



Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea

Diego Felipe Tirado Armesto*, Luis Alberto Gallo García**,
Diofanor Acevedo Correa***, Javier Alejandro Mouthon Bello****

Waste water bio treatment in dairy industries

Biotratamentos de águas residuais na indústria láctea

RESUMEN

El objetivo de esta revisión fue consultar, analizar y concluir los principales tratamientos aplicados a las aguas residuales de la industria láctea. Las tecnologías que más se utilizan en el tratamiento de aguas residuales son los métodos biológicos y fisicoquímicos, así como también los microorganismos benéficos, microalgas, coagulantes, etc.; sin embargo, la digestión anaerobia es un proceso biológico que se

aplica en este tipo de aguas, debido a que tiene mayor ventaja en comparación con los otros tratamientos en el mayor grado de estabilización y bajo crecimiento de biomasa. Se encontró que las aguas residuales presentan altos niveles de sólidos disueltos o suspendidos, que incluyen grasas, aceites y nutrientes tales como amoníaco, minerales y fosfatos.

Palabras clave: biotratamientos, carga orgánica, composición, industria láctea, UASB

* Candidato a doctor en Ingeniería Química. Universidad Complutense de Madrid. Ingeniero de Alimentos, M.Sc. Ingeniería Ambiental, Universidad de Cartagena. e-mail: dtiradoa@unicartagena.edu.co. ** Estudiante de Ingeniería de Alimentos, Grupo de Investigación Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria (NUSCA), Universidad de Cartagena-Colombia. *** Ingeniero de Alimentos. Ph.D. en ingeniería de Alimentos. Docente Investigador Grupo de Investigación Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria (NUSCA), Universidad de Cartagena-Colombia. ****Ingeniero Civil. Doctor en Ingeniería Ambiental. Profesor Asociado Universidad de Cartagena.

ABSTRACT

This revision's objective was to consult, analyze and conclude the main treatments applied to waste waters from dairy industries. The most used technologies are the biological and physical-chemical ones, along with beneficial microorganisms, micro algae, coagulants, etc. Nevertheless, anaerobic digestion is a biological

process applied to waters of this sort, due to the fact it has greater advantages if compared to other treatments, like a higher stabilization degree and a low biomass growth. It was found that waste waters have high levels of dissolved or suspended solids, including fat, oils and nutrients such as ammonia, minerals and phosphates.

Key words: biotreatments, organic load, composition, dairy industry, UASB.

RESUMO

O objetivo desta revisão foi consultar, analisar e concluir os principais tratamentos aplicados às águas residuais da indústria láctea. As tecnologias que mais se utiliza no tratamento de águas residuais são os métodos biológicos e físico-químicos, assim como também os microrganismos benéficos, microalgas, coagulantes, etc.; mas, a digestão anaeróbia é um processo biológico que se aplica neste tipo de águas, devido a que tem

maior vantagem em comparação com os outros tratamentos no maior grau de estabilização e baixo crescimento de biomassa. Se encontrou que as águas residuais apresentam altos níveis de sólidos dissolvidos ou suspensos, que incluem gordura, aceites e nutrientes tais como amoníaco, minerais e fosfatos.

Palavras chave: biotratamentos, carga orgânica, composição, indústria láctea, UASB

INTRODUCCIÓN

La industrialización es la columna vertebral para el desarrollo de un país, pero la contaminación causada por esta es una preocupación grave en todo el mundo (Brião y Tavares, 2007). En los países industrializados la reducción y el control del consumo de agua están vinculados a la optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas. En cuanto a la mejora de los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales ya existentes, aún queda mucho por hacer (Seysiecq, Ferrasse, y Roche, 2003). Actualmente existe un interés global en evitar o reducir la contaminación ambiental. Sin embargo, un sinnúmero de contaminaciones sigue ocurriendo, sobre todo porque una gran parte de los efluentes que se generan en los procesos de producción industrial son difíciles de remediar mediante tratamientos convencionales (Barreto-Rodrigues, Aguiar y Da Cunha, 2009; Riera, Suárez y Muro, 2013).

El sector de los alimentos es uno de los ambientes que más consume agua y de los mayores productores de efluentes por unidad de producción, además de ser generador de un gran volumen de lodos en el tratamiento biológico. La industria láctea es un ejemplo de este sector, y es una de las fuentes más importantes de aguas residuales. Esta genera entre 3739 y 11.217 millones de m³ de residuos al año, es decir, 1 a 3 veces el volumen de leche procesada (Kushwaha, Srivastava, y Mall, 2011; Kothari Prasad, Kumar, y Singh, 2012; Tikariha y Sahu, 2014), siendo así una de las mayores fuentes de efluentes industriales en muchos países. Además, parte de las aguas residuales pueden filtrarse a las subterráneas, y afectar su calidad. El problema es aún más grave cuando esta agua vertida no es tratada (Tikariha y Sahu, 2014) y la eliminación de estas en ríos, tierra, campos y otros organismos acuáticos, con o sin tratamiento parcial, pronto ofrecerá un problema grave para la salud y la higiene mundial (Tikariha y Sahu, 2014). Investigaciones realizadas por Janczukowicz, Zielinski, y Dębowski, (2008)

demonstraron que todos los efluentes de procesamiento de productos lácteos pueden ser tratados en conjunto, con la excepción del suero de leche, cuya compleja biodegradación puede causar demasiada carga a cualquier sistema tecnológico en el tratamiento de aguas residuales; además se han puesto en marcha estudios para encontrar una solución para el tratamiento más barato, de fácil eliminación y utilización de aguas residuales procedentes de las unidades de procesamiento de la leche (Tikariha y Sahu, 2014).

El costo anual del tratamiento y la eliminación de las aguas residuales en una planta láctea parece estar en el orden de un millón de dólares (Tikariha y Sahu, 2014). La eliminación del agua sin tratar se está convirtiendo rápidamente en un problema económico y social importante que enfrenta la industria de elaboración de productos lácteos en muchos aspectos. Casi todas las fábricas de productos lácteos se enfrentan al problema del tratamiento, eliminación y aprovechamiento de las aguas residuales (Show, Tay y Hung, 2010).

Estas aguas servidas presentan desechos sólidos y materia orgánica que incluyen leche desperdiciada y agua de la limpieza, desinfección, calefacción, refrigeración y lavado de pisos. Las tasas de flujo y contenido de materia orgánica en estos efluentes oscilan entre 0,8 a 7,0g/L de demanda química de oxígeno (DQO) (Luo, Ding, Wan, Paullier, y Jaffrin 2010; Aydiner, Sen, Topcu, Ekinci, Altinay, Koseoglu-Imer y Keskinler, 2014). Este tipo de aguas requiere tratamientos especializados para cumplir con las normas de descarga de efluentes y para reducir el riesgo de problemas ambientales de ríos, lagos y aguas costeras (Aydiner *et al.* 2014).

Las plantas tradicionales de tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias lácteas se basan principalmente en procesos de lodos activados que consisten en tratamientos por los cuales el agua residual y el lodo biológico son mezclados y aireados en un reactor que involucra el metabolismo microbiano aeróbico de grasas, lactosa y proteínas (Katsoni, Mantzavinou y Diamadopoulos, 2014); y el tratamiento

anaeróbico que a menudo es inhibido por la presencia de grasas que causan la eliminación de nutrientes (Aydiner *et al.* 2014).

Existen métodos fisicoquímicos tales como desmenuamiento, flotación, micro-electrólisis y procesos de oxidación avanzada, que se pueden utilizar para efectuar el tratamiento de aguas residuales lácteas, pero el alto consumo de energía y la contaminación secundaria restringen su aplicación en la ingeniería de tratamiento de aguas residuales. Por el contrario, los procesos biológicos están tomando mayor atención para el tratamiento de aguas residuales debido a que son rentables, amigables con el medio ambiente y altamente eficientes (Suárez, Fidalgo y Riera, 2014).

El objetivo de esta revisión fue consultar, analizar y concluir los principales tratamientos aplicados a las aguas residuales de la industria láctea. Se estudió la composición de estas aguas, al igual que los diferentes tratamientos aplicados a ellas, en el uso de sistemas biológicos, hasta llegar al estudio de los reactores UASB como sistema biológico más recomendado para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales con alta carga de materia orgánica.

COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES LÁCTEAS

El agua residual, producto de la unidad de procesamiento de la leche, se genera en su mayoría en la pasteurización, homogeneización de la leche líquida y elaboración de productos lácteos tales como mantequilla, queso, leche en polvo, entre otros. El volumen, concentración y composición del efluente procedente de una planta de lácteos depende del tipo de producto que se está procesando, del programa de producción y de los métodos de operación y diseño de la planta de procesamiento (Farizoglu y Uzuner, 2011). La norma colombiana indica que los límites máximos de DBO deben ser de 400 mg/L para el sector lácteo (Resolución 631 de 2015).

Las aguas residuales lácteas son similares a la mayoría de las otras aguas residuales de las agroindustrias, caracterizadas por una alta demanda biológica de oxígeno (DBO) entre 2000 y 3000 mg/L y una DQO entre 2000 y 4000 mg/L (Arango y Sanches, 2009), concentraciones que representan alto contenido orgánico y altos niveles de sólidos disueltos o suspendidos, que incluyen grasas, aceites y nutrientes tales como amoníaco, minerales y fosfatos (Elakkiya y Matheswaran, 2013).

Generalmente son neutras o poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche produciendo ácido láctico, sobre todo en ausencia de oxígeno y la formación simultánea de ácido butírico, descendiendo el pH a 4,5 - 5,0. La alta concentración de materia orgánica en las aguas residuales provoca problemas de contaminación a los alrededores requiriendo tratamiento antes de ser descargadas en cuerpos de agua (Banu, Anandan, Kaliappan y Yeom, 2008).

La mayoría del agua se utiliza para la limpieza en sistemas (CIP) y con la ayuda de bombas, esa agua transporta soluciones de limpieza a través de todos los equipos instalados al sistema de producción. En la limpieza se utiliza solución cáustica (hidróxido de sodio) para lavado, enjuague con agua, solución ácida (ácido fosfórico o nítrico) para lavado y, finalmente, hipoclorito de sodio como desinfectante. Estos productos químicos, eventualmente, se convierten en una parte de las aguas residuales (Arango y Sánchez, 2009). Gran cantidad del agua se utiliza para limpiar las plantas de procesamiento de lácteos; por lo tanto, el agua residual resultante puede contener detergentes, desinfectantes, bases, sales y materia orgánica, dependiendo de la fuente (Belyea, Williams, Gieseke, Clevenger, Brown y Tumbleson, 1990).

Algunos autores como Arango y Garcés, (2007) y Arango (2012) consideran que la DQO de aguas residuales de la industria láctea obedece a la

composición, sobre todo de su cantidad de grasa, por lo que siempre resulta económicamente favorable separar las grasas utilizando trampas de grasa y, si estas aparecen junto con tenso activos en forma emulsionada, se separan por medio de flotación.

Algunos estudios contemplan la caracterización de aguas residuales industriales lácteas. Rosa, Peralta, Gilli y Bosco (2008) obtuvieron resultados promedios de DQO en el orden de los 5000 mg de O_2/L y pH de 7, con valores extremos de 3 y 11 cuando es efectuada la limpieza de las instalaciones. La composición de estas aguas incluye sustancias disueltas como lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas (caseína, albúminas, y globulinas) con una DQO entre 2000 y 4000 mg/L y una DBO entre 2000mg/L y 3000 mg/L (Rosa et al., 2008). Por su parte, Mazzucotelli, Durruty, Kotlar, Moreira, Ponce y Roura (2014) indicaron que las aguas residuales de la industria láctea son altamente contaminantes, y que este tipo de residuos normalmente exhibe una DBO de 1000 a 6000mg O_2/L , con una relación de DBO/DQO= 0,52, en comparación con Kushwaha, Srivastava y Mall (2010a) que caracterizó aguas residuales lácteas, reportando valores de DBO de 2300 mg/L, y Andrade, Méndez, Espíndola y Amaral, (2014) quienes obtuvieron valores de 1120 DBO mg/L en la aplicación de la nanofiltración de aguas residuales lácteas utilizando un biorreactor de membrana.

Finalmente, Andrade, Motta y Amaral, (2013) realizaron estudios utilizando un biorreactor con una membrana de microfiltración, aplicado al tratamiento de aguas residuales, simulando las aguas blancas producidas en el proceso de la limpieza de los equipos utilizados en la producción de queso, y observaron una concentración de DQO en el efluente que varió de 800 a 1200 mg/L.

En la tabla I se muestra una caracterización general de aguas residuales de la industria láctea publicada por diferentes investigadores.

Tabla 1. Características de las aguas residuales lácteas

Parámetros	Kushwaha, Srivastava, y Mall, (2010b)	Torres, Rodríguez, y Uribe, (2003)	Arango y Sanches, (2009)	Santamaría, Álvarez, Díaz, y Zamora (2015)	Normatividad colombiana, Resolución 631 de 2015
pH	6,3 - 6,8	4,7	7,6	4,74	6,0-9,0
DQO (mg/L)	3900	-	24813	18400	900
DBO (mg/L)	2300	3300	-	12500	450
DQO/DBO	1.69		-	1.47	2
Sólidos totales (mg/L)	3090	3030	40827	36,620	200
Sólidos volátiles (mg/L)	2810	-	18164	4,848	-
Sólidos totales fijos (mg/L)	280	-	-	4,848.	5
Turbidez	1744	-	-	3921	5
Conductividad (S/cm)	220	-	-	7820	50-1000
Cloruro (mg/L)	31	-	-	101,9	0,5
N total (mg/L)	113,18	191	636	104,4	10

Fuente: Kushwaha et al. (2010b)

TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA

La cantidad de agua residual que genera un producto lácteo es de 2 a 3 L de agua residual/Kg de producto. Estas aguas residuales pueden ser tratadas por métodos tradicionales de tratamiento aerobio, químico o por simple irrigación (Flores, Bautista, Egúsqiza y De La Torre, 2014).

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, tanto para las aguas residuales municipales como para las de la industria de productos lácteos, dependen, en gran medida, de fuentes de energía no renovables, sistemas de los cuales carecen los entornos agrícolas que se dedican a producir derivados lácteos (Morgan y Martin, 2008). Las aguas residuales lácteas son generalmente tratadas por métodos biológicos y fisicoquímicos. Estos últimos

normalmente resultan más costosos (Riera et al., 2013). Una alternativa principal para mejorar el funcionamiento de las plantas de aguas residuales en las empresas lácteas es el uso de microorganismos benéficos (MB), mezclas de hongos, bacterias y levaduras. Los MB son una alternativa frente al problema ambiental de la contaminación hídrica, debido a que estos MB pueden utilizar los compuestos contaminantes presentes en el agua residual como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento (Herrera y Corpas, 2013). Diferentes bacterias integran la mezcla de MB, como *Lactobacillus* spp., el cual producen ácido láctico, que elimina microorganismos dañinos y ayuda a la descomposición de materiales como la celulosa. Otro género de MB es *Saccharomycetes* spp., cuyos compuestos que forma son sustratos útiles para bacterias ácido lácticas (Fioravati, Vega, Hernández, Yeomans y Okumoto, 2005). También se han utilizado microorganismos eficientes como SCD EM™ que es un cultivo mixto de

microbios benéficos naturales compuestos por bacterias ácido lácticas, levaduras, actinomicetos y otra serie de microorganismos, que al ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales y al entrar en contacto con partículas orgánicas segregan sustancias como vitaminas, ácido láctico, quelatos y minerales que desarrollan el proceso de descomposición de la materia orgánica y previenen el deterioro por la oxidación. Córdoba, (2009) reportó valores de remoción superiores al 80 % tras la aplicación de SCD EM™ en el tratamiento de aguas residuales domésticas, con valores de DBO y DQO de 41 mg/L y 76 mg/L, respectivamente. En China e India, se aplicaron “microorganismos eficaces” para mejorar la estabilidad y la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados (Jin, Wang, Gong, Gu, Zhang, Shen y Li, 2005). Se encontró que el uso de la tecnología EM ayuda a reducir el volumen de los lodos; también reduce significativamente los costos de operación de la planta (Venkatachalapathy, Rajagopal, Krishnan, Karutha y Shunmugiah, 2007).

Entre los procesos de tratamiento biológico están el tratamiento en estanques, plantas de lodos activados y tratamiento anaeróbico. Por su parte, los métodos fisicoquímicos como la coagulación, el tratamiento electroquímico, la adsorción, entre otros, no son capaces de degradar completamente y eliminar los contaminantes, particularmente compuestos orgánicos disueltos (Kushwaha, Srivastava y Mall, 2010a, 2010c). Actualmente el método fisicoquímico más utilizado es el de la coagulación-floculación en el cual se pretende formar aglomerados de partículas contaminantes presentes en suspensión o disueltos, formando macroagregados para luego ser removidos por sedimentación o filtración (Arango, 2012; Arango y Garcés, 2007).

En la tabla 2 se observan los principales coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas superficiales y residuales, donde se detalla que la pitahaya fue la que reportó mejor poder coagulante en comparación con el alumbre. También el quitosano aplicado en dosis muy bajas mostró ser eficiente en la remoción de

partículas coloidales en aguas superficiales con alto valor de turbiedad. Además, se evidencia que el almidón de maíz fue el que mejor poder coagulante mostró con una remoción total de 99,42 % del contenido inicial de turbidez.

Entre los diversos procesos de tratamiento fisicoquímico para residuos de la industria láctea, se ha encontrado que la adsorción es más atractiva para la eliminación de compuestos orgánicos de las aguas residuales. El carbón activado (AC) se utiliza generalmente como un adsorbente para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales.

Las aguas residuales lácteas son difíciles de tratar debido a la presencia de moléculas orgánicas muy complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos; esto hace que los métodos de tratamiento convencional sean costosos y consuman mucho tiempo (Sedaqatvand, Esfahany, Behzad, Mohseni y Mardanpour, 2013). El propósito del tratamiento de aguas residuales lácteas es eliminar los contaminantes, especialmente nitrógeno y fósforo, a partir de corrientes, de manera que los efluentes tratados se conviertan en seguros para ser descargados en el medio ambiente (Amini, Younesi, Lorestani y Najafpour, 2013).

Las aguas residuales de la industria láctea son habitualmente tratadas con el uso de métodos biológicos tales como proceso de lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, reactor discontinuo secuencial (SBR), manto de lodo anaeróbico y reactor de filtros anaerobios (Kushwaha et al. 2010a).

Una amplia variedad de especies bacterianas participa en la oxidación de compuestos orgánicos complejos en las aguas residuales, incluyendo *hydrolysers*, fermentadores, acidogénicos, y exoelectrogenicos (Sedaqatvand et al. 2013). Sin embargo, el tratamiento anaeróbico no elimina completamente toda la materia orgánica y los nutrientes, por lo que se requiere postratamiento complementario. Hay un creciente interés en la combinación de membranas con el tratamiento biológico de aguas residuales (Vergara Quiroz y Jeison 2013).

Tabla 2. Coagulantes más comunes utilizados en el tratamiento de aguas residuales

Coagulantes	Dosis (mg/L)	Turbidez (NTU)	% de turbidez removida	Autores
Alumbre	30	7.1	95.1	Rodríguez, Lugo, Rojas y Malaver, (2007).
	50	0.8	99.5	
Almidón de yuca	50	175	82.86	
Almidón de maíz	20	175	99.42	
Pitahaya <i>Hylocereus undatus</i>	300	7243	99.5	
Quitosano	4	8323	95	Rodríguez Oñate, Gutiérrez y Caldera (2012).
	5	8323	93	
	6	8323	90	
Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) + Alumbre (10-90 %).	40	97.7	98.2	Contreras, Verbel, Ortega, Lozano y Mendoza (2015).

Fuente: elaborado por los autores

Los biorreactores de membrana (MBR) ofrecen ventajas sobre los procesos biológicos tradicionales: mayor eficiencia de biodegradación, una mejor calidad del agua tratada, el control absoluto de los sólidos y el tiempo de retención hidráulica, retención de todos los microorganismos y virus, y fácil control de las condiciones de funcionamiento (Farizoglu y Uzuner, 2011).

Grandes cantidades de aguas residuales con compuestos diluidos de la leche (lípidos, proteínas y lactosa) y productos químicos de limpieza (ácidos, álcalis y detergentes) se generan en las plantas de procesamiento de lácteos y representan una pérdida de agua y nutrientes, así como de contaminación. Entre las tecnologías disponibles para el tratamiento de estas aguas, la tecnología de membrana, especialmente la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO) han sido, a menudo, consideradas como un método prometedor; ya que puede permitir tanto la reutilización del agua como la recuperación de la proteína y de la lactosa en las mismas operaciones (Luo, et al. 2010; Luo, Ding, Qi, Jaffrin y Wan, 2011).

La aplicación de membranas en el tratamiento de aguas residuales lácteas es ampliamente utilizada

en conjunto con otros procesos (Suárez et al. 2014). Pero las ventajas de la filtración por membrana en el tratamiento de aguas residuales se debilitan por polarización de la concentración y el posterior ensuciamiento de la membrana, ya que provocan disminución del flujo y el deterioro de la calidad del permeado (Luo, Ding, Wan, Paullier y Jaffrin 2012).

Un nuevo método consiste en generar energía directamente a partir de la materia orgánica en las aguas residuales mediante tratamientos biológicos, resolviendo así al mismo tiempo un problema de la crisis energética y el daño ambiental (Elakkiya y Matheswaran, 2013). Kothari et al., (2012) realizaron estudios experimentales de crecimiento del alga unicelular *Chlorella pyrenoidosa* en aguas residuales de lácteos enfocados a la producción de biocombustibles y el tratamiento de estas aguas. Observaron que la reducción en el nivel de nitrato, nitrito, fosfato, fluoruro en el efluente fue de 49,09 %; 79,06 %; 83,23 % y 60,50 %, respectivamente. Además, los resultados mostraron mejor rendimiento de biomasa de *Chlorella* en el afluente. Los autores concluyeron que el uso de la biomasa de algas para el tratamiento de aguas residuales de industrias puede ayudar en la reducción de la carga contaminante en el sector del medio ambiente.

BIOTRATAMIENTO DE AGUAS EN LA INDUSTRIA LÁCTEA

Ha habido un creciente interés en el tratamiento de las aguas residuales de lácteos (Wang, Li, Chen, Min, Chen, Zhu, y Ruan, 2010), y la mayoría de los estudios se han concentrado en el uso de hongos y bacterias para reducir la carga orgánica de sus aguas residuales (Taştan, Ertuğrul y Dönmez, 2010; Kothari *et al.* 2012). Las aplicaciones prácticas de la biodegradación de contaminantes por las algas siguen siendo inciertas, y debe investigarse más. Sin embargo, en los últimos años se ha informado acerca de la capacidad de estos microorganismos para biotransformar y biodegradar fenol y otros contaminantes, lo que sugiere que estos organismos potencialmente podrían ser utilizados en el tratamiento biológico de suelos y aguas contaminadas (Maza-Márquez, Martínez-Toledo, Fenice, Andrade, Lasserrot y González-López, 2014).

Las faunas acuáticas consideradas para su uso en el tratamiento de aguas residuales incluyen protozoos, cladóceros y una gran variedad de peces, almejas, ostras y langostas. Aunque abundantes en las aguas residuales, la contribución de los protozoos para el tratamiento de estas se consideró insignificante hasta hace poco. Los protozoos en cultivo puro y las bacterias ayudan tanto en la clarificación del efluente como en la formación de lodos. La ausencia de protozoos en plantas a escala real se traduce en la calidad del efluente turbio e inferior (Shiny, Remani, Nirmala, Jalaja y Sasidharan, 2005).

Actualmente el uso de microalgas en el tratamiento y reciclaje de aguas residuales ha atraído un gran interés debido a la generación excesiva de biomasa a un costo más económico y sin entrada adicional de nutrientes (Kothari *et al.*, 2013; Amini *et al.*, 2013), pero la aplicabilidad de los bioprocesos en la protección ambiental y los procesos de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea se basan en investigar la forma en que los microorganismos actúan sobre el reciclaje de aguas residuales, la contaminación del aire y la recuperación del suelo. En este contexto, el modelado de bioprocesos de

tratamiento de aguas residuales, especialmente de los procesos biotecnológicos utilizados para las aguas residuales y el tratamiento de residuos orgánicos se convierte en una necesidad (Román, Selisteanu, Sendrescu y Bobasu, 2011).

La digestión anaeróbica es un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales de varias etapas mediante el cual las bacterias, en ausencia de oxígeno, descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono, metano y agua (Petre, Selişteanu y Şendrescu, 2013). Debido a sus ventajas respecto a los procesos aerobios en términos de mayor grado de estabilización de las aguas residuales, bajo crecimiento de biomasa y requerimientos nutricionales, producción de metano y no requerimiento de oxígeno, la digestión anaerobia es una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea (Arango y Sanches, 2009).

TRATAMIENTOS ANAEROBIOS

El tratamiento anaerobio de efluentes industriales lácteos posee una alta tasa de materia orgánica fácilmente hidrolizable, lo que dificulta la estabilidad del sistema, ya que la fase de acidificación ocurre de forma excesivamente rápida, principalmente cuando son aplicadas altas tasas de velocidad de carga orgánica en los reactores (Arango y Sánchez, 2009). La principal limitación para tratar el suero de quesería radica en su gran facilidad para acidificar, principalmente, cuando se utilizan velocidades de carga orgánica elevadas, donde las fases acidogénica y metanogénica se extienden hacia la parte superior del reactor, ocasionando la inestabilidad del sistema (Yan, Lo y Liao, 1990). Esa inestabilidad del proceso metanogénico durante el tratamiento anaerobio del suero del queso puede ser ocasionada por la gran cantidad de compuestos ácidos generados por la fermentación de la lactosa. La presencia y la acumulación de estos ácidos producen un descenso en el pH, promoviendo el crecimiento de bacterias acetogénicas e inhibiendo la actividad metanogénica (Arango y Sánchez, 2009; Nadais, Capela, Arroja y Hung, 2010).

Los procesos biológicos anaerobios han sido ampliamente aplicados en el tratamiento de aguas residuales agroindustriales como las de la fabricación de bebidas alcohólicas, productos lácteos, y cárnicos. Estos métodos son más eficaces y económicos cuando los compuestos orgánicos biodegradables se encuentran en elevada concentración (Arango y Sánchez, 2009). Según Turkdogan, Park, Evans, y Ellis, (2013); Arango y Sánchez (2009) algunas ventajas del proceso anaerobio en los residuos de la industria láctea son: producción de metano (gas combustible utilizado como fuente de energía); menor consumo de energía comparado con los tratamientos aeróbicos, resultando en costos operacionales más reducidos; la fracción de materia orgánica convertida en células bacterianas es relativamente baja (cerca de 10%) en relación con el tratamiento aerobio (cerca de 50 %), lo que significa que la cantidad de fango biológico formado es menor, y por ende, menores problemas de disposición de los mismos; las

unidades de tratamiento son cerradas evitando la generación de olores; tolerancia a elevadas cargas orgánicas, y finalmente, en la digestión anaerobia la materia orgánica es transformada por acción de microorganismos anaerobios y facultativos en gas carbónico y gas metano, aunque las reacciones que suceden son complejas.

REACTORES UASB QUE REVISAR

Los reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), también conocido como RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente) son un tipo de biorreactor tubular, que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el afluente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos (Malaspina, Cellamare, Stante, y Tilche, 1996).

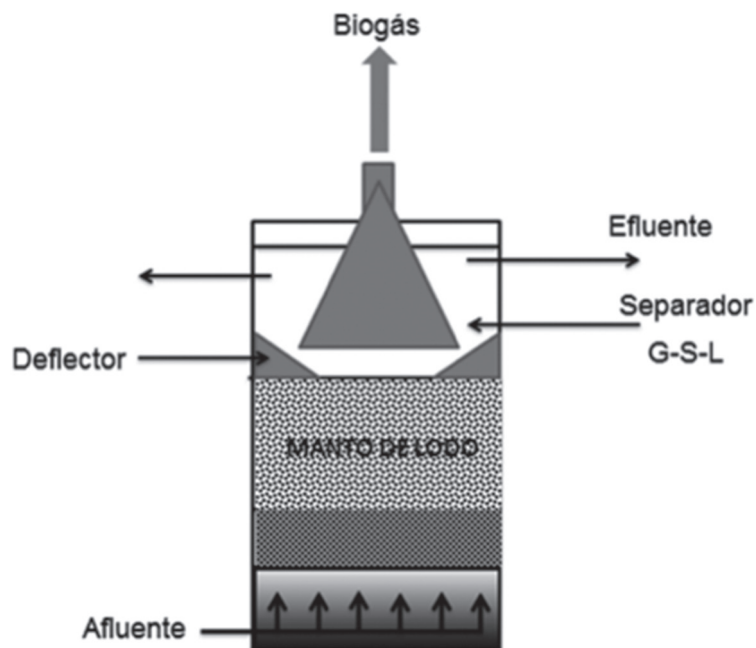


Figura 1. Esquema de reactor UASB

Fuente: Arango y Sánchez (2009)

Los reactores UASB fueron desarrollados para el tratamiento de aguas residuales industriales con una concentración de materia orgánica media y elevada (Tommaso Ribeiro, De Oliveira, Stamatelatou, Antonopoulou, Lyberatos, y Csanádi, 2012). En resumen, el reactor UASB es un tanque en el cual las aguas residuales de la industria láctea son introducidas en la parte inferior y salen por la parte superior, estableciendo un flujo ascendente, y la mezcla del sistema es promovida por el flujo ascensional del fluido y por las burbujas de gas.

Entre las ventajas de los reactores UASB se tienen: son sistemas compactos, con baja demanda de área, sin necesidad de utilización de un material de soporte, se obtienen niveles de remoción de DBO/DQO superiores al 80 %, bajo costo de operación, elevada concentración del lodo excedente, no necesitan de una unidad de espesamiento de lodo, bajo consumo de energía (Arango y Sánchez, 2009).

En estudios anteriores el empleo de estos sistemas en la depuración de aguas residuales de la agroindustria láctea ha presentado resultados satisfactorios, inclusive con cargas orgánicas superiores a los 20 g DQO/L/d (Kalyuzhnyi, Martínez y Martínez, 1999). Por su parte, Malaspina et al. (1996) lograron una depuración de 98,4 % a una velocidad de carga orgánica afluente de 10 g DQO/L/d. Hwang y Hansen (1992) obtuvieron rendimientos de eliminación de 96,9 % a velocidad de carga orgánica afluente de 10,3 g DQO/L/d. Otros autores como Erguder, Tezel, Güven, y Demirer, (2001) reportaron una eliminación de 91,9 y 97 % a velocidades de carga orgánica de 20,8 y 11,8 g DQO/L/d, respectivamente. En su investigación Ramasamy, Gajalakshmi, Sanjeevi, Jithesh, y Abbasi (2004) operaron un reactor UASB con aguas residuales de una industria láctea con tiempos de retención hidráulico (TRH) de 3 a 12 horas y velocidades de carga orgánica de 2,4 a 13,5 g DQO/L/d, y lograron niveles de reducción de DQO de 95,6 % y 96,3 %, respectivamente.

Finalmente, Arango y Sánchez (2009) operaron un reactor UASB con un tiempo de retención

hidráulico (TRH) de 1,3 días y velocidades de carga orgánica entre 1,7 a 18,5 g de DQO/L/d. Los máximos niveles de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y de sólidos totales volátiles (STV) alcanzados fueron 98 % y 97,2 %, respectivamente, con una velocidad de carga orgánica en el reactor de 9,6 g DQO/L/d, observándose una reducción en la eficiencia de remoción de la DQO hasta niveles de 77 % cuando la carga orgánica se llevó a 18,6 g DQO/L/d. Estos autores concluyeron que es recomendable el uso de reactores UASB para el tratamiento anaerobio de residuales de la industria láctea, ya que se obtendría un efluente de buena calidad para su descarga final.

En general, todos estos autores indican que los reactores UASB son sistemas bastante apropiados para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales con altas cargas de materia orgánica, tales como los sueros de queserías, (Buntner, Sánchez y Garrido, 2013), ya que permiten obtener eficiencias de remoción de DBO/DQO, superiores al 90 % con velocidades de carga orgánica de alrededor de 10 a 20 g DQO/L/d, y ofrecen otras ventajas como poco requerimiento de espacio, baja producción de lodos, bajo consumo de energía y bajos costos de operación (Arango y Sanches, 2009).

CONCLUSIONES

La importancia del tratamiento de aguas residuales en todas las industrias radica en la eliminación de moléculas altamente contaminantes al medio ambiente. Entre los métodos más recomendados se encuentran los tratamientos biológicos como la digestión anaeróbica y los lodos activados, los cuales alteran la materia orgánica produciendo diferentes gases que se utilizan como fuente de energía. Se pudo demostrar que la aplicación de microorganismos eficientes ayuda al proceso de descomposición de la materia orgánica, mejorando las características fisicoquímicas de aguas residuales. Sin embargo, la digestión anaerobia sigue siendo un proceso con mayor ventaja que la utilización de algas, coagulantes y otros procesos de tratamiento, puesto que

produce mayor grado de estabilización y bajo crecimiento de biomasa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amini, M.; Younesi, H.; Lorestani, A. A. y Najafpour, G. (2013). Determination of optimum conditions for dairy wastewater treatment in UAASB reactor for removal of nutrients. *Bioresource technology*, 145, 71-79.
- Andrade, L. H.; Motta, G. E. y Amaral, M. C. (2013). Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30, 759-770.
- Andrade, L. H.; Méndez, F. D.; Espíndola, J. C y Amaral, M. C. (2014). Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, 126, 21-29.
- Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59-67.
- Arango, A. y Garcés L. F. (2007). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 2(2), 23-30.
- Arango, O. y Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(2), 24-31.
- Aydiner, C.; Sen, U.; Topcu, S.; Ekinci, D.; Altınay, A. D.; Koseoglu-Imer, D. Y y Keskinler, B. (2014). Techno-economic viability of innovative membrane systems in water and mass recovery from dairy wastewater. *Journal of Membrane Science*, 458, 66-75.
- Banu, J. R.; Anandan, S.; Kaliappan, S y Yeom, I. T. (2008). Treatment of dairy wastewater using anaerobic and solar photocatalytic methods. *Solar Energy*, 82(9), 812-819.
- Barreto-Rodrigues, M.; Aguiar, C. M y Da Cunha, M. A. (2009). Biotreatment of an effluent from a wood laminate industry using *Lentinula edodes* UEC 2019. *Journal of hazardous materials*, 164(2), 1556-1560.
- Belyea, R. L.; Williams, J. E.; Gieseke, L.; Clevenger, T. E.; Brown, J. R y Tumbleson, M. E. (1990). Evaluation of Dairy Wastewater Solids as a Feed Ingredient. *Journal of Dairy Science*, 73(7), 1864-1871.
- Brião, V. B y Tavares, C. R. (2007). Effluent generation by the dairy industry: preventive attitudes and opportunities. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(4):487-497.
- Buntner, D. A. Sánchez, A. y Garrido, J. M. (2013). Feasibility of combined UASB and MBR system in dairy wastewater treatment at ambient temperatures. *Chemical Engineering Journal*, 230, 475-481.
- Córdoba, A. (2010). Evaluación de los Microorganismos Eficientes (SCD EMTM) en el Tratamiento de Aguas Residuales domesticas mejorando las características de vertimiento final. Available: <http://www.grupoprotech.net/scdem/publicaciones/informefinalptar.html>. Acceso 22 de julio de 2015.
- Contreras, K. P.; Verbel, R. O.; Ortega, G. P.; Lozano, K. P y Mendoza, Y. A. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción+ Limpia*, 10(1), 40-50.
- Elakkiya, E. y Matheswaran, M. (2013). Comparison of anodic metabolisms in bioelectricity production during treatment of dairy wastewater in Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 136, 407-412.
- Erguder, T. H.; Tezel, U.; Güven, E y Demirer, G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21, 643-650.
- Farizoglu, B y Uzuner, S. (2011). The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system. *Biochemical Engineering Journal*, 57, 46-54.
- Fioravati, M.; Vega, C.; Hernández, C.; Yeomans, J. y Okumoto, S. (2005). Eficiencia de los microorganismos eficaces (EM) en la estabilización de lodos sépticos para su uso agrícola. *Revista Tierra Tropical*, 1(09), 69-76.
- Flores, A.; Bautista, M.; Egúsqiza, R. y De La Torre, M. (2014). Desarrollo de bioprocesos para la reducción de los niveles de dbó y dqo de efluentes de la industria alimentaria. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 11(1), 3-10.

- Herrera, O. F y Corpas, E. J. (2013). Reducción de la contaminación en agua residual industrial láctea utilizando microorganismos benéficos. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11, 57-67.
- Hwang, S. H y Hansen, C. L. (1992). Biokinetics of an upflow anaerobic sludge blanket reactor treatment whey permeate. *Bioresource Technology*, 41, 223-230.
- Janczukowicz, W.; Zieliński, M y Dębowski, M. (2008). Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production. *Bioresource Technology*, 99(10), 4199-4205.
- Jin, M.; Wang, X. W., Gong, T. S.; Gu, C. Q.; Zhang, B.; Shen, Z. Q y Li, J. W. (2005). A novel membrane bioreactor enhanced by effective microorganisms for the treatment of domestic wastewater. *Appli. micro. and biotechn.* 69(2), 229-235.
- Kalyuzhnyi, S. V.; Martínez, E. P y Martínez, J. R. (1999). Anaerobic treatment of highstrength cheese-whey wastewater in laboratory and pilot UASB-Reactors. *Bioresource Technology*, 60, 59-65.
- Katsoni, A.; Mantzavinos, D. y Diamadopoulos, E. (2014). Coupling digestion in a pilot-scale UASB reactor and electrochemical oxidation over BDD anode to treat diluted cheese whey. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(21), 12170-12181.
- Kothari, R.; Pathak, V. V.; Kumar, V y Singh, D. P. (2012). Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: An integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresource technology*, 116, 466-470.
- Kothari, R.; Prasad, R.; Kumar, V y Singh, D. P. (2013). Production of biodiesel from microalgae *Chlamydomonas polypyrenoidum* grown on dairy industry wastewater. *Bioresource technology*, 144, 499-503.
- Kushwaha, J. P.; Srivastava, V. C. y Mall, I. D. (2010a). Organics removal from dairy wastewater by electrochemical treatment and residue disposal. *Separation and Purification Technology*, 76(2), 198-205.
- Kushwaha, J. P.; Srivastava, V. C y Mall, I. D. (2010b). Treatment of dairy wastewater by commercial activated carbon and bagasse fly ash: parametric, kinetic and equilibrium modelling, disposal studies. *Bioresource technology*, 101(10), 3474-3483.
- Kushwaha, J. P.; Srivastava, V. C y Mall, I. D. (2010c). Treatment of dairy wastewater by inorganic coagulants: Parametric and disposal studies. *Water research*, 44(20), 5867-5874.
- Kushwaha, J. P.; Srivastava, V. C. y Mall, I. D. (2011). An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51(5), 442-452.
- Luo, J.; Ding, L.; Qi, B.; Jaffrin, M. Y y Wan, Y. (2011). A two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater. *Bioresource Technology*, 102(16), 7437-7442.
- Luo, J.; Ding, L., Wan, Y., Paullier, P y Jaffrin, M. Y. (2010). Application of NF-RDM (nanofiltration rotating disk membrane) module under extreme hydraulic conditions for the treatment of dairy wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 163(3), 307-316.
- Luo, J.; Ding, L.; Wan, Y.; Paullier, P y Jaffrin, M. Y. (2012). Fouling behavior of dairy wastewater treatment by nanofiltration under shear-enhanced extreme hydraulic conditions. *Separation and Purification Technology*, 88, 79-86.
- Malaspina, F.; Cellamare, C. M.; Stante, L. y Tilche, A. (1996) "Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor". *Bioresource Technology*, 55, 131-139.
- Maza-Márquez, P.; Martínez-Toledo, M. V.; Fenice, M.; Andrade, L.; Lasserrot, A y González-López, J. (2014). Biotreatment of olive washing wastewater by a selected microalgal-bacterial consortium. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 88, 69-76.
- Mazzucotelli, C. A.; Durruty, I.; Kotlar, C. E.; Moreira, M. R.; Ponce, A. G y Roura, S. I. (2014). Development of a microbial consortium for dairy wastewater treatment. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 19(2), 221-230.
- Morgan, J. A. y Martín, J. F. (2008). Performance of an ecological treatment system at three strengths of dairy wastewater loading. *Ecological engineering*, 33(3), 195-209.
- Nadai, M. H.; Capela, M. I.; Arroja, L. M y Hung, Y. T. (2010). Anaerobic treatment of milk processing wastewater. *Handbook of Environmental Engineering*, 555-559.

- Petre, E., Selișteanu, D. y Șendrescu, D. (2013). Adaptive and robust-adaptive control strategies for anaerobic wastewater treatment bioprocesses. *Chemical Engineering Journal*, 217, 363-378.
- Ramasamy, E. V.; Gajalakshmi, S.; Sanjeevi, R.; Jithesh, M. N. y Abbasi, S. A. (2004). Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Bioresource Technology*, 93(2), 209-212.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Resolución 631 de 2015 "por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones". Recuperado de: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_0631_2015.htm#21. Acceso 15 de agosto de 2015.
- Riera, F.A.; Suárez, A. y Muro, C. (2013). Nanofiltration of UHT flash cooler condensates from a dairy factory: Characterisation and water reuse potential. *Desalination*, 309, 52-63.
- Rodríguez, J. P.; Lugo, I. P.; Rojas, A. V. y Malaver, C. (2007). Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral Científico*, 11, 8-16.
- Rodríguez, Y.; Oñate, H.; Gutiérrez, E. y Caldera, Y. (2012). Eficiencia del quitosano como coagulante en el tratamiento de aguas asociadas a la producción de petróleo mediano. *Impacto Científico*, 7(2), 52-64.
- Román, M.; Selisteanu, D.; Sendrescu, D y Bobasu, E. (2011). Notice of Retraction Modeling and Simulation of a Biological Wastewater Treatment Process inside Interconnected Tanks. In *Circuits, Communications and System (PACCS)*, 2011 Third Pacific-Asia Conference on (pp. 1-4). IEEE.
- Rosa, M. A.; Peralta, J. M.; Gilli, D. A. y Bosco, D. M. (2008). Cinética de la biodegradación de un efluente lácteo: aplicación de técnicas de análisis de datos para la comparación de modelos. *Información Tecnológica*, 19, 11-18.
- Santamaría, E.; Álvarez, F.; Díaz, E. S. y Zamora, M. (2015). Caracterización de los parámetros de calidad del agua para disminuir la contaminación durante el procesamiento de lácteos. *Agroindustrial Science*, 5(1), 13-26.
- Sedaqatvand, R.; Esfahany, M. N.; Behzad, T., Mohseni, M. y Mardanpour, M. M. (2013). Parameter estimation and characterization of a single-chamber microbial fuel cell for dairy wastewater treatment. *Bioresource technology*, 146, 247-253.
- Seysiecq, I.; Ferrasse, J. H. y Roche, N. (2003). State-of-the-art: rheological characterisation of wastewater treatment sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 16(1), 41-56.
- Shiny, K. J.; Remani, K. N.; Nirmala, E.; Jalaja, T. K y Sasidharan, V. K. (2005). Biotreatment of wastewater using aquatic invertebrates, *Daphnia magna* and *Paramecium caudatum*. *Bioresource Technology*, 96(1), 55-58.
- Show, K. Y.; Tay, J. H y Hung, Y. T. (2010). Global perspective of anaerobic treatment of industrial wastewater. In *Environmental Bioengineering*, p. 773-776.
- Suárez, A.; Fidalgo T. y Riera, F. A. (2014). Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water. *Separation and Purification Technology*, 133, 204-211.
- Taştan, B. E.; Ertuğrul, S. y Dönmez, G. (2010). Effective bioremoval of reactive dye and heavy metals by *Aspergillus versicolor*. *Bioresource technology*, 101(3), 870-876.
- Tikariha, A. y Sahu, O. (2014). Study of Characteristics and Treatments of Dairy Industry Waste Water. *Journal of Applied y Environmental Microbiology*, 2(1), 6-22.
- Tommaso, G.; Ribeiro, R.; De Oliveira, C. A. F.; Stamatelatos, K.; Antonopoulou, G.; Lyberatos, G. y Csanádi, J. (2012). Clean Strategies for the Management of Residues in Dairy Industries. In *Novel Technologies in Food Science*. Springer New York. 381-411.
- Torres, P.; Rodríguez, J. A. y Uribe, I. E. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*, 3(23), 75-80.
- Turkdogan, F. I.; Park, J.; Evans, E. A. y Ellis, T. G. (2013). Evaluation of pretreatment using UASB and SGBR reactors for pulp and paper plants wastewater treatment. *Water, Air, y Soil Pollution*, 224(5), 1-8.
- Venkatachalapathy, S.; Rajagopal, K.; Karutha, P.; Shunmugiah, T. (2007). Cost-effective activated

sludge process using Effective Microorganisms (EM). *Environmental health*, 7(1), 71-83.

- Vergara, C.; Quiroz, C y Jeison, D. (2013). Aplicación de membranas dinámicas auto-formantes para el tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 25-32.
- Wang, L.; Li, Y.; Chen, P.; Min, M.; Chen, Y.; Zhu, J y Ruan, R. R. (2010). Anaerobic digested dairy manure

as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource technology*, 101(8), 2623-2628.

- Yan, J. Q.; Lo, K. V. y Liao, P. H. (1990). Anaerobic digestión of cheese whey using an upflow anaerobic sludge blanket reactor: III sludge and substrate profiles. *Biomass*, 21, 257-271.