

Biodigestión anaeróbica a escala piloto industrial de residuos semisólidos generados en la industrialización del limón*

Walter D. Machado**; Myriam R. Urueña**; Eduardo M. Vera van Gelderen**; Martín A. Alonso**

*Trabajo realizado con fondos del Proyecto GEF (Global Environment Facility) TF 090434, con el Banco Mundial como agencia de implementación.

**Estudios Ambientales – Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales (EEAOC), William Cross 3150, CP 4101 - daniel.machado@eeaac.org.ar

RESUMEN

Dada la necesidad de encontrar alternativas para el tratamiento y disposición final de los residuos semisólidos de la industrialización del limón, se abordó el estudio del proceso de biodigestión anaeróbica de estos desechos, constituidos fundamentalmente por restos de pulpa y cáscara. Para ello, se construyó un reactor a escala piloto de 1000 litros de capacidad, con un sistema de mezclado continuo, térmicamente aislado y termostatizado por circulación de agua caliente para mantener la temperatura alrededor de 35°C, óptima para la actividad microbiana que conduce a la formación de metano. Una vez en régimen, se ensayó el proceso con una velocidad de carga orgánica (VCO) de 1 g DQO/L.d y, semanas después, con 2 g DQO/L.d. Se monitorearon la evolución de la DQO y los sólidos totales en los lodos y se registró la producción de biogás. Para conservar la biomasa activa se realizaron operaciones de extracción, sedimentación y recirculación de lodos. Las m ediciones muestran una disminución de la DQO de entrada del orden del 80 % y una generación de biogás superior a los 1000 litros diarios, con un balance energético positivo. Los resultados alcanzados constituyen un aval técnico para continuar esta línea de experiencias a escalas mayores e inclusive con otros sustratos orgánicos de similar naturaleza.

ABSTRACT

Given the necessity to find alternatives for the treatment and final disposition of semi solids wastes from lemon factories, the study of the process of anaerobic biodigestion of this waste was carried out, made up mainly of pulp and peel. For this, a one thousand liter reactor (in pilot scale) was constructed, with a continuous mixer system, thermically isolated and thermostated by a hot water flow in order to maintain a temperature near 35°C, optimum for the microbiology activity that achieves methane generation. Once in regime, the process was tested with a different organic loading rate (OLR), of 1 g COD/L.d and, some weeks later, 2 g COD/L.d. COD changes and the level of solids were monitored and biogas production was registered. In order to retain an active biomass, sludge was extracted, decanted and returned to the reactor. Measurements show a decrease in the initial COD to 80 % and biogas generation of more than 1000 liters per day, with a positive energetic balance. These results constitute technical support to continue this line of testing in higher scales and including with other organic substrates of similar nature.

Key words: anaerobic biodigestion, methanogenesis, bioreactors.

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Tucumán, la industrialización del limón para obtener jugos concentrados, cáscara deshidratada, aceites esenciales y aromas, genera residuos de diversa naturaleza, la mayoría de ellos de tipo orgánico.

Dentro de los residuos orgánicos generados, los más voluminosos son aquellos formados por tejidos y constituyentes originales del limón que son arrastrados por las aguas del procesamiento industrial.

De esta manera y según el orden de los subprocesos fabriles, se van generando diferentes líneas de residuos con diferentes características.

En la línea de extracción de aceite esencial se genera, como desecho, una emulsión con mayor o menor contenido de restos oleosos, dependiendo de la eficiencia de extracción y del tipo de tecnología que se emplee.

Luego se continúa con el proceso de obtención de jugo. La tecnología más difundida emplea un sistema de copas exprimidoras que permiten extraer el jugo y liberar la cáscara, hollejos y semillas en un solo paso. El jugo obtenido suele contener entre 12 y 14 % de pulpa, el cual por un proceso industrial debe ser reducido al porcentaje que requieran los clientes. Para ello se

emplean diferentes equipos dependiendo del grado de despulpamiento que se desee lograr. Entre los equipos diseñados para reducir el contenido de pulpa se pueden mencionar los “finishers”, centrífugas y ultrafiltros. Estos equipos generan residuos acuosos ricos en sólidos en suspensión (pulpa).

Las fábricas que producen cáscara deshidratada tienen un subproceso adicional de lavado de cáscara que genera un efluente con alto contenido de sólidos en suspensión, además de azúcares y otras sustancias disueltas. Por otra parte, éste residuo es el más voluminoso de los producidos en este tipo de industria.

Si bien cada subproceso arroja efluentes de características particulares, ellos tienen en común un elevado contenido de sólidos en suspensión.

Estos sólidos conforman un producto de elevada carga orgánica. Las cantidades generadas, que están en el orden del 6 % de la fruta procesada, expresada en base húmeda, lo erigen en un desecho complicado de manejar y de disponer.

Existen empresas que contemplaron el sistema de lagunaje como alternativa de tratamiento para el efluente líquido integral, sin realizar una separación importante de los sólidos en suspensión.

Otras plantas industriales adoptaron la estrategia de separar parte de los sólidos en suspensión de sus efluentes para compostarlos, ingresando el resto del efluente líquido, aún con algo de sólidos en suspensión, en biorreactores anaeróbicos de mezcla para reducir su carga orgánica y generar biogás aprovechable energéticamente.

Una firma implementó un sistema de tratamiento primario profundo para la total separación de los sólidos en suspensión, obteniendo un efluente líquido translúcido apto para ingresar en biorreactores anaeróbicos de tipo “UASB” (Upflow Anaerobic Sludge Blanket o manto de lodo anaeróbico ascendente), derivando los sólidos separados a tratamiento por compostaje, previa concentración en “decanters”.

Una de las alternativas estudiadas para el tratamiento de los residuos semisólidos, a escala laboratorio, es la biodigestión anaerobia. Urueña *et al.* (2010a) comprobaron la aptitud de este residuo semisólido para ser degradado biológicamente mediante la acción de consorcios de

microorganismos presentes en los lodos recolectados en las lagunas de disposición de efluentes que algunas de las compañías citrícolas emplean como tratamiento. Por los resultados

informados, es posible de reducir biológicamente entre el 70 y el 85% de la DQO inicial de los residuos en cuestión.

Asimismo, en la EEAOC se desarrollaron biodigestores de mezcla completa a escala de laboratorio para producir la degradación controlada de estos sustratos, en un régimen de alimentación por pulsos o semicontinua (Urueña *et al.*, 2010b).

El presente trabajo se propone estudiar la biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos citados, en un reactor de mezcla completa a escala piloto, analizando la estabilidad del proceso y su capacidad para generar biogás. Por la planificación aprobada por el Global Environment Facility (GEF) y el Banco Mundial, entidades que respaldaron financieramente este estudio, la alimentación del biodigestor fue establecida hasta alcanzar una velocidad de carga orgánica (VCO) de 2 g DQO/L.d., proyectando para una etapa futura el estudio a valores mayores.

MATERIALES Y METODOS

Diseño y construcción de la planta piloto

Para abordar el objetivo propuesto se planteó, en primer lugar, el diseño de una planta a escala piloto que permita estudiar el proceso de biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos generados durante la industrialización del limón.

La planta piloto, cuyo esquema se puede apreciar en la Figura 1, consta de las siguientes partes:

- Un reactor de acero inoxidable donde se lleva a cabo el proceso de biodigestión, de 1000 litros de capacidad (1,5 m de altura y 0,96 m de diámetro), con aislación térmica de lana mineral. El sistema de agitación está compuesto de un motoreductor y dos paletas planas de acero inoxidable dispuestas horizontalmente.
- El sistema para mantener la temperatura del proceso está conformado por un termotanque eléctrico que calienta el agua, a no más de 50°C, para que circule a través de un serpentín situado en el interior del reactor, impulsada por una electrobomba centrífuga marca Fema modelo DFVm60. La bomba es accionada automáticamente por
- un termostato marca Novus modelo N 321 NTC, el cual recibe la señal desde un sensor de temperatura ubicado en el interior del reactor.

- El sistema de medición de producción de biogás consta de un caudalímetro o medidor de flujo másico modelo Cole Parmer 32707-30 con display digital, conectado a un indicador de proceso universal marca ABB modelo Commander 150 trabajando en la función totalizador. Previo al ingreso del biogás al caudalímetro se instaló un tanque pulmón de 20 litros que amortigua las fluctuaciones del caudal de biogás mejorando la medición del mismo a la vez que retiene el agua arrastrada por el biogás y el agua condensada en la manguera. Desde la salida del caudalímetro, el biogás es conducido hacia una botella arrestallama y, posteriormente hacia un quemador tipo Bunsen para quemar el biogás generado.

La parte superior del reactor posee una boca para alimentar con residuo semisólido, un manómetro, una válvula de seguridad y la salida de biogás. En la base del reactor se instaló una válvula para la descarga de lodos. En la Figura 2 se puede apreciar una perspectiva del reactor y del sedimentador.

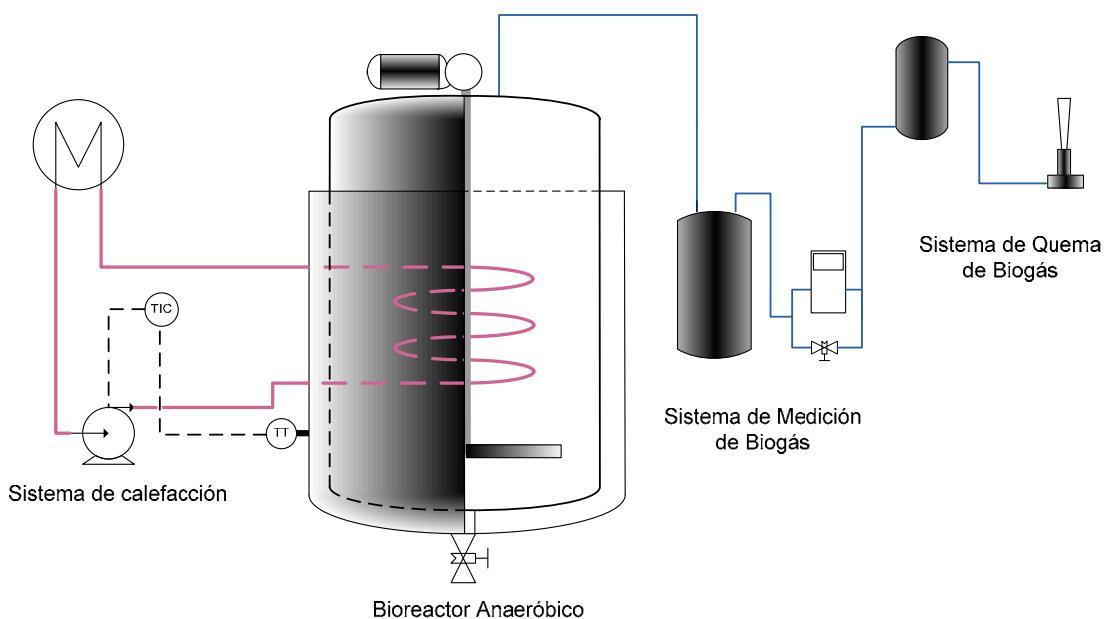


Figura 1: Representación del biodigestor piloto con su sistema de calefacción, sistema de agitación y circuito de biogás hasta llegar al quemador.

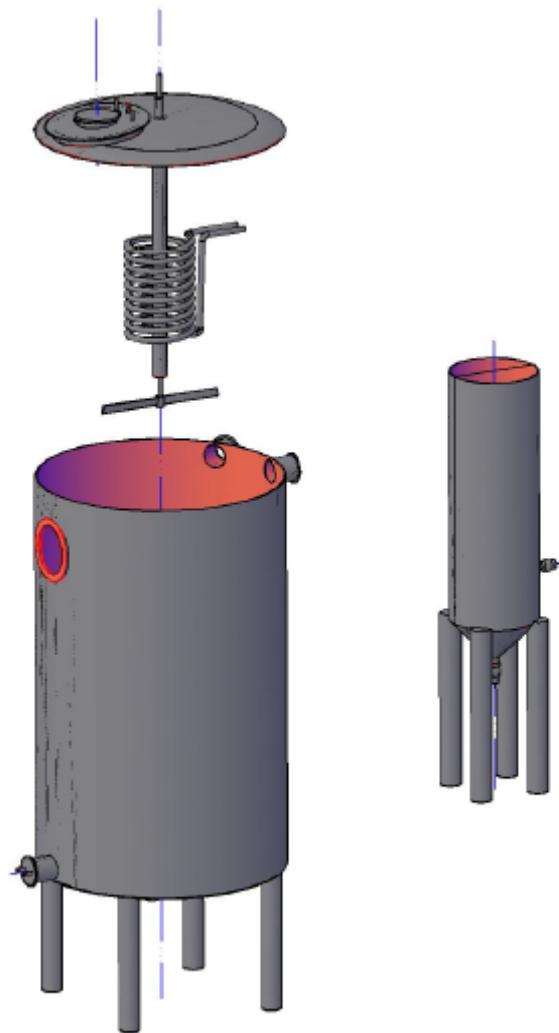


Figura 2: Perspectiva del biodigestor y sedimentador

Como elemento accesorio e independiente del cuerpo del reactor, se diseñó un sedimentador de lodos de 100 L de capacidad construido en acero inoxidable, de forma cilíndrica, con entrada sin tapa en su parte superior y salida discontinua de lodos a través de una válvula de accionamiento manual situada en su base. Su altura es de 1,0 m y su diámetro es de 0,35 m.

Arranque del biodigestor

Se formuló un sistema inicial para el arranque del proceso de biodigestión constituido de la siguiente manera:

- a) **Inóculo:** 400 litros de lodos con actividad metanogénica, provenientes de lagunas de disposición de efluentes cítricos de una compañía local, los cuales contenían 6 g de sólidos suspendidos volátiles por litro (SSV/L). Se emplean los SSV como una medida indirecta de la cantidad de microorganismos presentes en los lodos.
- b) **Sustrato:** residuos semisólidos en una cantidad equivalente a 5 g DQO/L de volumen de trabajo del reactor.
- c) **Bicarbonato de sodio:** 0,5 gramos de bicarbonato por gramo de DQO.
- d) **Micronutrientes:** 80 ml de una solución que contiene nitrógeno, fósforo y metales esenciales como calcio, magnesio, hierro, zinc, cobalto, manganeso y cobre en cantidades traza.

Análisis del sistema inicial

Para la caracterización del sistema inicial de reacción, del sustrato de alimentación y del seguimiento de los lodos del reactor se realizaron las siguientes determinaciones analíticas empleando metodología oficial (APHA, 2005):

pH (SM 4500-H⁺ B)

DQO_T: demanda química de oxígeno total (SM 5220 D).

ST: sólidos totales (SM 2540 B).

SF: sólidos fijos (SM 2540 E).

SV: sólidos volátiles (SM 2540 E).

SSV: sólidos suspendidos volátiles (SM 2540 E).

SST: sólidos suspendidos totales (SM 2540 D).

Relación alfa: se trata de un parámetro útil para evaluar la capacidad “buffer” del sistema y su estabilidad. Esta relación se obtiene mediante un análisis volumétrico que determina la alcalinidad total del sistema titulando con una solución valorada de ácido sulfúrico hasta pH 5,75 y pH 4,3; registrándose los volúmenes gastados V_1 y V_2 , respectivamente. Presenta la ventaja de que ambas determinaciones pueden hacerse sobre la misma muestra y es independiente del volumen de muestra usado (Rojas, 1987).

El volumen V_1 representa la concentración aproximada de bicarbonato, mientras que el volumen V_2 representa la suma de bicarbonato más los AGV (sus sales conjugadas).

La relación alfa se define como:

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{V_2}$$

Alimentación

Se inició la alimentación, una semana después de la puesta en marcha, ingresando diariamente 5 kg de residuo semisólido y 5 kg de agua. El reactor se alimentó bajo esta modalidad hasta completar el volumen de trabajo de 1000 L.

Monitoreo

Durante la digestión anaerobia de la materia orgánica se generan, en forma de compuestos intermedios, ácidos orgánicos de cadena corta como acético, propiónico y butírico, nombrados globalmente por la bibliografía en general como ácidos grasos volátiles (AGV) (van Haandel y Lettinga, 1994; Madigan *et al.*, 1997).

Para examinar el equilibrio ácido base del proceso se analiza la relación alfa. Con esta técnica es posible detectar prematuramente, en forma práctica y eficiente, una potencial acidificación por acumulación de AGV, lo que brinda la posibilidad de tomar medidas para regularizar el proceso.

Proceso en régimen

Una vez alcanzado el volumen de 1000 L, se consideró que el proceso ingresó en el período de régimen. Desde este momento se procedió a alimentar con 10 kg de pulpa diarios sin el agregado de agua adicional. La cantidad diaria de sustrato, expresada en gramos de DQO, que se incorpora por unidad de volumen del reactor se define técnicamente como velocidad de carga orgánica (VCO). Teniendo en cuenta que la DQO del sustrato de alimentación es del orden de los 100 g DQO/kg, incorporar 10 kg diarios de sustrato es equivalente a una VCO de 1 g DQO/L.d.

Al cabo de 3 meses se aumentó la alimentación a una VCO de 2 g DQO/L.d, es decir, alrededor de 20 kg de sustrato diario.

Se implementaron operaciones diarias sistemáticas a los efectos de conducir el proceso con la mayor eficiencia.

Las principales operaciones realizadas en la planta fueron:

- a) Control de temperatura y agitación: diariamente se comprobó el funcionamiento apropiado del agitador y del sistema de termostatización.
- b) Extracción, sedimentación y reciclo de lodos: esta operación consiste en extraer diariamente un volumen de lodo y sedimentarlo durante 30 minutos. Luego descartar la fracción más clara y retornar al biodigestor aquella con mayor contenido de sólidos. Esta operación se realiza a los efectos de conservar en el reactor una buena concentración de microorganismos activos.
- c) Alimentación: consiste en ingresar en el reactor un volumen de sustrato acorde a la VCO del momento. El balance entre volumen de alimentación, descarga de lodos y reciclo de los mismos, previa sedimentación, permite mantener el volumen de trabajo constante.
- d) Control de caudal de biogás: cada 6 horas se tomaron lecturas del equipo totalizador.
- e) Monitoreo físico químico: se realizaron ensayos semanales tendientes a controlar el equilibrio ácido base del proceso y a determinar el abatimiento de la DQO con respecto a la DQO de entrada.

$$\% \text{ Abatimiento} = \left(1 - \frac{\text{DQO}_{\text{Salida}}}{\text{DQO}_{\text{Entrada}}} \right) \cdot 100$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elección del tipo de biodigestor

Dadas las características del sustrato a tratar, cuyo tenor de sólidos está en el orden de los 100 g/kg, el tipo de biodigestor a seleccionar debe poseer un sistema de mezclado enérgico.

La elevada presencia de sólidos deja fuera de elección a los biodigestores tipo "UASB", los cuales requieren un sustrato de muy bajo contenido de sólidos en suspensión.

Por las razones expuestas se consideró que el tipo de reactor adecuado es el de mezcla completa, térmicamente aislado y termostatizado a 35°C, con agitación mecánica.

Por razones operativas se estableció que la alimentación de sustrato se realice en una sola operación diaria.

Estabilidad en el arranque del proceso

No se detectaron las situaciones de inestabilidad química que suelen presentarse en el arranque del proceso, atribuibles a desequilibrios entre los microorganismos generadores y los consumidores de ácidos (Resultados no mostrados).

La adición de bicarbonato de sodio en el inicio del proceso permitió dotar al sistema de capacidad de respuesta ante estas potenciales inestabilidades, propias de esta etapa. El bicarbonato constituye el elemento amortiguador de los desequilibrios ácido base que pudieran producirse.

Estabilidad durante proceso

La estabilidad del proceso de biodigestión anaerobia está dado por el equilibrio ácido base que se establece entre el metabolismo de las bacterias acidogénicas (productoras de AGV), el de las metanogénicas (consumidoras de AGV) y el sistema bicarbonato - dióxido de carbono, los cuales actúan como reguladores.

Se adoptó para el seguimiento de este equilibrio la determinación de la relación alfa. Algunos autores (Rojas, 1987) refieren que un valor de alfa de 0,2 resulta óptimo, mientras que un valor de 0,35 indica un inicio de acidificación, situación en la cual se debe observar y analizar la tendencia de este parámetro a los efectos de tomar medidas, como reducir o suspender la alimentación, en caso de que continúe ascendiendo su valor, hasta que el proceso se equilibre nuevamente en forma natural.

En la Figura 3 se observa la evolución de la relación alfa a diferentes VCO.

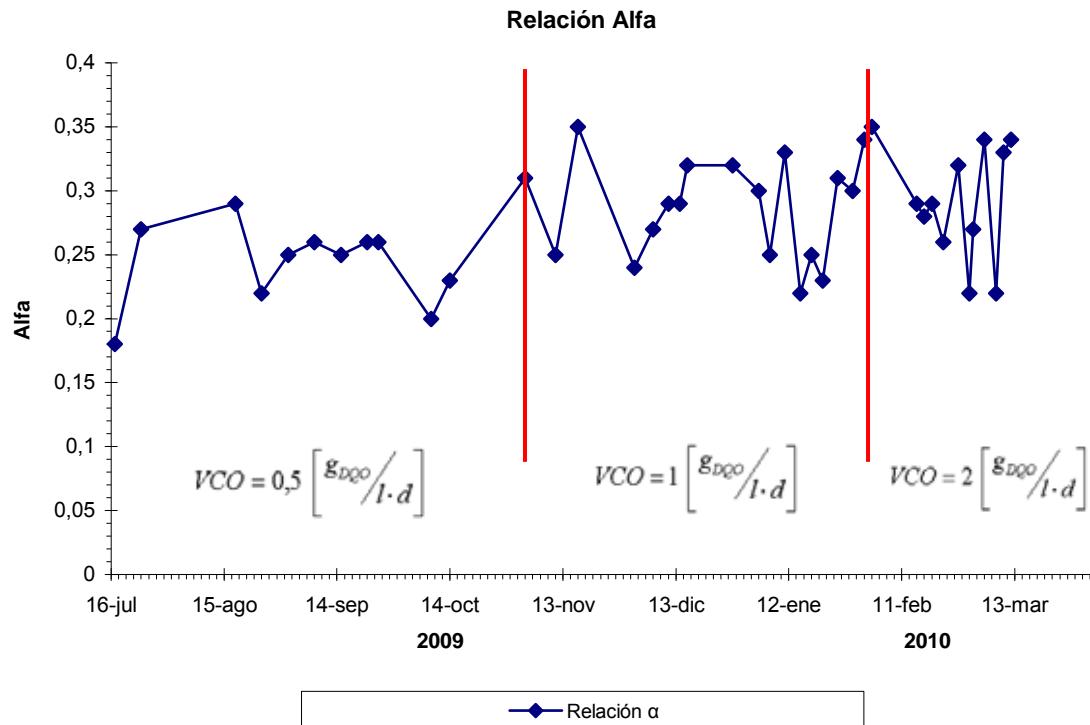


Figura 3: Evolución de la relación alfa para diferentes VCO.

Abatimiento de la carga orgánica

El residuo semisólido (sustrato) a procesar presentó los siguientes datos de caracterización:

DQO (g/kg): $97,1 \pm 5,4$ (n= 10)

ST (g/kg): $100,7 \pm 4,4$ (n= 10)

SF (g/kg): $2,6 \pm 0,4$ (n= 10)

SV (g/kg): $97,7 \pm 4,0$ (n= 10)

Estos datos revelan que el sustrato a procesar es un material de alta carga orgánica. A los efectos de evaluar el abatimiento de la materia orgánica en el proceso de biodigestión, se emplearon las medidas de DQO del sustrato y DQO del lodo de salida.

El porcentaje de abatimiento con respecto a las VCO, se muestran en la Tabla 1, donde se puede observar que en todos los casos se alcanzó más del 80 % de degradación de la materia orgánica ingresada.

Tabla 1: Porcentaje de abatimiento de la DQO y de reducción de los sólidos totales para distintas VCO.

VCO [g DQO/L.d]	Porcentaje de Reducción	
	Materia orgánica (DQO)	Sólidos totales
0,5	82,7 ± 3,4	69,2 ± 2,2
1	82,2 ± 3,6	71,1 ± 1,5
2	81,3 ± 2,3	75,1 ± 1,7

Tabla 2: Producción diaria de biogás a diferentes VCO.

VCO [g DQO/L.d]	Producción diaria [L _{biogás} /d]
1	326
2	1016

Producción de biogás

En base a las lecturas periódicas de volumen de biogás registrado se realizaron gráficas de producción de biogás para las diferentes VCO en función del tiempo.

En la Figura 4 se puede observar que cuando se aumenta la VCO de 1 a 2 g DQO/L.d se incrementa la producción diaria de biogás en el reactor, estimándose un valor de 326 y de 1016 litros de biogás por día respectivamente. Este resultado es comparable al obtenido en otros trabajos realizados con reactores de mezcla completa (Urueña *et al.*, 2010b).

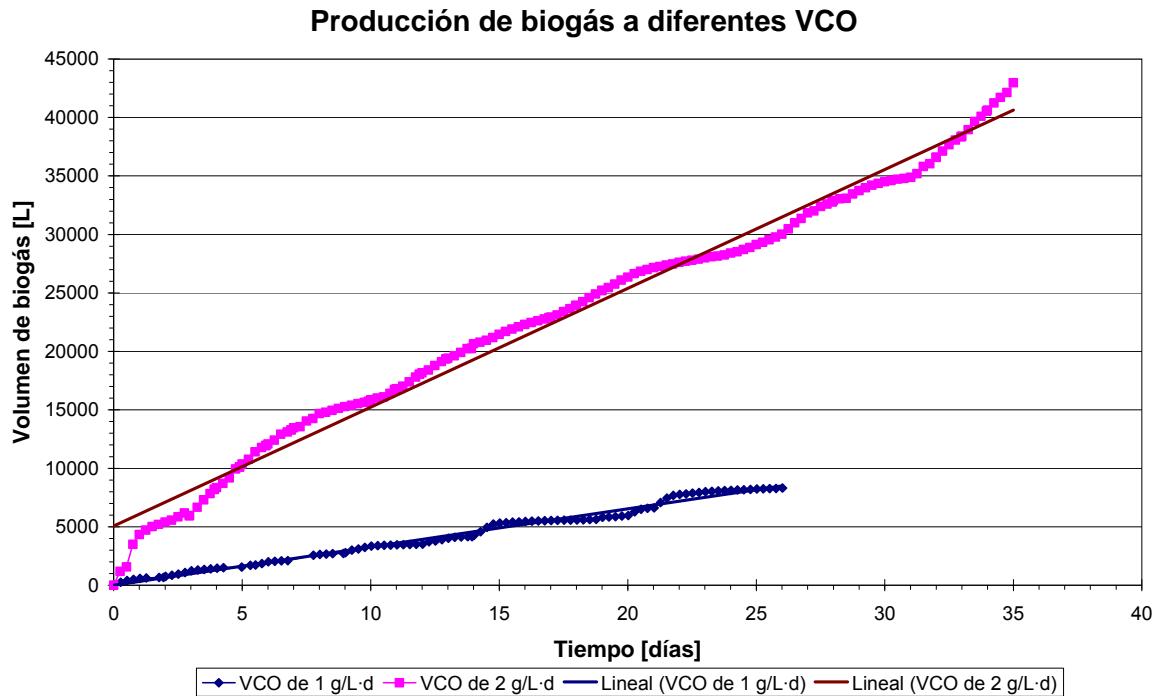


Figura 4: Producción de biogás trabajando a una VCO de 1 y 2 g/L.d.

CONCLUSIONES

El modelo de planta piloto construido permitió abordar el estudio de la biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos provenientes de la industria citrícola, trabajando hasta una VCO igual a 2 g DQO/L.d.

A los efectos de controlar la estabilidad del proceso de biodigestión, la relación alfa resultó un parámetro adecuado y práctico, dada su simplicidad de ejecución y su escaso requerimiento de equipos y reactivos, en contraste con otras técnicas indicadas para este fin, recomendadas por el “Standard methods for the examination of water and wastewater” (APHA, 2005), para la determinación de AGV por cromatografía o por destilación y posterior titulación.

La estabilidad observada indica que es factible estudiar este proceso incluso a mayores VCO, de modo de conocer los límites de trabajo exigibles para este diseño.

En líneas generales se alcanzó un 80 % de degradación de la materia orgánica ingresada, medida en términos de DQO. Se observa que la DQO de los lodos de salida no presenta variaciones significativas con el incremento de la VCO, en el rango de VCO ensayados.

Como residuo del proceso se obtuvo un lodo acuoso con un contenido de ST comprendido entre 25 a 31 g/kg y de baja salinidad, apto para ser dispuesto, de manera controlada, en suelos cultivables o en caminos de fincas.

La producción de biogás fue coherente con los valores teóricamente esperados en base a la materia orgánica degradada.

Agradecimientos

Los autores agradecen:

- 1) Al Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, según sus siglas en inglés) por los aportes financieros realizados para el desarrollo de este proyecto y al Banco Mundial que actuó como agencia de implementación de los mismos.
- 2) A la firma Citromax SACI por contribuir con el predio y materiales para la construcción del biodigestor piloto, sustratos para alimentación y controles operativos.
- 3) A la firma Litoral Citrus S.A. por su colaboración en la cesión de lodos para el arranque del proceso.

BIBLIOGRAFIA CITADA

APHA (2005), Eaton, Andrew; Clesceri, L.S.; Rice, E.W. y Greenberg, A.E. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater.

MADIGAN, Michael.; Mertinko, J. y Parker, J. (1997) Biología de los Microorganismos. Prentice Hall. New Jersey, USA

ROJAS, Olga. Relación alcalinidad-ácidos grasos volátiles. p. D1-D31. En: Curso Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos. Santiago de Cali. Universidad del Valle, 1987.

URUEÑA Myriam R.; Machado W. D.; Vera van Gelderen E. M.; Alonso M. A.; 2010a. Estudio de la actividad metanogénica de lodos fermentados como fuente para el tratamiento por biodegradabilidad anaeróbica de residuos de la industrialización de cítricos. Avance Agroind. 31(2): 30-35.

URUEÑA Myriam R.; Vera van Gelderen E. M.; Machado W. D.; Alonso M. A.; 2010b. Estudios a escala laboratorio de biodegradabilidad de residuos semisólidos de la industria citrícola mediante la utilización de lodos anaeróbicos. *Avance Agroind.* 31(4): 26-29.

van HAANDEL, A. y Lettinga G. (1994) *Tratamiento Anaeróbio de Esgotos*. Editora EPGRAF. Campina Grande, Brasil