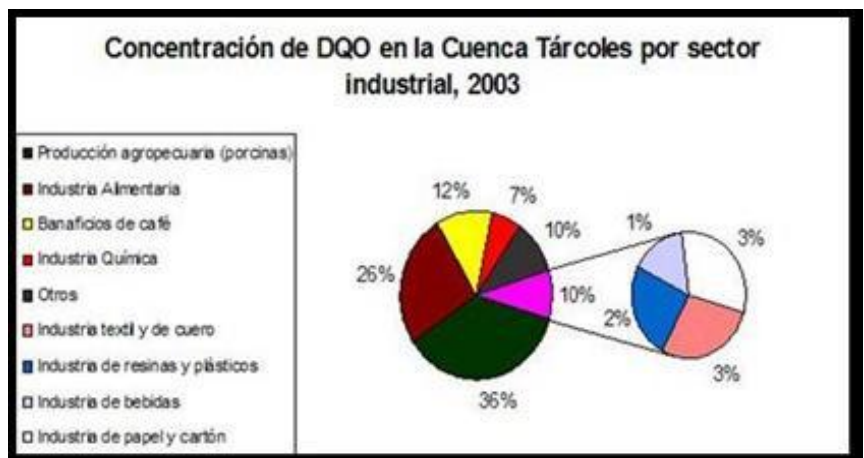


Figura 2

Fuente: Dirección de Gestión de Calidad del Ambiente, MINAET

Generación creciente de desechos sólidos.

En la Figura 3 que se muestra a continuación, se observa el crecimiento continuo en la producción per cápita de basura que se ha presentado en tiempos recientes dentro de la GAM.

Como bien se entenderá por la descripción del gráfico, se trata de la cantidad de basura que cada individuo genera por día. Esto es una realidad más alarmante, de lo que sería simplemente una figura que mostrara el crecimiento total de la producción de residuos sólidos, pues tal análisis podría suponer, que se debe principalmente al crecimiento de la población.

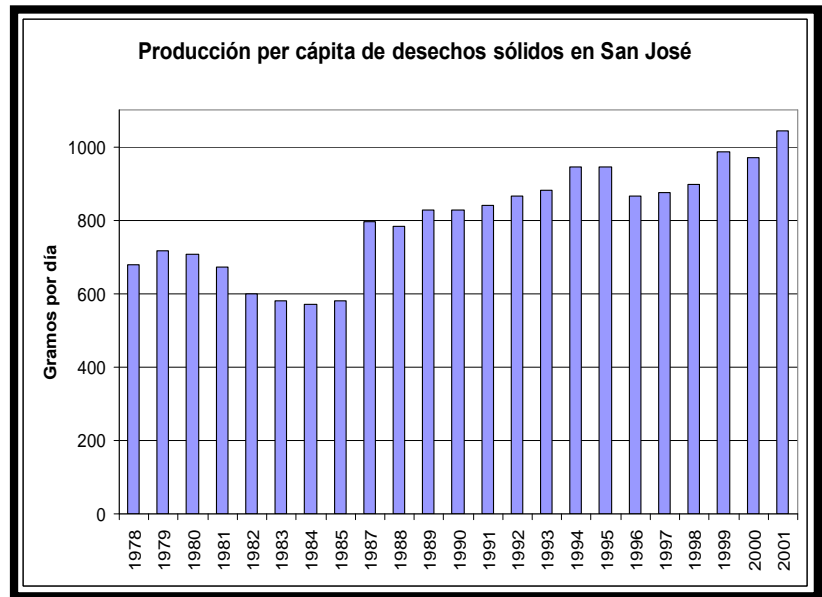


Figura 3

Fuente: Dirección de Saneamiento Ambiental. Municipalidad de San José.

El crecimiento de la población es también un factor fundamental en cuanto a las proyecciones de generación de residuos sólidos, un aumento en la producción per cápita constituye un acelerador muy importante que justificaría con mayor razón la implementación de tecnologías que permitan reusar, reciclar o de alguna manera aprovechar los desechos como recursos secundarios.

Composición de Residuos Sólidos

La información descrita se graficó en la Figura 4, donde se muestra que en promedio un 60% de la basura que se dispone en las municipalidades estudiadas corresponde a desechos putrescibles u orgánicos, que son los de mayor interés para el presente trabajo.

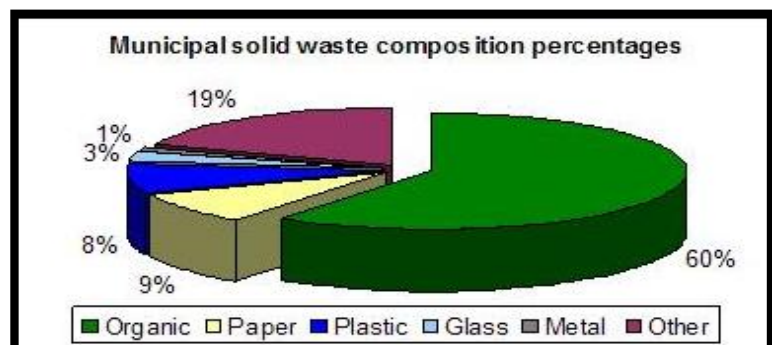


Figura 4

Fuente: ProDUS, 2007

Crisis energética.

En Costa Rica, actualmente un 92% de la energía producida se obtiene a partir de recursos limpios y renovables, como lo son las fuentes hidroeléctricas, geotérmicas y eólicas, que representan un 75%, 14% y 3%, respectivamente. Además, se presenta un 8% que se atribuye a la generación eléctrica a partir de plantas térmicas, pero esto no siempre fue así.

En la Figura 5 se muestra una serie donde se observa que en Costa Rica se está generando cada vez más electricidad a partir de hidrocarburos y a la quema de biomasa, lo que llevaría a pensar que el tema de generación eléctrica en el país es uno que en lugar de progresar, va más bien en retroceso.

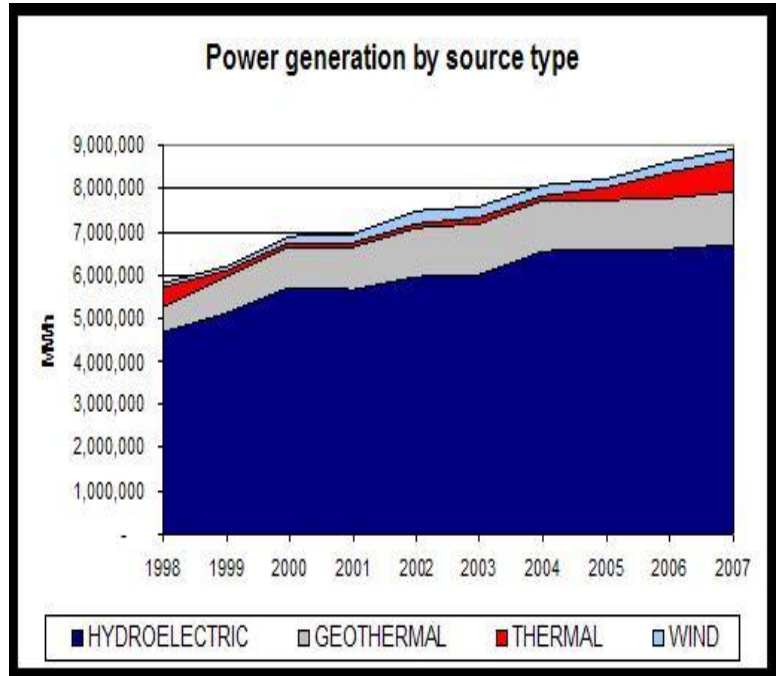


Figura 5

Fuente: ARESEP, 2008

La ironía de esta realidad es que cada vez se consume más de un bien importado que cada vez alcanza precios más insostenibles para la economía (bunker). Es claro que la factura del petróleo es un agente que golpea severamente el bolsillo del consumidor no sólo directamente (por autoconsumo) sino también indirectamente, porque implica el aumento de los precios de casi todos los demás productos en el mercado, debido a que los productores deben gastar más no sólo por el aumento de precios de transporte, sino además de manufactura y ahora también de electricidad.

La Biodigestión Anaerobia

Es la descomposición de residuos orgánicos que ocurre por procesos biológicos ante la carencia de oxígeno. A través de ella, se produce en fase gaseosa una mezcla de CH₄, CO₂, vapor, H₂S, O₂ y trazas de otros compuestos; dicha mezcla se conoce como biogás. La etapa en la que se produce el metano del biogás se conoce como metanogénesis.

La composición y características de este gas, depende fuertemente de las condiciones de pH, temperatura, características de los residuos, relación Carbón/Nitrógeno, etc. Es oportuno mencionar que la composición del biogás, siendo producto de un proceso biológico, depende del sustrato utilizado. A continuación, se presenta la Tabla 1, que señala los diferentes componentes y su presencia en porcentajes en función de algunos sustratos comunes.

Tabla 1. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	46-65%
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Ácido sulfhídrico	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100 ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Fuente: Tsagarakis, K. (2006)

Sistemas de obtención de biogás

Chimeneas de biogás en rellenos sanitarios

En las siguientes dos figuras se aprecia que no sólo la cantidad de biogás varía con los años, sino también su contenido. Esto constituye una limitante muy grande para el sistema que se desarrolla, dado que si bien por este medio se podrían producir cantidades considerables de biogás, su contenido de metano es prohibitivamente bajo, especialmente durante los primeros 5 años de operación del relleno; incluso cuando el contenido de metano llega a su punto más alto, éste no suele superar el 60%. Esto implicaría la necesidad de recurrir a sistemas de purificación del biogás muy complicados y costosos.

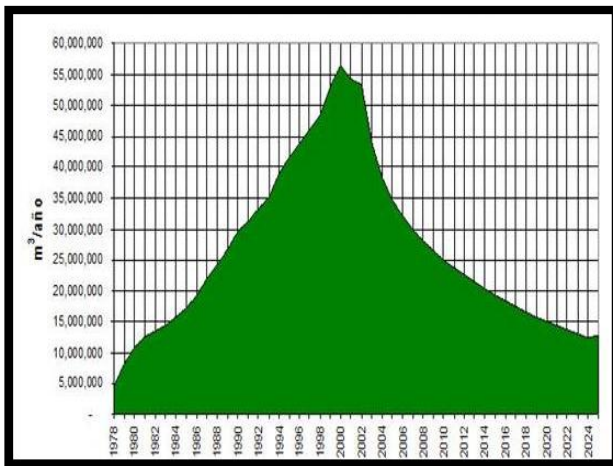


Figura 6

Fuente: SARET, 2007.

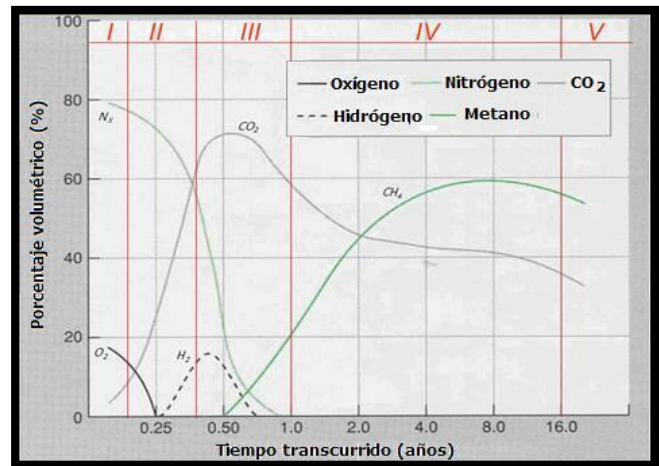


Figura 7

Fuente: www.minem.gob.pe

Por otro lado, se conoce que aun durante gestiones adecuadas del relleno, la eficiencia de recolección de biogás es generalmente muy baja, y que es normal operar con eficiencias máximas inferiores al 35%. Por todo lo anterior se descartó el uso de biogás proveniente de rellenos sanitarios.

Biodigestores

Dentro de los biodigestores se generan gránulos bacteriales que se alimentan de la materia orgánica que se sedimenta en el digestor. Mediante el uso de biodigestores se puede aprovechar la digestión anaerobia de las bacterias para transformar los desechos orgánicos en biogás y fertilizante.

Hay tres tipos generales de biodigestores, dos de los cuales son intermitentes, el otro se basa en un flujo continuo.

La Figura 8 muestra un reactor de mezcla completa, en el que se puede alcanzar la uniformidad del contenido.

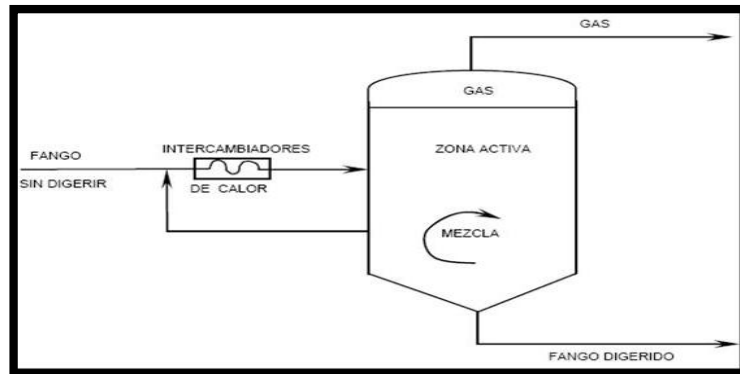


Figura 8
Fuente: Montes, 2008

Sin embargo, es posible utilizar reactores intermitentes sin mezcla, pero son menos utilizados debido a los olores y a la inconveniencia de tener que purgar los lodos con métodos mecánicos. Figura 9 ilustra una no mixta tanque del reactor.

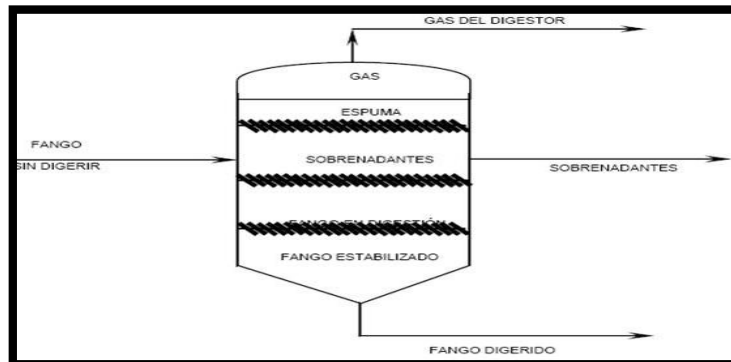


Figura 9
Fuente: Montes, 2008

Un reactor de flujo, es aquel en el que el material entra por un extremo al reactor, y mientras cruza, la reacción esperada se produce. Para asegurar que la reacción se está produciendo en su totalidad, es necesario proporcionar a sus dimensiones adecuadas. La Figura 10 muestra las secciones dentro de un reactor de flujo continuo.

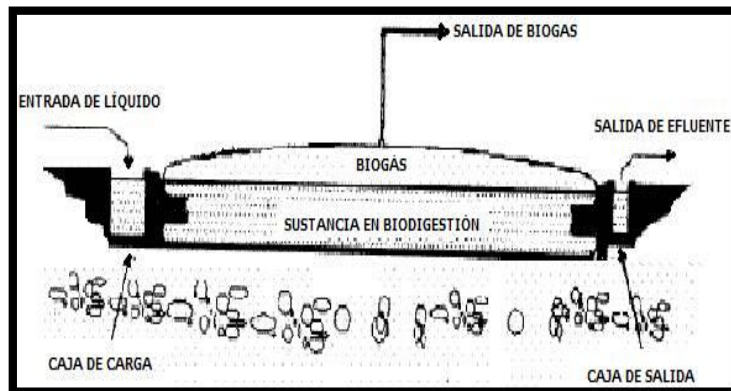


Figura 10
Fuente: Heinke, 1999.

Factores que afectan la metanogénesis en biodigestores

Temperatura

La mayoría de los digestores convencionales funcionan en rango mesofílico, entre los 20 y 33°C. En la Figura 11 se muestra cómo varía la eficiencia, presentada en tiempo de digestión, en función de la temperatura en el sistema.

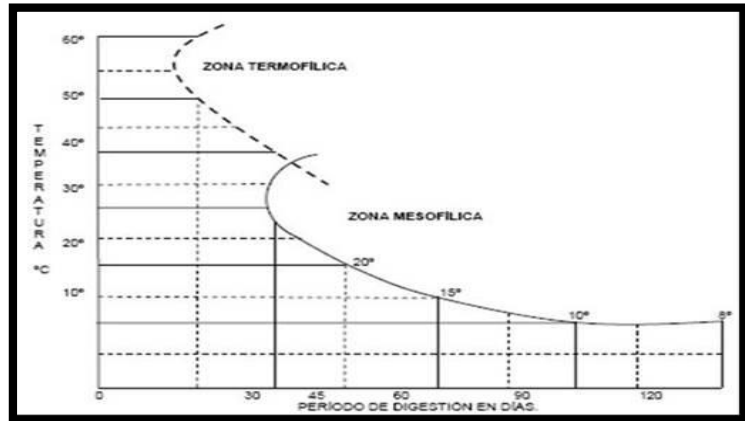


Figura 11
Fuente: Montes, 2008

Factor de mezclado

Es conveniente que el contenido del digestor sea mezclado completamente de una forma continua. La ventaja de esto es que se mantiene la homogeneidad térmica, previniendo la estratificación. Además se provee un mejor contacto, de forma continua y uniforme, entre microorganismos activos y su alimento.

El tiempo de retención

Los biodigestores funcionan con un tiempo de retención hidráulico próximo a los 10 días, luego de la inoculación de la mezcla, que tarda unos 50 días. Esto se debe a que la regeneración de las bacterias metanogénicas es de aproximadamente 10 días a 35°C.

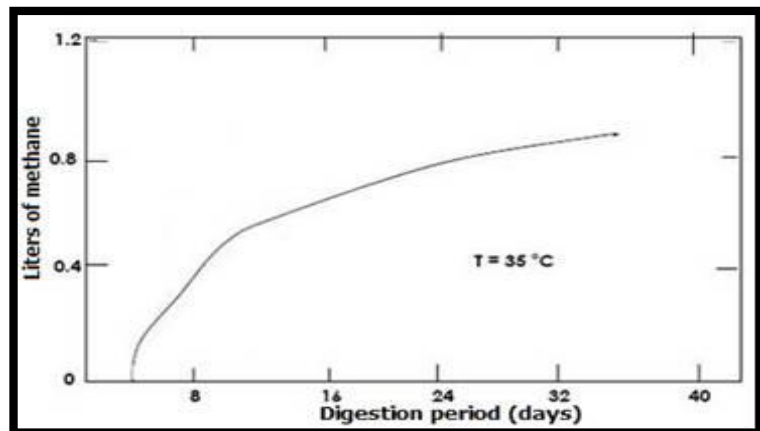


Figura 12
Fuente: Montes, 2008

El pH

Por debajo de pH 6,2; la supervivencia de las bacterias metanogénicas es imposible. Como los lodos digeridos tienen un pH entre 7 y 8, esto los hace un medio adecuado para el crecimiento de microorganismos.

Los ácidos volátiles

El rango óptimo de ácidos volátiles está entre 50 y 500 mg/l como ácido acético, siendo un valor extremo 2000 mg/l. Una gran concentración puede provocar la disminución del pH y, en consecuencia, inhibición de las bacterias formadoras de metano.

Inhibición de metanogénesis en Aguas Residuales

Las principales causas de que generalmente se les atribuya a las aguas residuales un grado de metanogénesis bajo, en comparación a otros residuos que podrían utilizarse para la biodigestión anaerobia son:

- Un exceso de agua presente en la mezcla.
- Toxicidad amoniacal y desbalance de la relación C/N.

Se ha determinado que tal inhibición puede solucionarse si se separan las aguas jabonosas de las provenientes exclusivamente de los inodoros, utilizando estas últimas para activar el proceso. Además puede reducirse la cantidad de agua presente mediante dispositivos de bajo consumo, como inodoros de doble descarga. Por último, es recomendable aplicar, en la medida de lo posible, la codigestión con otros residuos orgánicos.

Codigestión de desechos

Consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes, con el propósito de que sirvan como complemento para aumentar la eficiencia, amortiguando las variaciones en producción de cada residuo por separado. Otra ventaja de esta posibilidad es que se compartirían instalaciones de tratamiento para más de un material de desecho.

Purificación de biogás

Estudios realizados para otras investigaciones han determinado que un buen método para aumentar el contenido de CH₄, y disminuir el porcentaje de H₂S, es hacer pasar el biogás a través de una solución de CaO en agua en una proporción másica de tres partes de agua por cada parte de CaO. Esto permite aumentar el %CH₄ en 12% y disminuir el %H₂S en 85%, en promedio.

Una vez que se ha saturado esta solución, se tiene un producto que corresponde a CaSO₄, también conocida como yeso, que puede utilizarse como mejorador de suelos, específicamente suelos alcalinos.

Hidrógeno a partir de metano: Catálisis Mediante Microondas

Es la absorción de microondas por materiales carbonosos, cuando ocurre una reacción química superficial simultánea. Varios autores han encontrado que este proceso requiere menos energía para algunas reacciones químicas, en contraste con la calefacción global de un recipiente que contenga a los compuestos.

El material carbonoso actúa como amortiguador de microondas, por su amplia gama de impurezas polares, que interactúan con la energía de radiofrecuencia de una manera más directa que con otros compuestos polares. Algunos catalizadores carbonosos pueden ser: Carbón activado, carbón de leña, hollín, carbón de leña activado, carbón pirolítico o carburos de metal.

Se han revisado algunos experimentos en los que se busca obtener la proporción másica ideal entre los gases entrantes al reactor de microondas (CH₄, O₂ y H₂O).

De las pruebas que utilizaron carbón activado con una energía de microondas de 800 Watts, una de ellas consistió en variar la proporción de CH₄, mientras las proporciones de O₂ y vapor se mantuvieron constantes. La segunda prueba duplicó la cantidad de vapor, mantuvo la cantidad de metano constante y varió la proporción de O₂. Ambas pruebas se resumen en las siguientes figuras:

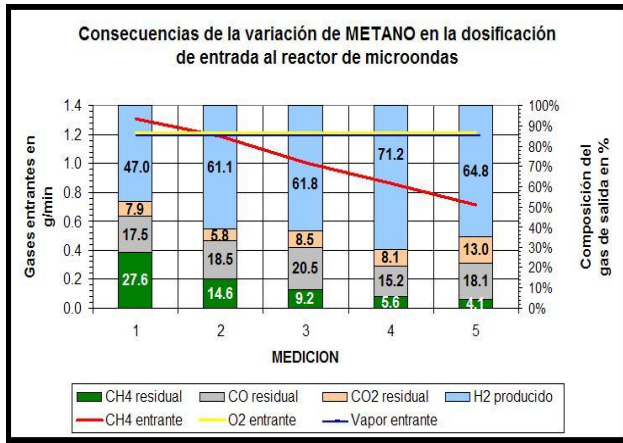


Figura 13
Fuente: Cha, 2003

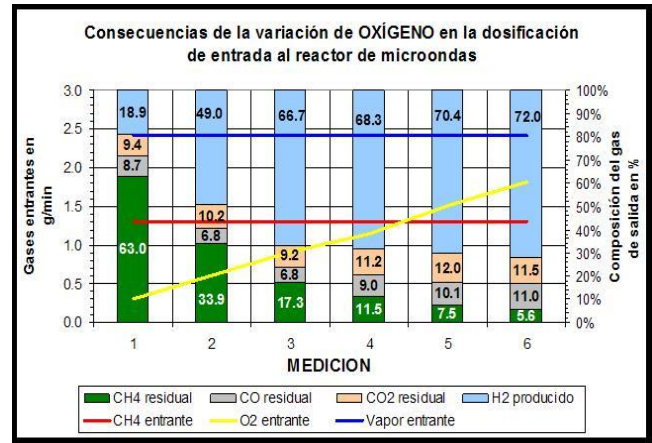


Figura 14
Fuente: Cha, 2003

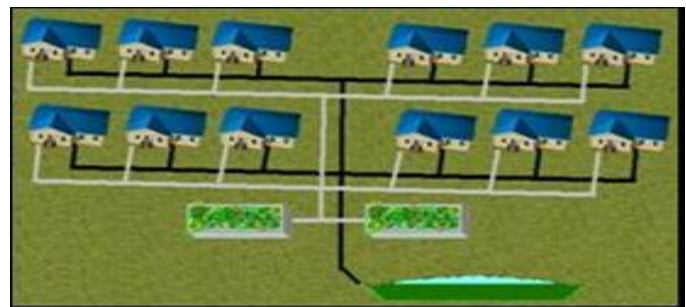
A partir de esta información, se decidió que la proporción másica ideal corresponde a: $[CH_4 : O_2 : H_2O] = [5 : 7 : 7]$.

Diseño del sistema planteado

El sistema planteado corresponde a uno que procesa aguas residuales domésticas (exclusivamente las provenientes de inodoros) provenientes de una población de 50 habitantes equivalentes; sin embargo, se mantiene abierta la posibilidad de aplicar codigestión con otros residuos orgánicos.

Este estudio exploró la Codigestión de aguas residuales con desechos de comida. Para efectos de no dejar cabos sueltos y lograr cerrar completamente los ciclos de gestión, se recomendó el uso de dos biojardineras que traten el resto de aguas residuales que no entran al biodigestor (aguas jabonosas).

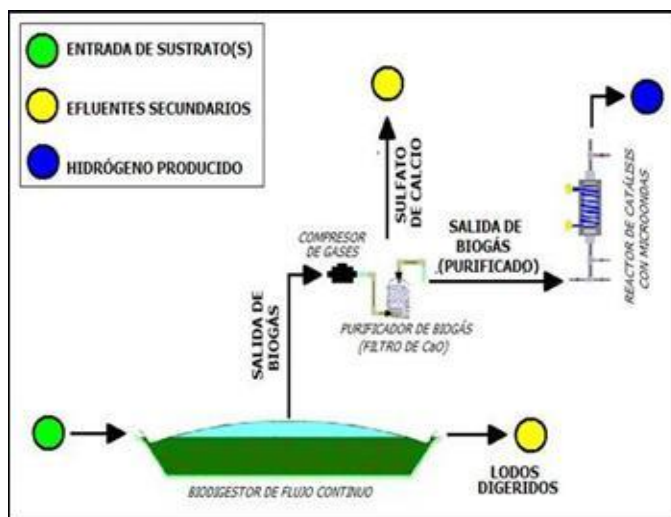
Además se partió del hecho que cada individuo consume diariamente cerca de 70 l/hab/día al utilizar inodoros convencionales, pero como se asumió que todos utilizan inodoros de doble descarga, este valor se reduce al 55%.



Se utiliza un biodigestor de flujo continuo de 28m de longitud, parcialmente enterrado a una profundidad de 1,5m; capaz de almacenar hasta 63 m³ de material por un periodo de 30 días, con un volumen adicional de 16 m³ para el almacenamiento temporal de biogás. Las variables de cálculo se resumen en la siguiente tabla:

	Aguas Residuales	Codigestión
DBO	40 g/hab/día	60 g/hab/día
Remoción	90%	90%
DQO	80 g/hab/día	120 g/hab/día
Remoción	40%	47%
SS	55 g/hab/día	90 g/hab/día
Remoción	55%	60%
SV	60 g/hab/día	80 g/hab/día
Remoción	80%	80%

Una vez que los residuos entran debidamente mezclados en el biodigestor y se activa el mecanismo de digestión anaerobia, se separan los lodos digeridos hacia lechos de secado para dar paso a un proceso de compostaje. El biogás producido pasa a un filtro de CaO, cuya saturación genera CaSO_4 , que puede utilizarse como mejorador de suelos. El gas purificado, cuyo contenido de CH_4 debe ser superior al 80%, se introduce junto con un adicional de O_2 y vapor en un reactor de catálisis con microondas utilizando un catalizador de carbón activado. El siguiente esquema ilustra lo anterior:



Conclusiones

El insumo ideal consiste en una combinación de la fracción orgánica de aguas residuales domésticas en codigestión con otros desechos orgánicos. Se estudió esta combinación utilizando 60g de desechos de comida por cada 100 litros de aguas residuales, y se verificó que la cantidad de gases útiles fue mayor. Para esto se utilizó una población de 50 habitantes.

La reducción en el consumo de agua puede alcanzarse mediante el uso de dispositivos de bajo consumo. Al utilizar inodoros de doble descarga, tal consumo puede reducirse al 55%.

La purificación del biogás puede realizarse mediante un filtro de CaO, y sólo es necesaria para alcanzar un contenido de metano superior al 80%, porcentaje mínimo para activar el proceso de reformado de metano.

Los lodos digeridos pueden conducirse a lechos de secado, luego de lo cual son introducidos en procesos de compostaje, para ser utilizados como abono para cultivos que no sean para el consumo humano.

La cantidad diaria de metano esperado corresponde a valores entre 0,70-1,75 m^3/d con una pureza inicial del 70%. El filtro de CaO es capaz de aumentar este porcentaje en 12%.

El sistema de reformado de CH_4 corresponde al de catálisis con microondas, que con las cantidades de CH_4 indicadas se pueden generar entre 12-30 m^3/d con una pureza del 71%.

El ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero esperable es entre 4-9 Ton CO_2eq .

Con este sistema se logran aprovechar materiales de desecho de manera eficaz e inteligente para producir un bien, y finalmente un ingreso anual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

1. Angelidaki, I.; Ellegaard, L. (2003). **Applications of the anaerobic digestion process**. Springer. Berlin-Heidelberg, Germany.
2. Cook, N. (1986). **Microwave Principles and Systems**. Prentice-Hall. EEUU.
3. Heinke, G. (1999). **Ingeniería ambiental**. Prentice Hall. México.
4. Hernández, A. (2001). **Depuración y desinfección de aguas residuales**. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Quinta edición. España.
5. Kirk-Otmer (1985). **Encyclopedia of Chemical Technology**. Tercera Edición. Editorial Wiley & Sons. EEUU.
6. Metcalf y Eddy. (1998). **Ingeniería de aguas residuales**. Tercera Edición. McGraw Hill. México.
7. Metcalf, Leonard y Eddy. (1981). **Tratamiento y depuración de las aguas residuales**. Segunda Edición. Editorial Labor. España.
8. Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica. (2007). **Diagnóstico y Áreas Prioritarias**. San José, Costa Rica.
9. Rifkin, Jeremy. (2002). **La economía del hidrógeno: la creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra**. Editorial Paidós. Barcelona, España.
10. Speight, James. (2007). **The Chemistry and Technology of Petroleum**. Cuarta Edición. CRC Press. Wyoming, EEUU.
11. The Columbia Encyclopedia. (2007). **Hydrogen**. Sixth Edition. Columbia University Press. New York, United States of America.
12. Tsagarakis, K., Papadogiannis, CH. (2006). **Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio Municipality, Grece**. Energy Conservation Management 47, 844-857.

TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

13. Barrantes, David. (2004). **Generación de energía a partir de hidrógeno**. Trabajo de Graduación de Bachillerato en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
14. Botero, R.; Noguiera, T.; Lansing, S. (2007). **Codigestión de excreta porcina y aceite de cocina usado en un biodigestor de bajo costo: Producción de metano y transformación de aguas residuales**. EARTH. Limón, Costa Rica.
15. Botero, R.; Viquez, J.; Martínez, H. (2006). **Optimizando la generación de electricidad y transformación de desechos en un sistema de digestión anaeróbica de flujo continuo y bajo costo**. EARTH. Limón, Costa Rica.
16. Camacho, Elaine (2005). **Evaluación técnica-económica de diferentes accesorios de bajo consumo de agua aplicados en Costa Rica**. Trabajo de Graduación para optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
17. Conestoga Rovers. (2004). **Manual para la Preparación de Proyectos de Generación de Energía a partir del Gas de Rellenos Sanitarios en América Latina y el Caribe**. Programa de Asistencia para la Administración del Sector de Energía del Banco Mundial. Ontario, Canadá.
18. Elizondo, K. (2007). **Diagnóstico del cierre técnico del relleno sanitario de Río Azul**. Trabajo de investigación, Programa Institucional de Gestión Ambiental Integral (ProGAI), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

19. Espinoza, C.; Villalta, R. (2004). **Estudio sobre la contaminación de la cuenca de los ríos Virilla y Grande de Tárcoles**. Informe Final de la Primera Etapa del Plan de Manejo Integral del Recurso Hídrico. MINAET. San José, Costa Rica.
20. Gregorini, Virgilio (NA). **Análisis técnico-económico de la producción de hidrógeno a partir de materias primas renovables y su aplicación a pilas de combustible para fuentes móviles**. Trabajo de investigación del Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
21. López, Natalia. (2006). **Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua**. Trabajo de Graduación de Bachillerato en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
22. N.D. (2004). **Contaminación en los ríos de la cuenca del Río Grande**. Trabajo de investigación del Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
23. Mahecha, Jeffrey. (2003). **Elaboración de un plan para el mantenimiento y monitoreo post-clausura del Relleno Sanitario Río Azul**. Trabajo de Graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
24. Montes, María E. (2008). **Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás**. Trabajo de Graduación de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
25. Reaz, Avizit. (2006). **Study on the Reuse of Human Excreta in Bangladesh**. IRC: International Water and Sanitation Centre. Bangladesh.
26. Roldán, Carlos; Spazzafumo, Giuseppe. (2006). **Análisis actual y tendencias futuras de la producción de electricidad a partir del uso del hidrógeno**. Informe Final para el Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.
27. Trejos, José J. (2007). **Diagnóstico y Soluciones a los Servicios de Saneamiento Ambiental en la Comunidad San Martín, Ubicada en Jiménez de Pococí**. Trabajo de Graduación para optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
28. Vargas, Jorge E. (2001). **Estudio preliminar: Situación actual del composteo y vermicomposteo en Costa Rica y recomendaciones técnico-económicas**. Trabajo de Graduación para optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

REVISTAS Y PERIÓDICOS

29. Avalos, Ángela. (2007, 30 de diciembre). **Millones de litros de aguas residuales caen sin tratar a los ríos**. La Nación, País p.6.
30. Barlett, Albert. A. (1999). **Reflexiones sobre sostenibilidad, crecimiento de la población y medio ambiente**. Revista Focus, 9, 49-68.
31. Botero, R.; Maldonado, J.; Coto, J.; Murillo, J. (2007). **Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH**. Tierra Tropical 3(2): 129-138. EARTH. Limón, Costa Rica.

INTERNET

32. Campero, Oliver (2001). **Biodigestores para uso habitacional**. Recuperado el 20 de Marzo de 2008 de www.ruralcostarica.com/biogas-bolivia.asp
33. Cha, Chang Yul. (15 de Julio de 2003). **Process for efficient microwave hydrogen production**. Recuperado el 10 de Diciembre de 2008, de <http://www.freepatentsonline.com/6592723.html>.
34. Fernández, Álvaro. (1998) **¿Cómo se ha enfrentado el desafío del Desarrollo Sostenible en el plano mundial y Centroamericano?** Recuperado el 15 de Julio de 2008, de <http://www.mideplan.go.cr/>
35. Moreno, Mary (n.d.). **Valoración económica del uso de tecnologías de saneamiento ecológico para aguas residuales domiciliarias en el Área Metropolitana de San José**. Recuperado el 15 de Abril de 2009 de la página web www.una.ac.cr/redibec-cisda/ponencias/Valoracion/Mary.pdf
36. Sandoval, Leandro. (n.d). **Recuperación del biogás en el relleno sanitario de Ancón (CASREN)**. Recuperado el 31 de Agosto de 2008 de la página <http://www.minem.gob.pe>
37. Wikipedia (2009). **Dihidrógeno**. Recuperado el 20 de Mayo de 2009 de la página <http://es.wikipedia.org/wiki/Dihidr%C3%B3geno>
38. Zittel, W., Wurster, R. (1996). **Hydrogen in the energy sector**. Recuperado el 12 de Enero de 2009 de <http://www.netinform.net/h2/Aktuelles.aspx>

ENTREVISTAS

39. Arias, Ana Lorena (2009). Ingeniera ambiental y profesora de la Universidad de Costa Rica. Entrevistada el día 13 de Abril de 2009.
40. Chacón, Luis R. (2008). Ingeniero químico. Entrevistado el día 11 de Diciembre de 2008.
41. Mora, Bernardo (2008). Ingeniero químico y profesor de la Universidad de Costa Rica. Entrevistado el día 28 de Agosto de 2009.