

DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE DOS TIPOS DE LACTOSUERO EN REACTORES UASB

MSc. Windy J. Guerrero-Rodríguez, windy_jacqueline85@hotmail.com, Dra. Patricia Castilla-Hernández, Karen N. Cárdenas-Medina, Dr. Carlos A. Gómez-Aldapa, Dr. Javier Castro-Rosas

Centro de Investigaciones Químicas, ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

El objetivo de este estudio fue evaluar la degradación anaerobia de lactosuero ácido y del producido después de la elaboración de requesón, para la obtención de metano utilizando reactores UASB operados a 1 día de TRH. Se utilizaron dos reactores de 2,5 L y fueron inoculados con lodos provenientes de una planta tratadora de aguas residuales de la industria quesera. Los reactores se operaron durante 84 días (lactosuero de requesón) y 95 días (lactosuero ácido), con una concentración de 1,0 y 2,5 g DQO/L. Los reactores alimentados con lactosuero de requesón y ácido a 1 g DQO/L tuvieron eficiencias de remoción promedio de 76,0 y 77,3 % y máximas de 90,7 y 100 %, con una producción de metano promedio de 0,30 y 0,43 L/día, respectivamente. A 2,5 g DQO/L las eficiencias de remoción promedio fueron de 33,7 y 56,0 % y las máximas de 44 y 69%, respectivamente, no mostrando un incremento en la producción de metano. En una tercera etapa los reactores fueron operados a las condiciones iniciales y presentaron eficiencias de remoción menores (59,0 y 62,0 %) a las alcanzadas en la primera condición. Se encontró que el inóculo y la temperatura tuvieron una influencia marcada en el proceso de degradación.

Palabras clave: lactosuero, contaminación, DQO, reactor UASB, Tulancingo.

The aim of this study was evaluated the anaerobic degradation of acid whey and the whey obtained from the elaboration of cottage cheese, for the methane production with UASB reactors operated to 1 day of HRT. Two reactors of 2,5 L were inoculated with sludge from a wastewater treatment plant of a cheeses factory. The reactors were operated during 84 days (whey of cottage cheese) and 95 days (acid whey), to a concentration of 1.0 and 2,5 g COD/L. The reactors fed with whey of cottage cheese and acid whey to 1 g COD/L had an average removal efficiency of 76,0 and 77,3 % and maximum of 90,7 and 100 %, with an average methane production of 0,30 and 0,43 L/day, respectively. To 2,5 g COD/L the average removal efficiencies were of 33,7 and 56,0 %, with a maximum of 44 y 69 %, respectively, and it not showed an increase of methane production. In a third stage, the reactors were operated to the initial conditions and presented removal efficiencies lower (59,0 and 62,0 %) than the reached in the first conditions. It was found that the inoculum and the temperature had influence marked in the degradation process.

Key words: whey, pollution, COD, UASB reactor, Tulancingo.

Introducción

La industria alimenticia es considerada una de las más contaminantes a nivel mundial, debido a que produce residuales con altas cargas orgánicas, las cuales son de difícil degradación en el ambiente. Una de estas industrias es la láctea, su principal residual es el lactosuero, subproducto que se obtiene durante la elaboración del queso tras la separación de la caseína, constituye aproximadamente el 85-95 % del volumen de la leche y contiene la mayor parte de los compuestos hidrosolubles de ésta /6/, se compone principalmente de lactosa, proteínas, grasas y minerales, con un contenido de materia orgánica entre 40 y 60 g/L de DBO y entre

50 y 80 g/L de DQO /8,11/. La composición del lactosuero varía con la leche utilizada y con el tipo de queso a fabricar, dependiendo del sistema de coagulación se obtienen dos tipos de lactosuero: el dulce y el ácido, con valores de pH entre 6,0-6,6 y 4,3-4,7, respectivamente /9/.

La continua descarga de lactosuero en los suelos puede dañar su estructura física y química, reducir la producción de cultivos e incluso puede provocar serios problemas de contaminación en aguas subterráneas y superficiales /8/. Según Saddoud *et al.* /11/, aproximadamente 47 % de las 115 millones de toneladas de lactosuero, producido a nivel mundial, fueron desechadas sin tratamiento previo al ambiente. En el estado de Hidalgo,

México, se encuentran establecidas un gran número de empresas procesadoras de lácteos, las cuales generan lactosuero dulce y ácido, con la mezcla de ambos producen requesón, dando origen a un tercer tipo de lactosuero.

Debido al alto costo de las tecnologías para el procesamiento del lactosuero, los tratamientos biológicos anaerobios son viables para residuales con altos contenidos de materia orgánica, no requieren la adición de oxígeno y generan cantidades significantes de energía en forma de metano. Sin embargo, la baja alcalinidad y la alta carga de demanda química de oxígeno (DQO) que presenta el lactosuero tienden a acidificarlo rápidamente, conllevando a problemas de estabilidad en el proceso de tratamiento /13/. Los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) han sido utilizados en las últimas décadas para el tratamiento de este tipo de residuales. Han evaluado concentraciones entre 12 y 60 g DQO/L, obteniendo eficiencias de remoción (ER) que varían entre 85 y 99 %, con tiempos de retención hidráulicos (TRH) de 6 días y cargas orgánicas volumétricas (COV) entre 2 y 7,3 g DQO/L día /4/. No obstante, los inconvenientes en este tipo de tratamientos son los largos TRH (5-20 días) que deben ser aplicados para evitar problemas de desestabilización y alcanzar eficiencias altas, sobre todo cuando se trata lactosuero no diluido /5/. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la degradación anaerobia de lactosuero ácido y del producido después de la elaboración de requesón, para la obtención de metano utilizando reactores UASB operados con 1 día de TRH.

Fundamentación teórica

La degradación anaerobia consiste en una serie de procesos microbiológicos que convierten

compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono /1,3/. El valor económico del metano producido por este proceso es uno de los principales motivos para la selección de esta tecnología de tratamiento /10/. La degradación anaerobia tiene muchas ventajas en comparación con los procesos aerobios, entre los que destacan: no requiere la adición de oxígeno, por lo tanto el costo del tratamiento es menor; bajo condiciones aerobias, 50 % del carbón orgánico es convertido a biomasa, mientras que, únicamente el 5 % es convertido a biomasa en condiciones anaerobias; el biogás producido contiene cerca del 90 % de energía, cuyo poder calorífico es de aproximadamente 9000 kcal/m³, y puede ser utilizado para proveer de calor a los digestores o utilizarse para la generación de energía eléctrica; la digestión anaerobia es viable para el tratamiento de aguas residuales con altas cargas orgánicas; la actividad microbiológica se preserva, incluso si el digestor no es alimentado por largos periodos /3/. La producción de metano es el paso final en una serie de reacciones bioquímicas, con el objetivo de degradar compuestos orgánicos. Ningún microorganismo es capaz de llevar a cabo todas estas reacciones en forma independiente. Comunidades de microorganismos trabajan en conjunto para convertir compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono (figura 1). De acuerdo a Gujer et Zehnder /7/, seis procesos pueden ser identificados en la digestión anaerobia: 1) hidrólisis de biopolímeros; 2) fermentación de aminoácidos y azúcares; 3) oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes; 4) oxidación anaerobia de productos intermedios como ácidos volátiles, excepto acetato; 5) conversión de acetato a metano y 6) conversión de hidrógeno a metano.

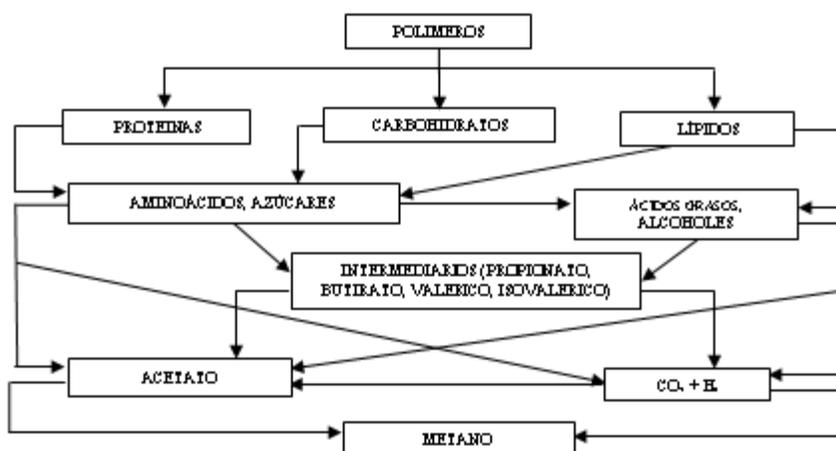


Fig. 1 Conversión de materia orgánica a metano y dióxido de carbono /10/.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Caracterización del lactosuero

Las muestras fueron analizadas por espectrofotometría en el equipo MilkoScan FT 6000 /15/. La caracterización del lactosuero de requesón y ácido utilizados en la experimentación, se muestra en la tabla 1; fueron obtenidos en la empresa quesera Vaquita Hermanos Guerrero localizada en el municipio de Acatlán, Hidalgo, México.

Tabla 1
Características de los
dos tipos de lactosuero utilizados

	Requesón	Ácido
pH	6,8	5,18
DQO (g/L)	52,8	72,6
Grasa %	0,18	0,6
Proteína (%)	0,49	1,13
Lactosa (%)	4,1	4,39
Sólidos totales (%)	5,13	6,5
Sales Minerales (%)	0,36	0,38

Características y condiciones de operación de los reactores UASB

Dos reactores UASB de 2,5 L de volumen fueron utilizados; se inocularon con 1/3 de su volumen, el inóculo contenía 26,3 g SSV/L, fue obtenido

de la PTAR de una industria quesera del municipio de Tulancingo, Hidalgo y tenía alrededor de ocho años expuesto a las aguas de proceso. Un reactor fue alimentado con lactosuero denominado de “requesón” y el segundo con lactosuero “ácido” clasificados según el proceso del que se originaron.

Ambos lactosueros fueron diluidos con agua corriente para tener una concentración de DQO total de 1 g/L correspondiente a una COV de 1 g DQO/L día. Cada litro fue suplementado con 5 mL de dos soluciones que contenían en g/L: (60) KH_2PO_4 y (60) K_2HPO_4 , respectivamente. Además se adicionaron de 1 a 2 g/L de NaHCO_3 . La concentración de DQO y COV fueron incrementadas a medida que en los reactores se alcanzaron y se mantuvieron ER entre 80 y 90 %. Los reactores se operaron a un TRH de 1 día. Fueron alimentados diariamente y monitoreados a través de la determinación diaria del pH y DQO del influente y efluente, relación de alcalinidad (RA) del efluente y producción de metano.

Métodos analíticos

La DQO total fue determinada por el método colorimétrico de reflujó cerrado /2/. El pH fue determinado con un potenciómetro modelo Oakton pH5/6. Los SSV fueron determinados por el método gravimétrico /2/. EL gas producido fue cuantificado por desplazamiento de una solución salina saturada de NaCl. La RA se determinó titulando 25 mL del efluente hasta un pH de 5,75 con una solución 0,02 N de H_2SO_4 , y continuando la titulación hasta un pH 4,3. La RA se calculó dividiendo los mL gastados a un pH 5,75 entre los mL gastados hasta un pH de 4,3.

Resultados y discusión

Degradación de lactosuero de requesón

La DQO del influente y efluente, el pH, la eficiencia de remoción y la carga orgánica volumétrica se muestran en la figura 2. El reactor

fue operado durante 84 días, como se puede observar en la figura 2 se inició alimentando 1 g DQO/L y una COV de 1 g DQO/L día, esta concentración y carga se mantuvieron aproximadamente 39 d con el objetivo de aclimatar a los microorganismos para la degradación de este tipo de lactosuero. Durante esta etapa, se agregaron 2 g NaHCO_3 /L de alimentación para mantener el pH; alcanzándose ER entre 50,9 y 90,7 %. Una vez que se mantuvieron ER entre 80 y 90 % no fue adicionado NaHCO_3 y se incrementó la concentración a 2,5 g DQO/L, correspondientes a una COV de 2,5 g DQO/L día (día 39), en esta segunda etapa se observó un descenso del pH en el efluente del reactor así como de la RA que cayó hasta valores de 0,13 generada por una gran cantidad de ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales no fueron totalmente transformados a metano; la ER disminuyó hasta un 18 % (día 46) ver figura 2b.

Para contrarrestar la acidificación y mantener a los microorganismos en condiciones de pH óptimo, inmediatamente se suplementó la alimentación con 2 g/L de NaHCO_3 . A partir del día 47 y hasta el día 75 las ER fluctuaron entre 18 y 44 %; el pH se mantuvo entre 5,6 y 7,35, la relación de alcalinidad entre 0,13 y 0,72. Lo anterior mostró que después de 36 días los microorganismos del reactor alimentados en esta condición no adquirieron la capacidad para degradar esta concentración de lactosuero. El día 78 se disminuyó la concentración y la carga a las condiciones iniciales (1,0 g DQO/L y a 1 g DQO/L día), sin embargo se observó que no mejoraron las ER del reactor manteniéndose entre un 55,9 y 64,8 %. En la figura 2d se muestra la producción de metano; la producción promedio en la primera etapa fue de 0,30 L/día, mientras que en la segunda de 0,32 L/d; finalmente cuando el reactor fue operado a las condiciones iniciales la producción ligeramente incrementó (0,37 L/d).

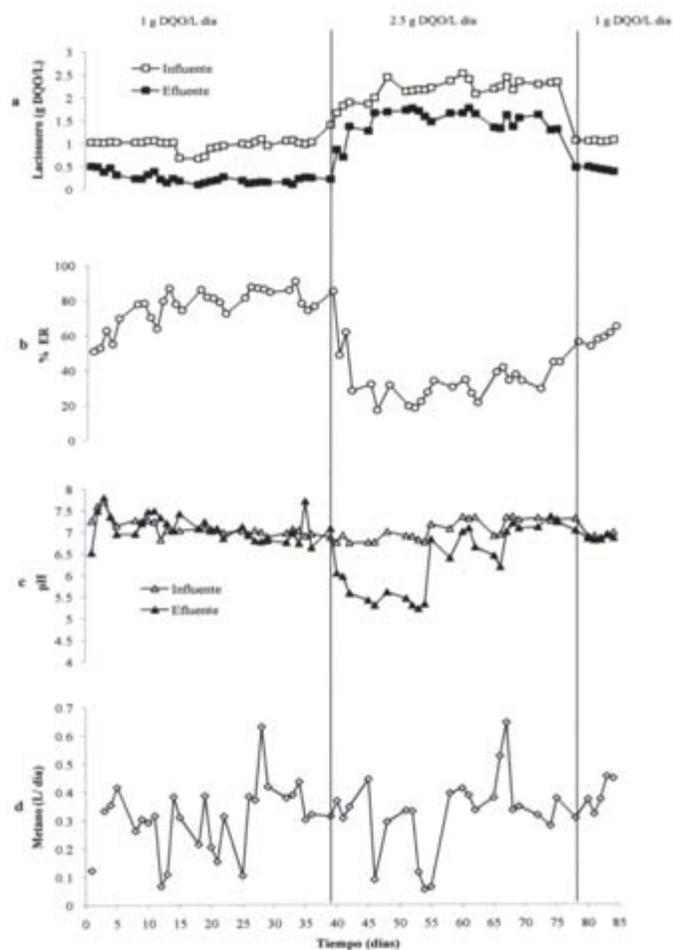


Fig. 2 Degradación de lactosuero de requesón en un reactor UASB. a) DQO lactosuero; b) % ER; c) pH; d) Producción de metano.

Degradación de lactosuero ácido

En comparación con el lactosuero de requesón, el ácido contiene una mayor cantidad de sólidos totales, lactosa, proteína y grasas como se muestra en la tabla 2. El reactor alimentado con este lactosuero operó durante 95 días. La DQO del influente y efluente, el pH, la eficiencia de remoción y la carga orgánica volumétrica se muestran en la figura 3. Se inició con 1 g DQO/L y una COV de 1 g DQO/L día, esta concentración y carga se mantuvieron durante 33 d con el objetivo de que los microorganismos se aclimataran a este lactosuero. Como se observa en la figura 3c el pH se mantuvo entre 6,6 y 8,2, intervalo óptimo para el desarrollo de bacterias metanogénicas /14/. Por su parte la RA osciló

entre 0,7 y 0,86, indicando una eficiente degradación del lactosuero (ER entre 57 y 100 %). La producción de metano fluctuó entre 0,28 y 0,70 L/d (figura 3d). El día 34 se incrementó la concentración a 2,5 g DQO/L día, correspondientes a una COV de 2,5 g DQO/L día, la alimentación se suplementó con 2 g/L de NaHCO_3 para evitar la disminución de pH y la RA, de acuerdo a la figura 3c el pH se mantuvo entre 7,4 y 7,7, sin embargo, la ER disminuyó drásticamente en comparación a la etapa anterior, oscilando entre 43,6 y 69 %, siendo la última la más alta (día 74). La RA permaneció, entre 0,65 y 0,68, lo que indica que a pesar de mantener condiciones de pH y RA óptimas para los microorganismos anaerobios estos no tuvieron la capacidad de degradar el lactosuero a esta concentración. El día 84, al igual que en el reactor

de requesón, la concentración y carga se modificaron a las condiciones iniciales, sin embargo se observó que no mejoraron las ER del reactor manteniéndose entre un 57,9 y 69,70 %. La producción de metano se mantuvo entre 0,16 y 0,31 L/d.

En la tabla 2 se resumen los resultados promedio de RA, ER y producción de metano durante las tres etapas de operación de los reactores. Como

se puede observar el reactor alimentado con lactosuero ácido mostró una mayor ER durante las tres etapas en comparación con el reactor alimentado con lactosuero de requesón. La RA de ambos reactores fue muy cercana, excepto en la etapa 2. La producción de metano presentó un ligero descenso en la etapa 3 del reactor alimentado con lactosuero ácido, sin embargo se observa que la producción se mantuvo entre 0,30 y 0,42 L/d.

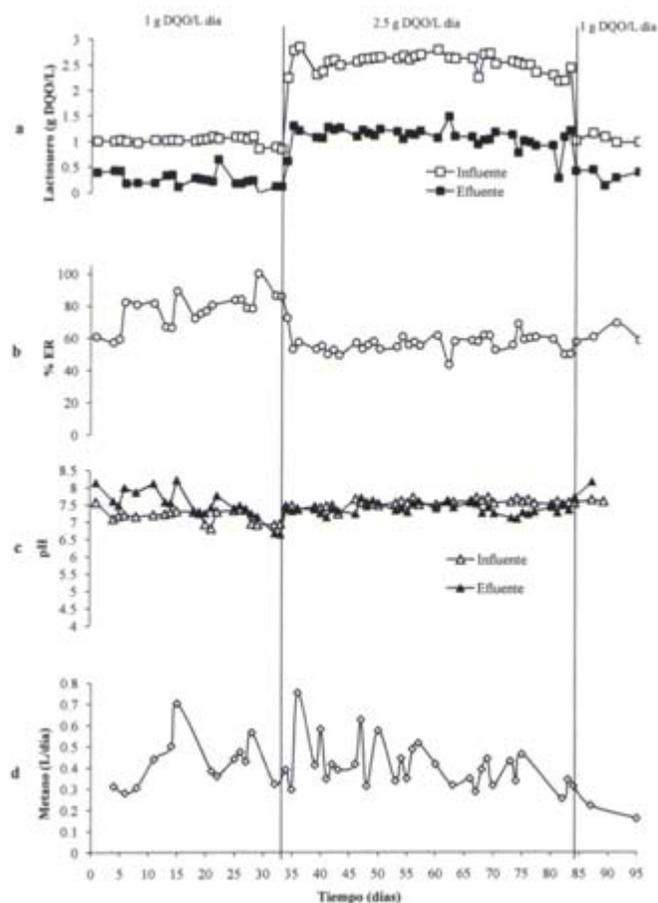


Fig. 3 Degradación de lactosuero ácido en un reactor UASB. a) DQO lactosuero; b) % ER; c) pH; d) Producción de metano.

De acuerdo a lo mencionado por otros autores, resulta complicado degradar el lactosuero debido a su baja alcalinidad, por lo tanto controlar este parámetro es fundamental en los procesos de degradación anaerobia, la baja alcalinidad del lactosuero conlleva a un incremento de los AGV provocando la acidificación del proceso anaerobio evitando la degradación de la materia orgánica presente en el lactosuero y una baja producción

de biogás /12,13/. En el caso de los lactosueros empleados en este estudio se observó que a concentraciones de 2,5 g DQO/L (2,5 g DQO/L d), el reactor alimentado con lactosuero de requesón presentó una acidificación importante a la que podría atribuirse las bajas ER, sin embargo el reactor alimentado con lactosuero ácido se mantuvo en condiciones óptimas y de igual manera los microorganismos no fueron capaces de alcanzar

ER por arriba del 70 %, lo anterior muestra que otros factores diferentes a la alcalinidad proba-

blemente evitaron la eficiente degradación de estos sustratos.

Tabla 2
Promedio de RA, ER y metano durante las etapas de operación de los reactores

Lactosuero	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3		
	RA	ER %	Metano (L/día)	RA	ER %	Metano (L/día)	RA	ER %	Metano (L/día)
Requesón	0,78	76,0	0,30	0,52	33,0	0,32	0,70	59,0	0,38
Ácido	0,79	77,3	0,42	0,66	56,7	0,41	0,78	62,0	0,23

Comparando entre reactores, un factor que pudo influir en los resultados obtenidos fue la temperatura a la que se llevaron a cabo los experimentos; en la primera etapa el reactor alimentado con lactosuero ácido operó a una temperatura ambiente de 25 °C, mientras que el de requesón a 20 °C, y a pesar de que el lactosuero ácido tuvo un mayor contenido de sólidos totales, lactosa, proteína y grasas, en la tabla 2 se observa que los microorganismos degradaron cantidades similares de materia orgánica. Durante la segunda etapa el reactor alimentado con lactosuero de requesón, estuvo expuesto a un descenso de la temperatura ambiente (13-14°C), que puede asociarse a la menor ER alcanzada en este reactor. Como se mencionó en un inicio, un parámetro que influye en el proceso de degradación es el TRH. Largos TRH conllevan a que los procesos se estabilicen y se obtengan ER altas, sin embargo puede ser poco atractivo cuando se producen grandes cantidades de residuales /5/, esto observa en la región de Tulancingo, Hidalgo en donde diariamente se generan cerca de 600 mil litros de lactosuero. No obstante en el caso de empresas pequeñas o artesanales emplear los reactores UASB operados a 1 día de TRH con concentraciones (g DQO/L) y cargas (g DQO/L d) de 1,0 para lactosuero de requesón o de hasta 1.41 para lactosuero ácido, puede ser una opción viable en la que el metano producido puede ser recuperado.

Por otra parte, se debe continuar el estudio utilizando inóculos procedentes de otras fuentes que puedan aclimatarse a los tipos de lactosuero

generados en esta región, a cortos TRH que permitan el tratamiento de los volúmenes producidos y a las condiciones de temperatura ambiente que se presentan en la región. Por otro lado algunos autores proponen llevar a cabo los procesos de degradación anaerobia en dos etapas (acidogénica y metanogénica) con el objetivo de controlar parámetros como pH, TRH, AGV y COV, para alcanzar ER entre 98,5 y 100 % /11/.

Conclusiones

Los reactores tuvieron la capacidad de degradar lactosuero de requesón y ácido con ER promedio de 76,0 y 77,3 % y máximas de 90,7 y 100 %, respectivamente; con una producción de metano promedio de 0,30 y 0,43 L/d cuando fueron operados a 1 día de TRH y una concentración y COV de 1g DQO/L y 1,0 g DQO/L día. Mientras que a 2,5 g DQO/L (2,5 g DQO/L día) las ER promedio fueron de 33,7 y 56,0 % y las máximas de 44 y 69 %, respectivamente; siendo la producción de metano de 0,32 y 0,41 L/d. Cuando los reactores fueron operados nuevamente a las condiciones iniciales estos presentaron ER menores a las alcanzadas en la primera etapa de operación (59,0 y 62,0 %). El inóculo y la temperatura tuvieron una influencia marcada en el proceso de degradación, caso contrario de la RA y pH. Es posible utilizar reactores UASB (TRH 1 d) para el tratamiento anaerobio de lactosuero de requesón y ácido con concentraciones de 1,0 y 1,41 g DQO/L, que pudieran generarse

en empresas pequeñas o artesanales. Para volúmenes mayores como los producidos en Tulancingo es necesario continuar el estudio para encontrar inóculos que puedan adaptarse a estos tipos de lactosuero, temperaturas, cortos TRH y altas COV.

Nomenclatura

DQO: demanda química de oxígeno
DBO: demanda bioquímica de oxígeno
RA: relación de alcalinidad del efluente.
TRH: tiempo de retención hidráulico
UASB: reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente
COV: carga orgánica volumétrica
pH: potencial de hidrógeno
PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales
SSV: sólidos suspendidos volátiles
ER: eficiencias de remoción %
AGV: ácidos grasos volátiles

Bibliografía

1. ANTONOPOULOU, G.; STAMATELATOU, K.; VENETSANEAS, N.; KORNAROS, M.; LYBERATOS, G., "Biohydrogen and methane production from cheese whey in a two-stage anaerobic process" en *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 47, 2008. Págs. 5227-5233, ISSN 0888-5885.
2. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21 edic., Washington D.C., USA, Editores American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2005, ISBN 0-87-553047-8.
3. BITTON, Gabriel, *Wastewater Microbiology*, 3ra. edic., New Jersey, Editorial John Wiley & Sons. Págs. 346-347, ISBN 978-04-70630-3-34. 2005.
4. DEMIREL, B.; YENIGUN, O.; ONAY T. T., "Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review", en *Process Biochemistry*, vol. 40, 2005. Págs. 2583-2595, ISSN 1359-5113.
5. ERGÜDER, T.H.; TEZEL, U.; GÜVEN, E.; DEMIRER, G.N.; "Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors", en *Waste Management*, vol. 21, 2001. Págs. 643-650, ISSN 0956-053X.
6. GARCÍA, G. M., "Alternativas de utilización del suero de leche" en *Información científica y tecnológica*, vol. 6, núm. 95, 1984. Págs. 5-41, ISSN 0188-5464.
7. GUJER, W., ZEHNDER, A.J.B., "Conversion processes in anaerobic digestion" en *Water Science Technology*, vol. 15, 1983. Págs. 127-167, ISSN 0273-1223.
8. KAVACIK, B.; TOPALOGLU, B., "Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure" en *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, 2010. Págs. 1321-1329, ISSN 0961-9534.
9. Madrid, Antonio, Vicente, *Tecnología quesera*, 2da. Edic., Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1999. Pág. 209, ISBN 84-7114-777-7.
10. DUNCAN, Mara; Horan, Nigel, *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*, 1a. edic., Londres, Editorial Elsevier, 2003. Págs. 39-396, ISBN 0-12-470100-0.
11. SADDOD, A.; HASSAÏRI, I.; SAYAD, S., "Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey" en *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98. Págs. 2102-2108, ISSN 0960-8524.
12. MOCHKAITIS, G.; RATUSZNEI, S.M.; RODRIGUES, J.A.D.; ZAIAT, M.; FORESTE, E. "Anaerobic whey treatment by a stirred sequencing batch reactor (ASBR): effects of organic loading and supplemented alkalinity" en *Journal of Environmental Management*, 2006, vol. 79. Págs. 198-206, ISSN 0301-4797.
13. BEZERRA, R.A.; RODRIGUES, J.A.D.; RATUSZNEI, S.M.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. "Whey treatment by AnSBBR with circulation: effects of organic loading, shock loads, and alkalinity supplementation" en *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2007, vol. 143. Págs. 257-275, ISSN 0273-2289.
14. MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. B., *Biología de los microorganismos*. 10 edic., España, Editorial Pearson Prentice Hall, 2004. Págs. 337, 353, 399, 400, 442, 449, 450, ISBN 8-42-053679-2.
15. FREDERIKSEN, P. D.; HAMMERSHOJ, M.; BAKMAN, M.; ANDERSEN, P.N; ANDERSEN, J. B.; QVIST K.B.; LARSEN, L.B. 2011. "Variations in coagulation properties of cheese milk from three Danish dairy breeds as determined by a new free oscillation rheometry-based method" en *Dairy Science & Technology*, 2011, vol. 91. Págs: 309-321, ISSN 1958-5594.