



**AUMENTO DE LA ACTIVIDAD METANOGENICA EN LODOS GRANULARES,  
PRECIPITANDO CALCIO EN EL NEJAYOTE MEDIANTE EL BURBUJEO DE CO<sub>2</sub>**  
**GRANULAR SLUDGES METHANOGENIC ACTIVITY INCREASE DUE TO CO<sub>2</sub>  
BUBBLING CALCIUM PRECIPITATION OVER NEJAYOTE**

A. Ferreira-Rolón, G. Ramírez-Romero y F. Ramírez-Vives\*

*Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma metropolitana, Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, 09340 Iztapalapa, D.F, México.*

Recibido 11 de Septiembre 2013; Aceptado 19 de Febrero de 2014

**Resumen**

Más del 60% del agua potable utilizada en el proceso de nixtamalización se desecha al ambiente como agua residual (nejayote). Esta contiene: una alta concentración de materia orgánica (20-30 gDQO L<sup>-1</sup>), cantidades considerables de Ca<sup>2+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y otros nutrientes. En este trabajo se evalúan por un lado, la producción de metano en un reactor de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB), diluyendo el nejayote con agua residual municipal a diferentes cargas orgánicas; y por el otro, el efecto del calcio en los lodos granulares, precipitándolo por medio de burbujeo con CO<sub>2</sub>. Los resultados más importantes muestran una disminución hasta 20 veces en la actividad metanogénica de los lodos sin remoción de Ca<sup>2+</sup>; las eficiencias de remoción de la DQO son mayores al 90% y que el calcio a bajas concentraciones aumenta la actividad metanogénica de los lodos. A partir de estos resultados se propone un sistema de tratamiento que pueda adaptarse a los molinos de nixtamalización existentes en la ciudad de México.

*Palabras clave:* nejayote, calcio, lodos granulares, producción de metano.

**Abstract**

Beyond over 60% potable water used in the process of corn nixtamalization knows as nejayote is wasted in to the environmental water. Nejayote contains a high concentration of organic matter (20 to 30 g COD L<sup>-1</sup>), a considerable amount of Ca<sup>2+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>-2</sup> as well as several nutrients. This work consists of assessing basically two issues. The first is the granular sludges methane production by diluting the nejayote with municipal wastewater of different organic loads. The second is the calcium effect over granular sludges by its precipitation through CO<sub>2</sub> bubbling. The most important results show first, more than twenty times methanogenic activity reduction without Ca<sup>2+</sup> remotion. Second, COD removal efficiencies turned beyond than 90%. Finally, calcium at low concentration increases granular sludges methanogenic activity. Based on these results, we suggest a treatment system wich could be addapted to the existing mills nixtamalization process in Mexico City.

*Keywords:* nejayote, calcium, granular sludges, methane production.

## 1 Introducción

El maíz es la fuente principal de alimentación en México, especialmente en la zona rural. Se estima que el consumo anual de maíz en promedio por habitante es de 90 kg. En el D.F se consumen 12 millones de toneladas de tortillas elaboradas en 9 mil molinos y se calcula que se produce 1 ton d<sup>-1</sup> de nixtamal, utilizando 1 m<sup>3</sup> de agua potable por tonelada de maíz, de donde 0.65 m<sup>3</sup> son aguas residuales del

proceso (nejayote) que son vertidos al drenaje sin tratamiento previo (Ramírez y col. 2009). El proceso de nixtamalización comienza remojando el maíz en agua caliente a una temperatura de 90-100° C, durante un tiempo de 15 a 60 minutos, con 500 g de hidróxido de calcio por cada 50 kg de maíz y dejando reposar la mezcla de 12 a 19 horas a temperatura ambiente. Posteriormente se lava con grandes cantidades de

\*Autora para la correspondencia. E-mail: frav@xanum.uam.mx

agua, produciendo un grano suave, sin cáscara llamado nixtamal y una parte acuosa conocida como nejayote (Trejo y col., 1982). La proporción en peso es de 2-3 partes de nejayote por una parte de maíz (Ochoa y Viniegra-González, 2009). El nejayote contiene altas concentraciones de materia orgánica disuelta, parte del pericarpio, endospermo, hemicelulosa, carbohidratos, celulosa, proteína, así como carotenoides responsables de la coloración amarilla (Gutiérrez-Urbe y col., 2010, Ramírez-Romero y col., 2013), y el hidróxido de calcio utilizado en el proceso, lo hace un residual altamente alcalino ( $\text{pH}=12$ ).

A la fecha solamente dos trabajos reportan el tratamiento biológico del nejayote, uno de ellos es el de González y Marmolejo en 1986, quienes trabajaron con 5 reactores de filtro anaerobio de 2.3 L cada uno, conectados en serie, tratando nejayote a diferentes cargas orgánicas ( $2\text{-}6\text{ g L}^{-1}$  de DQO), a temperaturas de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\text{pH}$  neutro, obteniendo eficiencias de remoción de la DQO cercanas al 91%. Pedroza y Duran en 1989 trabajaron el nejayote diluido en un reactor biológico rotatorio (RBR) de 50 L, con una carga orgánica de  $6.4\text{ g L}^{-1}$  de DQO y a un TRH de 2.5 d, reportando una eficiencia de remoción de la DQO del 84.6%. Dado que en estos trabajos se ha utilizado nejayote diluido o TRH muy largos el efecto del calcio no es evidente y su estudio se enfoca solamente a la remoción de la materia orgánica, por lo que es importante evaluar el efecto de este ion en la actividad de los lodos granulares.

Trabajos reportados sobre el efecto del calcio en la digestión anaerobia se han llevado a cabo con aguas residuales industriales o en medios sintéticos. Jackson-Moss y col. en 1989 trabajaron con agua residual sintética a diferentes concentraciones de calcio en un reactor UASB de 9 L, a un  $\text{pH}$  neutro y obtuvieron eficiencias de remoción de la DQO cercanas al 90 %, demostrando que aumentando gradualmente la concentración de calcio en la alimentación se reduce significativamente el efecto inhibitorio sobre la digestión anaerobia. Yu y col. (2001) trabajaron con 6 reactores UASB para tratar agua residual sintética con una carga orgánica de  $4\text{ g L}^{-1}$  de DQO. Durante la experimentación se adicionó  $\text{Ca}^{2+}$  a concentraciones mayores a  $150\text{ mg L}^{-1}$ , para mejorar la acumulación de biomasa y el proceso de granulación, pero la actividad específica de los gránulos disminuyó con el aumento de la concentración de calcio en el influente. Ren y col. (2008), trabajaron con un reactor SBR para tratar aguas residuales de una planta piloto productora

de  $\text{H}_2$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un TRH de 6 h con una DQO de  $1.2\text{ g L}^{-1}$ , alimentaron pequeñas concentraciones de calcio para evaluar la distribución del calcio así como el efecto en la estructura, fuerza y bioactividad de los lodos granulares, el calcio contribuyó a la cementación del lecho, pérdida de volumen útil, creación de caminos preferenciales, eficiencia de depuración, la necesidad de interrumpir el proceso y reinocular los reactores. Fernández y García (1999), Langerak y col. (1997) y Lettinga (1996), mencionan que cuando se trabaja con aguas residuales a  $\text{pH}$  ácidos y con concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  del orden de  $800\text{ mg L}^{-1}$ , se debe añadir NaOH para alcanzar una alcalinidad adecuada ( $1000\text{ mg L}^{-1}\text{ CaCO}_3$ ), así el proceso es estable y se evita la precipitación de carbonato de calcio en el interior del reactor anaerobio. La presencia de especies tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  puede también condicionar la magnitud de la precipitación de calcio cuando se trabaja con aguas residuales con alto contenido de este ion (Vela y col., 2002).

Una forma de prevenir la acumulación de los precipitados de calcio en un reactor anaerobio es eliminando o disminuyendo la concentración de calcio del agua residual en una etapa previa, como lo reportan Yong y col. (2004), quienes precipitaron calcio en forma de carbonato por medio de una recirculación, utilizando  $\text{CO}_2$  con un sistema de agitación y burbujeo, sin embargo la recirculación del efluente cambió el  $\text{pH}$ , generando insuficiente alcalinidad, aumentó los sólidos fijos en los lodos y la concentración de fosfatos.

Debido a las grandes cantidades de nejayote generadas en los molinos de nixtamalización y que son vertidos al ambiente sin previo tratamiento, es necesario desarrollar procesos que disminuyan su impacto al ambiente. Un método eficaz para tratar aguas residuales con altas cargas orgánicas es la digestión anaerobia que además de reducir los contaminantes se genera biogás ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) que puede ser utilizado como combustible y los lodos generados presentan propiedades adecuadas para ser usados como bioabono (Bermúdez y col., 2003). Sin embargo, los trabajos publicados a la fecha sobre el tratamiento de este residuo por vía biológica son escasos, por lo que el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del calcio presente en el nejayote sobre la digestión anaerobia de este residual y específicamente, en la actividad de los lodos granulares.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Muestreo del nejayote

Se colectaron directamente de las tinas de desagüe muestras de nejayote de distintos molinos (Colonia el Pino en Los Reyes, estado de México; colonia la Purísima en Iztapalapa) y del norte del estado de México: colonia las Alamedas. Las muestras se homogenizaron con palas para tener una muestra representativa. Estas muestras fueron transportadas al laboratorio y mantenidas en refrigeración (4 °C) hasta su caracterización.

### 2.2 Caracterización del nejayote

La caracterización de las muestras de nejayote se hizo con base en las siguientes variables de respuesta: pH velocidad de sedimentación, demanda química de oxígeno (DQO), calcio, sólidos totales, fijos, volátiles y alcalinidad.

El pH de las muestras se determinó por medio de un potenciómetro HANNA Instruments HI 255. La velocidad de sedimentación del nejayote se determinó utilizando una probeta de 2 litros, en la cual se vertían 1000 ml de nejayote, se dejaba sedimentar y se medía el volumen de sedimentación a través del tiempo. La pendiente de graficar el volumen sedimentado contra el tiempo representa la velocidad de sedimentación. La medición de la demanda química de oxígeno (DQO) se llevó a cabo por el método colorimétrico de reflujo cerrado, y la cuantificación, a través de una curva patrón a partir de una solución madre de glucosa. Para cuantificar el calcio presente en el nejayote, se elaboró una curva patrón a partir de diferentes concentraciones de hidróxido de calcio (0-2 g L<sup>-1</sup>) y la determinación se realizó mediante una titulación con EDTA y usando como indicador eriocromo negro T. Los sólidos suspendidos totales (SST), fijos (SSF) y volátiles (SSV) se determinaron por gravimetría. Todos estos análisis se llevaron a cabo con base a las técnicas descritas por APHA (2005).

La alcalinidad fue determinada por titulación potenciométrica a pH 5.75 y 4.3 con una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 0.05 N como lo describen Gan y col. (2013).

La producción de biogás se determinó por el desplazamiento de salmuera (250 g L<sup>-1</sup> NaCl) en una columna de vidrio graduada. La preparación de la muestra para la cuantificación del biogás se llevó a cabo como lo describen Viguera y col. (2011) y fue analizada por cromatografía de gases, usando un cromatógrafo de gases (GowMAC, serie 580), con

un detector de conductividad térmica (TCD), bajo las siguientes condiciones de operación: La temperatura de la columna, detector e inyector fueron de 140°C, 190°C y 170°C respectivamente, con una rampa de temperatura de 25°C min<sup>-1</sup>. La columna fue empacada con Carbosphere, malla 80 100, usando helio como gas acarreador a 40 psi de presión y un flujo de 25 mL min<sup>-1</sup> con una polaridad de 120 mA.

### 2.3 Precipitación de calcio por burbujeo de CO<sub>2</sub>

Las pruebas de remoción de calcio en el nejayote, como tratamiento preliminar se realizaron, utilizando 100 mL de sobrenadante del nejayote y burbujeando CO<sub>2</sub> en distintos tiempos, a un flujo de 5 ml min<sup>-1</sup>.

### 2.4 Remoción de la materia orgánica del nejayote en un reactor UASB

El nejayote fue tratado en un reactor UASB de 1.9 L, que fue inoculado con 400 mL de lodos granulares provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria de alimentos que contenía una concentración de biomasa de 28.8 gSSV L<sup>-1</sup>. Mezclas de nejayote y agua residual municipal fueron ajustadas alrededor de 1 a 3 gDQO L<sup>-1</sup> a un día de tiempo de residencia hidráulica (TRH), sin ajuste de pH y a una temperatura de incubación de 32°C. En las tres primeras etapas el reactor fue alimentado con nejayote diluido con agua residual sin precipitación de calcio. A partir de la etapa IV el calcio del nejayote fue precipitado con el burbujeo de CO<sub>2</sub>. Las variables de respuesta medidas en el influente y efluente del reactor fueron: pH, calcio, DQO, alcalinidad, producción de biogás y su composición.

## 3 Resultados y discusión

### 3.1 Caracterización del nejayote

Los volúmenes generados de nejayote en los molinos de nixtamalización son muy variados y dependen del tipo de maíz, cantidad de maíz procesado por tina de reposo, agua utilizada en el proceso, cantidad de cal, tiempo de cocción y reposo (Ramírez y col, 2013). La tabla 1 presenta la caracterización de distintas muestras de nejayote obtenidas de diferentes molinos en donde se puede observar la gran dispersión en los datos.

Tabla 1. Caracterización físico-química del nejayote antes y después de la sedimentación mecánica.

Parámetro	Nejayote	Sobrenadante	(%) Eficiencia
pH	12.0 ± 0.11	11.99 ± 0.13	
DQO ( g/L)	24.6 ± 7.72	20.8 ± 9.91	15.4
Calcio ( g/L)	3.9 ± 1.24	2.0 ± 1.13	48.7
SST ( g/L)	6.6 ± 1.93	2.7 ± 1.50	59.0
SSV ( g/L)	4.5 ± 1.62	2.1 ± 1.27	53.3
SSF ( g/L)	2.0 ± 0.78	0.6 ± 0.34	70.2

Después de la sedimentación mecánica, la cual ocurre a una elevada velocidad ( $662 \pm 299 \text{ m}^3/\text{h}$ ), en el sobrenadante permanecen menos del 50% de los sólidos presentes en la muestra original, lo que representa un alto porcentaje en la reducción de éstos y un 48% en la reducción de calcio. Sin embargo, la reducción en la DQO no fue significativa.

### 3.2 Precipitación de calcio por burbujeo con $\text{CO}_2$

Con 2 a 5 minutos de burbujeo de  $\text{CO}_2$ , se observa una reducción en los valores de pH (8, 7.8 y 7.2 respectivamente) como se muestra en la tabla 2; con una mayor precipitación de carbonato de calcio (36%) cuando el tiempo de burbujeo fue de 2 minutos. Cuando se aumenta el tiempo de burbujeo (3 y 5 minutos), la eficiencia de remoción de carbonato permanece constante, por lo que se decide fijar el pH final a 8 con un volumen mayor de muestra (1L), obteniéndose la misma eficiencia de remoción pero a 35 minutos de burbujeo. Cuando el nejayote se diluye con agua residual para la alimentación del reactor, la eficiencia de remoción de calcio después del burbujeo con  $\text{CO}_2$  aumentó al 50%, debido a que su concentración en la mezcla es menor, por tanto, con el mismo tiempo de burbujeo (35 minutos) se logra una mayor eficiencia en la precipitación de este ion.

### 3.3 Comportamiento del reactor UASB en la degradación anaerobia del nejayote

Los reactores UASB tienen la ventaja sobre otros reactores anaerobios de soportar altas cargas orgánicas, debido a que la cama de lodos está conformada por gránulos con alta velocidad de sedimentación. Las figuras 1 y 2 muestran el comportamiento del reactor durante las diferentes etapas de operación. En la etapa I, al alimentar con una carga orgánica volumétrica (COV) de  $1.8 \text{ gDQO}$

$\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , se obtiene una producción de biogás de  $1.93 \text{ L L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , donde  $1.54 \text{ L L}^{-1}\text{d}^{-1}$  fueron de  $\text{CH}_4$ . Bajo estas condiciones la eficiencia de remoción de la DQO fue del 85%, valores similares a los obtenidos por Pedroza y Durán (1989), pero con un TRH 2.5 veces menor y con González y Marmolejo (1986), trabajando con 5 reactores de filtros anaerobios y cargas orgánicas similares.

Al aumentar la carga orgánica a  $2.7 \text{ gDQO L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (etapa II), la producción de biogás aumenta a  $3.42 \text{ L L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , variando en su composición, siendo mayor la concentración de  $\text{CO}_2$  (70%) y la eficiencia en la remoción de la materia orgánica disminuyó a un 65%, debido probablemente al aumento de la carga orgánica y a una acumulación de calcio en los lodos anaerobios como lo reportan Yong y col. (2003) observándose la presencia de zonas blancas en la superficie de los gránulos ocasionado por la precipitación del carbonato de calcio en el sistema, teniendo como consecuencia el desplazamiento de una parte de la biomasa dentro de los lodos, disminuyendo la actividad metanogénica de los mismos y el aumento de los sólidos fijos como se observa en la tabla 3. Reng y col., en el 2008 estudiaron la distribución espacial del calcio, los efectos en la estructura granular, rigidez y bioactividad, reportando una pérdida de la actividad metanogénica de los lodos debido a la precipitación de carbonatos.

Con la finalidad de remover el carbonato de calcio acumulado dentro de los gránulos, se decidió alimentar el reactor durante 10 días, solamente con agua residual de la UAM-I para eliminar el carbonato en los lodos granulares (datos no presentados). Después de este periodo se reinició la alimentación con nejayote diluido a una COV de  $1.5 \text{ gDQO L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para tratar de recuperar la actividad de los lodos. Sin embargo el reactor tuvo un comportamiento inestable y la mayor eficiencia lograda bajo estas condiciones fue solamente del 79% (etapa III), con una producción de biogás menor a la etapa anterior donde la composición fue mayoritariamente  $\text{CO}_2$ . La acumulación de carbonato en los lodos continuó formando parte importante del gránulo como lo demuestra el valor de la actividad metanogénica evaluada en ese periodo, por lo que se decidió reinocular el reactor y reiniciar la alimentación de nejayote a una carga orgánica menor ( $0.9 \text{ gDQO L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ). Al disminuir la carga orgánica a  $0.9 \text{ gDQO L}^{-1}\text{d}^{-1}$  (etapa IV), sin previa precipitación del calcio la eficiencia de remoción fue de un 73% y la producción de biogás de  $1.32 \text{ L L}^{-1}\text{d}^{-1}$ , de los cuales  $1.25 \text{ L d}^{-1}$  correspondieron a  $\text{CH}_4$  con una

actividad metanogénica de los lodos similar a la etapa I ( $0.6 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ gSV}^{-1}\text{d}^{-1}$ ). De esta forma se logra establecer la operación del reactor UASB a

condiciones similares al inicio de la experimentación, donde la reducción de la DQO no sobrepasa el 80 %.

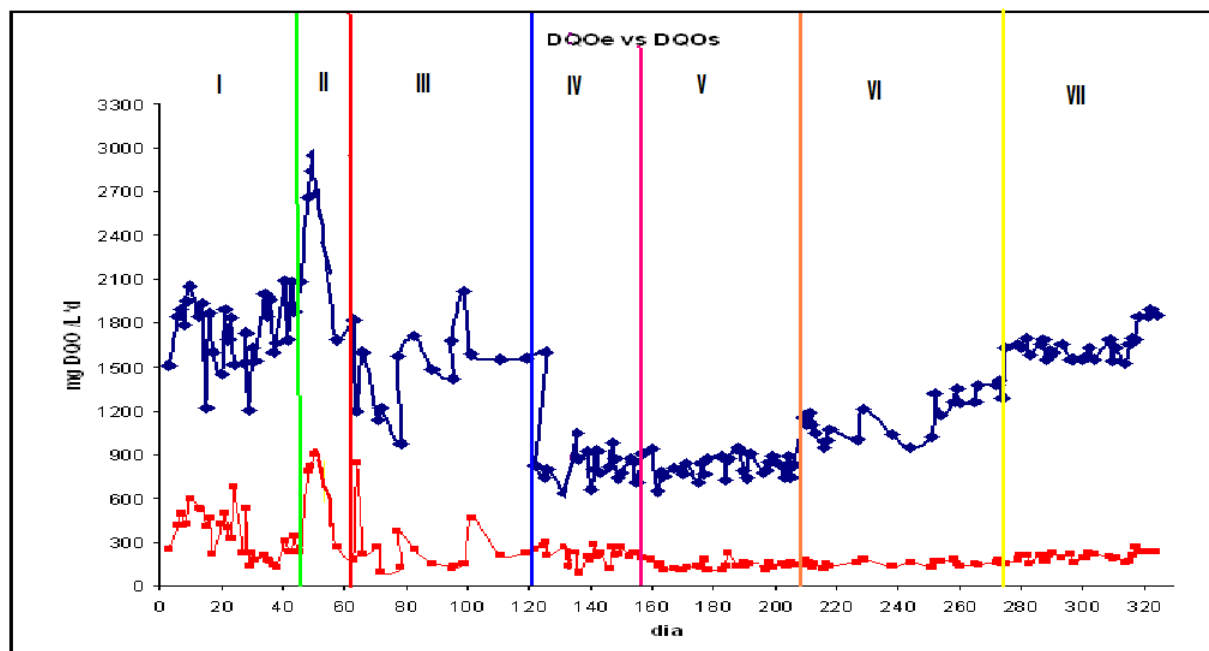


Fig. 1. Remoción de la materia orgánica del nejayote en el reactor UASB sin y con precipitación de calcio en la alimentación.

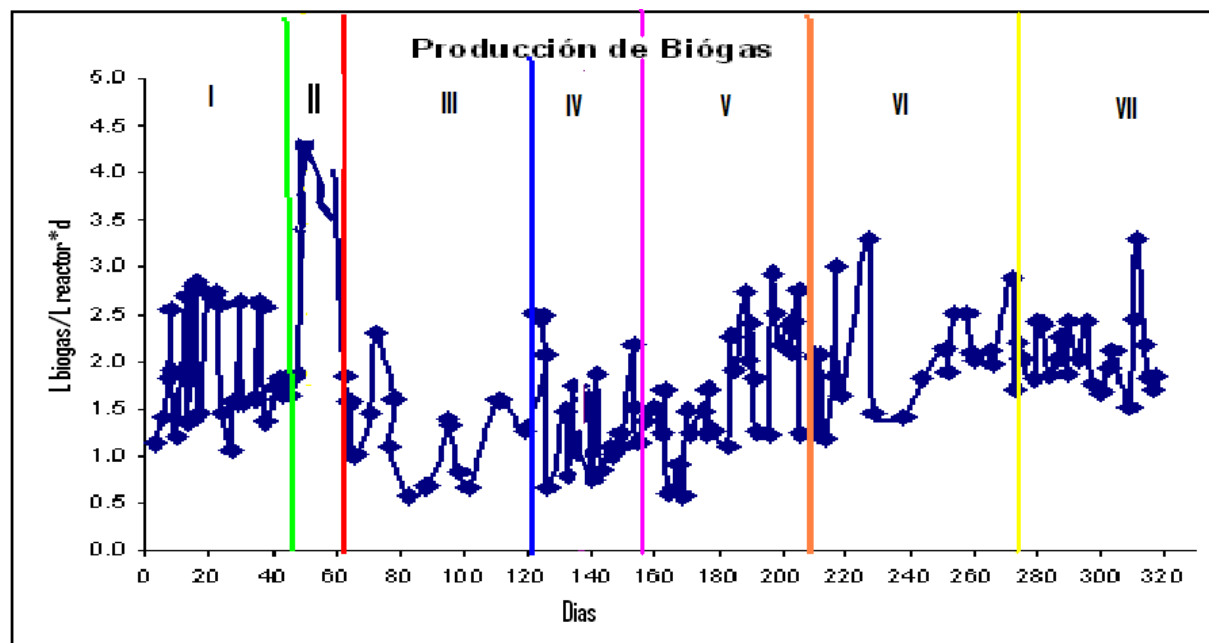


Fig. 2. Comportamiento del reactor UASB con reinoculación y tratamiento previo de calcio en la alimentación.

Tabla 2. Efecto del CO<sub>2</sub> en el pH y precipitación de carbonato de calcio en muestras de nejayote

Muestra	pHi	pHf	Cai g/L	Caf g/L	% Eficiencia
Nejayote (sedimentación mecánica)	12	12	3.66	3.1	15.3
Burbujeo con CO <sub>2</sub>					
1 minuto	12	9.2	3.1	2.8	9.6
2 minutos	12	8.2	3.1	1.9	38.7
3 minutos	12	7.8	3.1	2.1	32.2
5 minutos	12	7.2	3.1	2.2	29.0
1 L de sobrenadante	12	8.1	2.4	1.5	37.5
Mezcla nejayote + ARM (35 min)	12	8.3	2.1	1.0	52.3

Tabla 3. Variables de respuesta evaluadas en la digestión anaerobia del nejayote.

Etapa	COV gDQO/L*d	n%	pH	L biogás/ L*reactor* d	L/d CH <sub>4</sub>	ST	SV	SF	AM gDQO <sub>CH<sub>4</sub></sub> /gSV.d
I	1.8	85	7.7	1.9 ± 0.59	0.82	21.7	18.8	2.91	0.6
II	2.7	65	7.9	3.4 ± 1.11	0.95	ND	ND	ND	ND
III	1.5	79	7.9	1.5 ± 0.44	1.10	46.1	6.35	39.8	0.03
IV	0.9	73	8.3	1.3 ± 0.63	1.25	44.1	38.1	6.08	0.6
V	1.0	83	7.9	2.4 ± 0.50	1.21	55.8	49.4	6.38	0.8
VI	1.2	91	8.3	1.9 ± 0.60	1.94	1.31	ND	ND	ND
VII	1.5	94	8.2	1.9 ± 0.60	ND	ND	ND	ND	0.8

A partir del día 159 (etapa V) se alimenta el reactor con nejayote previa precipitación de calcio por burbujeo de CO<sub>2</sub>, (pH de 7.9), observándose un aumento en la eficiencia de remoción de la DQO en un 83%, con una producción de 2.45 L L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> de biogás, cuya composición fue de un 80 % de CH<sub>4</sub> y un 20% de CO<sub>2</sub>, indicando una mayor estabilidad en el sistema reflejada en un aumento de la actividad metanogénica (0.8 gDQO<sub>CH<sub>4</sub></sub> gSV<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). En las etapas (VI y VII), con un aumento gradual de la carga orgánica, la eficiencia en la remoción de DQO aumentó a más del 90% y la actividad metanogénica de los lodos permanece constante con una composición de CH<sub>4</sub> en el biogás de más del 80%.

Durante todas las etapas después de la reinoculación el comportamiento del reactor fue muy estable, reflejado por la gran capacidad de amortiguamiento en el sistema, ya que el pH permaneció cercano a la neutralidad, favoreciendo la metanogénesis. La precipitación del calcio en el nejayote y la neutralidad en el sistema favorecieron la actividad metabólica de los lodos, independientemente del aumento en la carga orgánica, coincidiendo con lo observado por Jackson-Moss y col. (1989).

La tabla 3, muestra las características del lodo granular y su proceso anaerobio metanogénico que se desarrolla en la reinoculación del reactor, así como

en la etapa previa a la precipitación del calcio en la alimentación. Se observa que los valores de los sólidos suspendidos totales y volátiles aumentaron, no así los sólidos fijos que permanecieron constantes debido a que la concentración de calcio en la alimentación fluctuó entre 300 y 400 mg de Ca<sup>2+</sup> en las etapas IV y VII. Estos son valores favorables para la formación de los gránulos, como lo reportan Reng y col (2008), lográndose una mejor adaptación del lodo al Ca<sup>2+</sup> presente en el nejayote, por lo tanto no se observó un efecto inhibitorio en la actividad de los lodos. Yu y col. en 2001 reportan que concentraciones de calcio menores a 300 mg L<sup>-1</sup> en el medio mejoran la actividad metanogénica de los lodos debido a que favorecen el proceso de granulación.

La figura 3 muestra los estados semiestacionarios de las distintas corridas, con cargas orgánicas volumétricas de 0.9 a 2.7 (gDQO L<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). Se observa que a mayores cargas orgánicas después de la precipitación del calcio en la alimentación, las eficiencias de remoción de la DQO aumentan. Esto significa que diluyendo el nejayote con agua residual municipal a cargas orgánicas entre 3-5 gDQO L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> sería suficiente para lograr altas eficiencias (mayores al 90%) en el reactor UASB, ya que la concentración de DQO en el nejayote es muy alta (20-30 gDQO.L<sup>-1</sup>) y podría haber inhibición de la DA si se alimenta sin

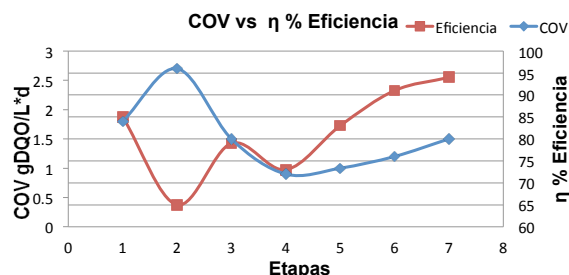


Fig. 3. Carga orgánica volumétrica versus eficiencias de remoción en el reactor UAB durante las etapas del tratamiento.

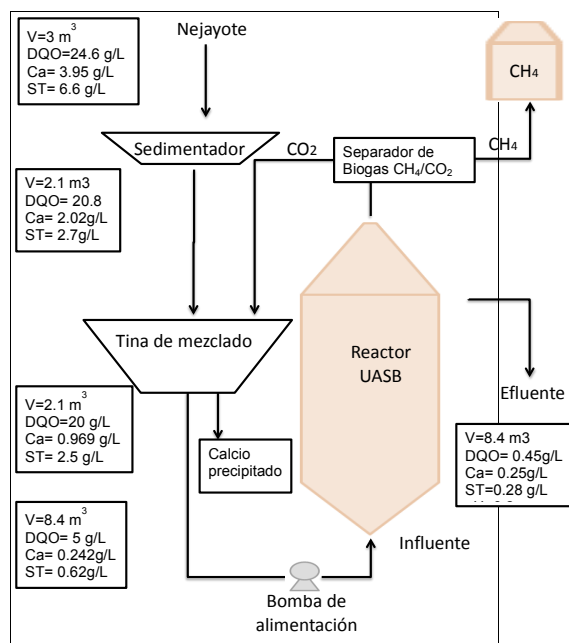


Fig. 4. Sistema físico-Químico-Biológico para el tratamiento de nejayote.

diluir. La dilución con agua residual es para ahorrar agua potable, además de que el agua residual de la UAM-I no aporta una gran cantidad de nutrientes y materia orgánica, comparada con este residual, como lo muestran Gan y col. (2013).

### 3.4 Propuesta de un sistema físico-químico-biológico para el tratamiento de nejayote a escala piloto

Para esta propuesta (Figura 4), se tomó en cuenta el volumen de nejayote producido en el molino “La Conchita” ubicado en la Delegación, Iztapalapa en donde se procesan 1-2 toneladas de maíz por día. En la nixtamalización se usa 1 m<sup>3</sup> de agua potable para

el lavado de maíz y 0.5 m<sup>3</sup> más para lavar el grano cocido, generando en promedio cerca de 3 m<sup>3</sup> de nejayote por día.

El sistema propuesto consiste de 4 pasos:

1. Sedimentación del nejayote. El nejayote producido pasará a un sedimentador cónico de acero inoxidable con una capacidad de 3 m<sup>3</sup> por un tiempo de 60-90 minutos para lograr una eficiencia de remoción de sólidos cercana al 50%. Los sólidos sedimentados podrán recircularse en la elaboración de la masa de maíz.
2. Precipitación de calcio. El calcio contenido en el sobrenadante, obtenido en el sedimentador se precipitará con CO<sub>2</sub>, burbujando 15 ml min<sup>-1</sup> durante el tiempo que sea necesario para obtener un pH cercano a 8 y lograr una eficiencia de remoción de calcio del 35 %. El residuo será separado y se evaluará su uso para reutilización en la elaboración de la masa de maíz.
3. Tratamiento biológico. El sobrenadante obtenido después de la precipitación del calcio, será diluido con agua residual municipal a fin de obtener una carga orgánica de 5 gDQO L<sup>-1</sup>, y alimentar un reactor UASB, que tendrá una capacidad de 8-9 m<sup>3</sup>. El reactor trabajará a un TRH de 24 horas, para obtener 5 m<sup>3</sup> de biogás por cada m<sup>3</sup> de nejayote, con eficiencias de remoción de la DQO cercanas al 90% y con una composición de CH<sub>4</sub> en el biogás del 90%.
4. Separación de biogás y uso. El CH<sub>4</sub> producido será separado del CO<sub>2</sub> y almacenado para usarse como combustible en el mismo molino para la cocción del maíz.

El CO<sub>2</sub> recuperado será almacenado para utilizarlo en la precipitación del calcio del nejayote.

El efluente del reactor UASB, bajo en concentración de DQO (≤ 200 mg/L) puede ser descargado al drenaje o pasar a un sistema de pulimiento (proceso aerobio) para utilizarse en el riego de áreas verdes.

## Conclusiones

- La digestión anaerobia es un proceso eficiente para el tratamiento del nejayote ya que se puede obtener eficiencias de remoción de la materia orgánica mayores al 90%. Cuando

se alimenta el nejayote diluido con agua residual, sin precipitación de calcio, la actividad metanogénica de los lodos granulares desciende a 20 veces su valor inicial ( $0.6$  a  $0.03$   $\text{gDQO}_{\text{CH}_4}$   $\text{gSV}^{-1}\text{d}^{-1}$ ), mientras que cuando se precipita el calcio del nejayote previo a la alimentación del reactor, la actividad de los lodos aumenta a  $0.8$   $\text{gDQO}_{\text{CH}_4}$   $\text{gSV}^{-1}\text{d}^{-1}$ , mejorando la concentración de metano (90%) en el biogás.

- Con el sistema propuesto se puede contribuir a resolver uno de los problemas de los residuos provenientes de los molinos de nixtamalización en México, ya que con una precipitación previa del nejayote se puede recuperar hasta el 50% de los sólidos totales, que pueden recircularse en la producción de la masa. Con el burbujeo de  $\text{CO}_2$  se neutraliza el residual y se puede precipitar hasta el 50% del calcio, haciendo más eficiente el proceso anaerobio. El metano separado del biogás se puede utilizar para la cocción del maíz y el  $\text{CO}_2$  en la precipitación de calcio del nejayote.

## Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo de la Universidad Autónoma Metropolitana por la beca otorgada para cursar la especialidad en Biotecnología.

## Referencias

- APHA, AWWA, WPCF. (2005). *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*. 21st. Ed. Am. Pub. Health Assoc. Washington DC, USA.
- Bermúdez Savon, Rosa Catalina, Suyen Rodriguez Perez, Mirna de la C. Martínez Abreu, Adis I. Terry Brown. (2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. *Tecnología Química* 2, 37-44.
- Fernández-Polanco F. and García Encina P. (1999). Informes industriales de operación. Graveland, A., van Dijk, J.C., de Moel, P.J. and Oomen, J.H.C.M. (1983). Developments in water softening by means of pellet reactors. *Journal-American Water Works Association* 75, 619-625.
- Gan J., Montañó G., Fajardo C., Meraz M. and Castilla P. (2013). Anaerobic co-treatment of leachates produced in a biodegradable urban solid waste composting plant in Mexico City. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 541-551.
- González S y Marmolejo C (1986). *Tratamiento de las aguas de desecho de la industria de la nixtamalización en un reactor anaerobio empacado*. Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería UNAM. 85 p.
- Gutiérrez Uribe, J.A., Rojas-García, C., García-Lara, S. y Serna-Saldival, S.O. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal Cereal Science* 52, 410-416.
- Jackson-Moss C.A., J.R. Duncan, D.R. Cooper (1989). The Effect of calcium on anaerobic digestion. *Biotechnology Letters* 11, 219-224.
- Langerak, E.P.A. van, Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G. (1997). Influent Calcium Removal by crystallization reusing anaerobic effluent alkalinity. *Water Science and Technology* 36, 341-348.
- Lettinga G. (1996). Sustainable integrated biological wastewater treatment. *Water Science and Technology* 33, 85-98.
- Ochoa, A. y Viniegra-González G. (2009). *Temas selectos de la cadena maíz-tortilla*. México, D.F. Impresiones y diseños de la Universidad Autónoma Metropolitana, 114.
- Pedroza y Duran (1989) Aerobic Treatment of Mize-Processing Wastewater in a 50 Liter a Rotating Biological Reactor. *Biological Wastes* 32, 17-27.
- Ramírez G, Viniegra G, Orozco C, Rico L. (2009). El nejayote, su tratamiento y uso. En: *Temas selectos de la cadena de maíz y tortilla. Un enfoque multidisciplinario*. Compiladores Ana Paula de Teresa Odonés y Gustavo Viniegra. Edit UAM. México.
- Ramírez-Romero G., Reyes-Velazquez M. y Cruz-Guerrero A. (2013). Estudio del nejayote como medio de crecimiento de probióticos y producción de bacteriocinas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 463-471.



- Ren T., Liu L., Sheng G.P., Liu X.W., Yu H.Q., Zhang M.C., Zhu J.R. (2008). Calcium spatial distribution in aerobic granules and its effects on granule structure, strength and bioactivity. *Water Research* 42, 3343-3352.
- Trejo-Gonzales, A., Feria-Morales, A.; Wild-Altamirano C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Advances in Chemistry Series* 198, 245-263.
- Vela, R., Fernandez-Polanco F. and Deban L. (2002). Determination of calcium in wastewaters of industrial process. *VII Symposium Internacional sobre metodología analítica aplicada al medio ambiente*. 20-22 de Marzo de 2002. Valladolid-España.
- Viguera-Carmona S.E., Ramírez-Vives F., Noyola-Robles A. y Monroy-Hermosillo O. (2011). Efecto del pretratamiento termo-alcálico en la digestión anaerobia mesofílica y termofílica de lodos residuales secundarios. *Revista de Ingeniería Química* 10, 247-255.
- Yong H.K., Sung H.Y., Jeong Y.R., Bong K.S. (2004). Development of a novel UASB/CO<sub>2</sub>-stripper system for the removal of calcium ion in paper wastewater. *Process Biochemistry* 39, 1393-1399.
- Yu H.Q., Tay J.H. and Fang H.P. (2001). The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. *Water Research* 35, 1052- 1060.