

## TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS DE PLATANERA

N. Elortegui Escartín, F. Jarabo Friedrich,

C. Pérez Domínguez y F. Díaz Rodríguez

Departamento de Química Técnica. Universidad de La Laguna  
38071 La Laguna (TENERIFE)

### RESUMEN

Se ha estudiado la cinética de la digestión anaerobia de rolo de platanera para la obtención de metano. El rolo de platanera era la única fuente de carbono, con una concentración de alimento de 32,6 g/l de sólidos volátiles. Se llevaron a cabo experimentos semicontínuos a 37 °C a escala de laboratorio en reactores agitados de mezcla completa.

A partir de los datos experimentales se determinaron las constantes cinéticas del modelo de Chen y Hashimoto, calculándose el rendimiento en metano del sustrato, la velocidad volumétrica máxima de producción de metano y los tiempos de retención mínimo y de máxima producción de metano. Se realizó asimismo un estudio comparativo del sistema respecto a los datos bibliográficos encontrados para otros tipos de residuos vegetales.

### INTRODUCCION

La producción de plátanos es de gran importancia agrícola, no sólo en las Islas Canarias, sino en muchos países de Centro y Sudamérica. La platanera es una planta de gran talla, cada una de las cuales produce un racimo único de frutos, y luego muere. El crecimiento de la planta es rápido y la primera cosecha se obtiene en un año, aproximadamente. Después de la cosecha, el tronco o "rolo" ha de ser cortado para permitir la continuidad por vía vegetativa de los retoños que salen de la misma planta. Esto hace que en una cosecha de plátanos se produzca una gran cantidad de residuos, estimados en 1-1,5 veces el peso de los plátanos (1,2).

Hasta ahora no se ha considerado seriamente en las explotaciones plataneras el aprovechamiento de los residuos de esta planta, bien como materia prima de alguna industria, bien como fuente de combustible (3).

El elevado contenido en agua de este residuo (superior al 90 %) hace que su aprovechamiento energético directo sea inviable mediante procesos termoquímicos (combustión, gasificación, pirólisis o combinación de los mismos), por lo que es necesario orientar esta faceta de su posible aprovechamiento hacia los métodos bioquímicos de obtención de energía. Por otra parte, el elevado contenido en celulosa de la materia orgánica de esta planta hace que sea recomendable la técnica de la digestión anaerobia, ya que su utilización para fermentación alcohólica implicaría costosos procesos de hidrólisis previa de los componentes celulósicos.

Dentro del amplio campo de la bioconversión, la digestión anaerobia representa un procedimiento simple para conseguir una gasificación parcial de la materia vegetal, a la vez que se conserva un residuo sin convertir que puede servir como acondicionador de suelos y fertilizante, permitiendo la continuidad de las prácticas tradicionales de mantenimiento de suelos.

Hasta ahora, el estudio de la digestión anaerobia de materiales celulósicos se ha centrado principalmente en la consideración de ciertos tipos de residuos agrícolas y urbanos, tales como excrementos animales, lodos de depuradora y residuos sólidos urbanos (4-9), entre otros. Residuos fundamentalmente celulósicos sin presencia significativa de otros tipos de materia orgánica se han investigado muy poco (10-13).

Para el tratamiento cinético del proceso de digestión anaerobia se han propuesto varios modelos, siendo uno de los más interesantes el desarrollado por Chen y Hashimoto (14,15), basado en el modelo de Contois (16).

Por todas las razones anteriormente expuestas, se ha utilizado el rolo de platanera para realizar el estudio de la digestión anaerobia de residuos de cosechas con posible valoración económica. El objeto del presente trabajo es determinar las posibilidades de la digestión anaerobia para este residuo, así como verificar la aplicabilidad del modelo deducido por Chen y Hashimoto para residuos animales, a un residuo vegetal.

## TECNICA EXPERIMENTAL Y METODOS DE CALCULO

### Alimentación

Los reactores se alimentaron con una suspensión de rolo de platanera (molido en una trituradora doméstica) en agua, en una proporción 1:1 en peso. El rolo de platanera utilizado tenía la siguiente composición: Sólidos totales (ST): 7,41 % (celulosa: 57,38 %; pentosas: 11,79 %; lignina: 7,42 %); sólidos volátiles (SV): 6,52 %; relación C/N: 35; pH: 5,80.

### Puesta en marcha y operación de los digestores

La digestión anaerobia del rolo de platanera se llevó a cabo en un sistema de laboratorio descrito con anterioridad (9), utilizando como inóculo lodos de depuradora procedentes del clarificador de la planta de aguas residuales de Santa Cruz de Tenerife, que se dejaron fermentar previamente de forma discontinua durante unos 30 días. Después de este período se inició el proceso de alimentación semicontinuo (cada 24 horas) de la suspensión de rolo de platanera, conteniendo 32,5 g SV/l en las cantidades precisas para obtener un tiempo de residencia de unos 80 días. El estudio cinético se llevó a cabo variando la velocidad de alimentación en cada uno de los digestores utilizados. Los datos mostrados en la Tabla 1 corresponden a los valores en estado estacionario (velocidad de producción de gas constante).

### Métodos analíticos

La producción de gas se determinó por la medida diaria de su volumen mediante una bureta de gases; su composición se determinó por cromatografía gaseosa. Los análisis de ST, SV, C y N se llevaron a cabo por métodos normalizados. Las pentosas, la celulosa y la lignina se determinaron según las normas TAPPI.

### Modelo cinético

Según Chen y Hashimoto (14,15), en el caso de un sustrato complejo que se somete a digestión anaerobia continua sin recirculación de sólidos, la producción de metano viene dada por la expresión:

$$B = B_o \left( 1 - \frac{K}{\mu_m - 1 + K} \right) \quad [1]$$

donde  $\theta$  es el tiempo de retención hidráulico (días),  $B$  y  $B_0$  son los rendimientos volumétricos de metano (l  $\text{CH}_4/\text{g SV}$  añadidos) para un tiempo determinado y tiempo infinito, respectivamente,  $\mu_m$  es la velocidad específica máxima de crecimiento de los microorganismos (días<sup>-1</sup>) y  $K$  es una constante cinética adimensional.

Asimismo, la velocidad volumétrica de producción de metano puede expresarse de la forma:

$$\gamma_v = \frac{B \cdot S_0}{\theta} \quad [2]$$

siendo el cociente  $S_0/\theta$  la denominada "velocidad de alimentación" y  $S_0$  la concentración de la alimentación (g SV/l).

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en estado estacionario, observándose que el rendimiento en metano aumenta con el tiempo de residencia. Asimismo se observa que el porcentaje de metano en el gas es aproximadamente constante, igual que el pH del efluente, con una cierta tendencia en ambas variables a disminuir a medida que aumenta la velocidad de alimentación.

Tabla 1  
Digestión anaerobia mesofílica (37 °C) de rolo de platanera:  
Condiciones y datos experimentales

$\theta$ (días)	$S_0/\theta$ g SV/l dig. día	B (c) l $\text{CH}_4/\text{kg SV}$	% $\text{CH}_4$	pH efluente
73,1 (a)	0,45	334,7	43,69	7,13
58,2 (b)	0,56	310,2	44,17	7,10
49,2 (a)	0,66	247,7	42,11	7,08
40,1 (b)	0,81	223,2	43,03	7,10
37,1 (a)	0,88	192,3	39,76	6,99
29,7 (a)	1,10	-	-	-
23,8 (b)	1,37	-	-	-

(a): Volumen de digestión 0,754 l.

(b): Volumen de digestión 0,608 l.

(c): Volumen de metano en condiciones standard.

Los valores que faltan en la tabla son los correspondientes a tiempos de residencia más bajos. Al operar a las velocidades de alimentación equivalentes a dichos tiempos de residencia, se observa una disminución de los valores de  $B$ , %  $\text{CH}_4$  y  $\gamma_v$  (Figura 1), tanto más acentuada cuanto mayor es la velocidad de alimentación. En estas condiciones el sistema no sólo deja de ser estable, sino que además se produce una parada completa del proceso de digestión.

El parámetro  $B_0$  se obtuvo como la ordenada en el origen de la representación de  $B$  frente a  $1/\theta$ , resultando por regresión lineal ( $r = 0,982$ )  $B_0 = 482$  l  $\text{CH}_4/\text{kg SV}$ . Las constantes cinéticas del modelo,  $\mu_m$  y  $K$  se calcularon representando los cocientes  $B/(B_0 - B)$  frente a  $B$ . Por regresión lineal ( $r = 0,984$ ) se obtuvieron los valores  $\mu_m = 0,045$  días<sup>-1</sup> y  $K = 0,983$ .

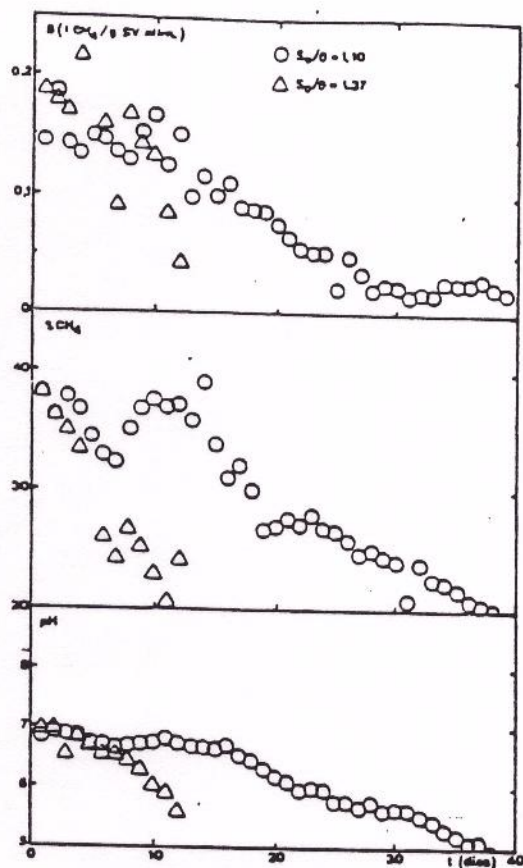


Figura 1  
Evolución del sistema  
a tiempos de retención bajos

No obstante, el modelo ajusta bien los datos experimentales a tiempos de retención superiores a 37 días (Figura 2) y permite calcular el rendimiento máximo en metano del sustrato,  $B_0$ .

El valor calculado para este parámetro presenta una buena concordancia con el obtenido por Patel y cols. (18), 501 l  $\text{CH}_4/\text{kg SV}$ . Además, comparando los valores del rendimiento en metano para residuos vegetales dados por otros autores (18-21), el obtenido para el rolo de platanera resulta ser el más elevado de todos, si se exceptúa el que produce el jacinto de agua ( $B_0 = 717$  l  $\text{CH}_4/\text{kg SV}$ ). Probablemente esto es debido al alto contenido en celulosa (22) y bajo en lignina del rolo, así como su relación C/N, muy próxima al valor considerado como óptimo (C/N = 25 - 30) (22,23).

Respecto a la máxima velocidad de producción de metano, el valor obtenido es relativamente bajo, si se compara con otros residuos estudiados. Así, Chittenden y cols. (10) obtienen 0,470 l  $\text{CH}_4/\text{l digester.día}$  para patatas maceradas, operando con una concentración de alimento de 42 g SV/l a una velocidad de alimentación de 1,33 g SV/l digester.día. Morfaux y cols. (12) obtienen 0,620 l  $\text{CH}_4/\text{l digester.día}$  ( $S_0 = 25$  g SV/l;  $S/\theta = 2,20$  g SV/l digester.día) para aguas de blanqueo de guisantes y Madarro y cols. (11) dan un valor de 0,650 l  $\text{CH}_4/\text{l digester.día}$  ( $S_0 = 50$

Una vez calculados los parámetros del modelo, éste permite obtener los valores del tiempo de retención mínimo y el tiempo de retención de máxima velocidad de producción de metano, que resultaron ser, respectivamente,  $\theta_{\min} = 1/\mu = 22,2$  días (al que corresponde una velocidad máxima de alimentación de 1,47 g SV/l digester.día) y  $\theta_{\max} = \theta_{\min} (1 + \sqrt{K}) = 44,3$  días (al que le corresponde una velocidad de producción máxima de metano de 0,178 l  $\text{CH}_4/\text{l digester.día}$ ).

El tiempo de retención mínimo calculado a partir del modelo resultó ser inferior al obtenido experimentalmente. Una posible explicación de este hecho es que el desarrollo teórico del modelo supone que en la alimentación no existen microorganismos. Sin embargo, se ha comprobado (17) que la digestión anaerobia de este material en un sistema discontinuo experimenta una fuerte caída del pH en pocos días, lo que indica una elevada velocidad de producción de ácidos volátiles. Este comportamiento parece confirmar la existencia de microorganismos en el material vegetal. Por otro lado, la aparición de ácidos volátiles indica que debe existir una elevada relación bacterias acidogénicas / bacterias metanogénicas. Por tanto, el sistema continuo se vuelve ácido a velocidades de alimentación críticas más bajas que las predichas por el modelo teórico.

g SV/l;  $S_0/\theta = 3,70$  g SV/l digestor.día) para residuos de prensado de naranjas.

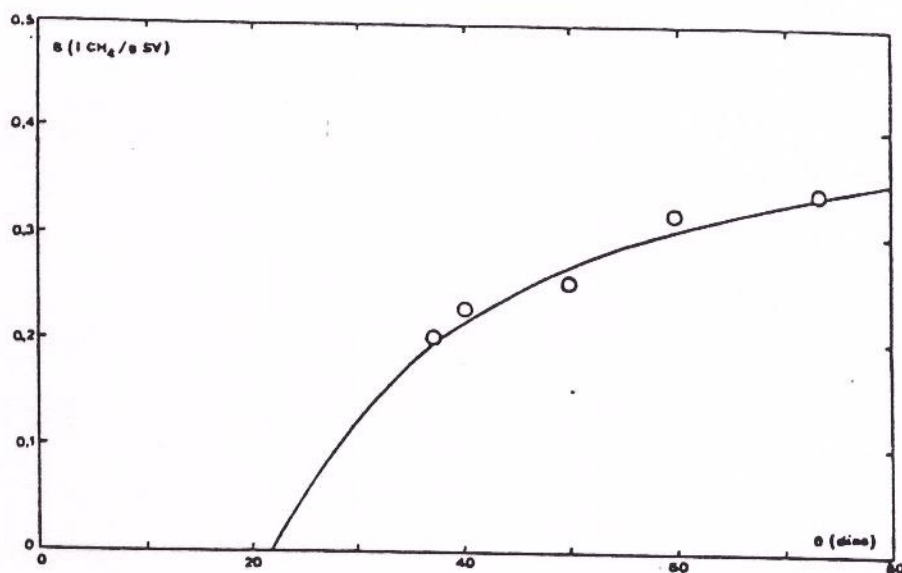


Figura 2  
Ajuste de los valores experimentales al modelo de Chen y Hashimoto

Todos los residuos citados tienen la característica común de un bajo contenido en celulosa y un alto contenido en azúcares, lo que podría explicar los altos valores de  $\gamma_v$ . Sin embargo, operando con paja de arroz (36,2 % de celulosa; 5,5 % de lignina), Lequerica y cols. (13) obtienen sólo 0,223  $l\ CH_4 / l$  digestor.día ( $S_0 = 38$  g SV/l;  $S_0/\theta = 2,20$  g SV/l digestor.día), valor más acorde con el obtenido para el rolo de platanera.

El bajo valor de  $\gamma_v$  para el rolo de platanera parece estar de acuerdo con el hecho de que este residuo contiene una gran cantidad de fibras. Aunque se someten a molienda, la pasta resultante tiene aún un elevado contenido en las mismas, de dimensiones comprendidas entre 8 y 10 mm, lo que obviamente debe dificultar el ataque de los microorganismos a las moléculas de celulosa que forman dichas fibras.

Así pues, la posibilidad real de aumentar la velocidad de producción de metano sería la utilización de un digestor con recirculación de sólidos, por ser este tipo de digestor el más idóneo para aumentar la concentración de microorganismos  $\gamma$ , por tanto, la velocidad de producción de metano (24,25).

## CONCLUSIONES

El estudio experimental de la digestión anaerobia de rolo de platanera ha permitido la evaluación de los parámetros del modelo de Chen y Hashimoto. Asimismo se han determinado las condiciones críticas de operación y las de máxima velocidad de producción de metano, así como el rendimiento máximo en metano del sustrato utilizado.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) SIMMONDS, N.W.; "Bananas", 2nd. ed., Longman, London (1966).
- (2) ALVAREZ, F.J.; "Cultivo de la platanera", Ministerio de Agricultura, Madrid (1981).
- (3) CHAMPION, J.; "Le bananier", G.-P. Maisonneuve et Larose, Paris (1963).
- (4) PFEFFER, J.T.; "Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse", *Biotechnol. and Bioeng.*, 16, 771 (1974).
- (5) MORRIS, G.R.; "Anaerobic fermentation of animal wastes: a kinetic and empirical design evaluation", M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY (1976).
- (6) BRYANT, M.P., VAREL, V.H., FROBISCH, R.A., ISAACSON, H.R.; "The microbiology of anaerobic degradation and methanogenesis", Seminar on Microbial Energy Conversion, H.G. Schlegel, Ed., E. Goltz KG, Göttingen, Germany (1976).
- (7) VAREL, V.H., ISAACSON, H.R., BRYANT, M.R.; "Thermophilic methane production from cattle waste", *Appl. Environ. Microbiol.*, 33, 298 (1977).
- (8) HASHIMOTO, A.G., CHEN, Y.R., VAREL, V.H.; "Theoretical aspects of methane production: state-of-the-art", *Proc. 4th. Int. Symp. on Livestock Wastes*, A.S.A.E., St. Joseph, MI, 86 (1981).
- (9) PEREZ, C., ELORTEGUI, N., JARABO, F.; "Tratamiento anaerobio de lodos de depuradora. Determinación de parámetros de diseño", II Congreso Nacional sobre Recuperación de Recursos de los Residuos, Tecnologías, 15-20 Oct., Soría, España (1984).
- (10) CHITTENDEN, A.E., HEAD, S.W., BREAG, G.; "Anaerobic digesters for small-scale vegetable processing plants", Report of the Tropical Products Institute G-139, London (1980).
- (11) MADARRO, A., LEQUERICA, J.L., VALLES, S., FLORS, A.; "Fermentación metánica de efluyentes de la industria de zumos cítricos", II Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química, 25-27 Nov., Barcelona, España (1981).
- (12) MORFAUX, J.N., ALBAGNAC, G., TONZEL, J.P.; "Euration par fermentation methanique des effluents de blancheur de petits pois", *Sciences des Aliments*, 1(2), 293 (1981).
- (13) LEQUERICA, J.L., VALLES, S., FLORS, A.; "Kinetics of rice straw methane fermentation", *Appl. Microb. Biotechnol.*, 19, 70 (1984).
- (14) CHEN, Y.R., HASHIMOTO, A.G.; "kinetics of methane fermentation", *Biotechnol. and Bioeng. Symp.*, 8, 269 (1978).
- (15) CHEN, Y.R., HASHIMOTO, A.G.; "Substrate utilization kinetic model for biological treatment processes", *Biotechnol. and Bioeng.*, 22, 2081 (1980).
- (16) CONTOIS, D.E.; "Kinetics of bacterial growth: relationship between population density and specific growth of continuous cultures", *J. Gen. Microbiol.*, 21, 40 (1959).
- (17) DELGADO, S., DIAZ, F., ELORTEGUI, N., JARABO, F.; "Fermentación anaerobia de rolo de platanera. Caracterización del sistema", *Anales de las Facultades de Ciencias*, Universidad de La Laguna, en prensa.
- (18) PATEL, J.H. y cols.; "Biogas plant for banana stems", National Solar Energy Convention, Dec., Baroda, India (1983).
- (19) IMHOFF, K.; "Manual de saneamiento de poblaciones", Ed. Blume, Barcelona, (1969).

- (20) PÜRSCHEL, W.; "Behandlung häuslichen Abwassers (Klärtechnik)", Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin (1965).
- (21) WHEATLEY, B.I.; "The gaseous products of anaerobic digestion - biogas", 1 Int. Symp. Anaerobic Digestion, Sept., University College, Cardiff, U.K. (1979).
- (22) MYNELL, P.J.; "Methane: planning a digester", 2nd. ed., Prism Press, Stable Court, U.K. (1982).
- (23) MERRIL, R., FRY, L.J.; "Methane digesters for fuel gas and fertilizer", New Alchemy Institute, newsletter n° 3, Santa Barbara, CA (1973).
- (24) WISE, D.L., COONEY, C.L., AUGENSTEIN, D.C.; "Biomethanation: anaerobic fermentation of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and CO to methane", Biotechnol. and Bioeng., 20 (8), 1153 (1978).
- (25) HORTON, R.; "The implication of engineering design on anaerobic digester systems", 1 Int. Symp. Anaerobic Digestion, Sept., University College, Cardiff, U.K. (1979).