

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Digestión anaerobia en lechos bacterianos para remoción
de nutrientes y generación gas metano a partir de agua
residual de una extractora de aceite crudo de palma**

Proyecto de Investigación

Andrés Ricardo Dillon Viveros

Ingeniería Ambiental

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Quito, julio 22 de 2016

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Digestión anaerobia en lechos bacterianos para remoción de nutrientes y generación gas metano a partir de agua residual de una extractora de aceite crudo de palma

Andrés Ricardo Dillon Viveros

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Rodny Peñafiel, Ph.D. - Ing.

Firma del profesor

Quito, 22 de julio de 2016

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Andrés Ricardo Dillon Viveros

Código: 00025116

Cédula de Identidad: 171655548-5

Lugar y fecha: Quito, 22 de julio de 2016

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de desarrollarme como persona y como profesional, a mi madre y abuelos por su apoyo incondicional y a mi director de proyecto Rodny Peñafiel por haberme guiado con paciencia y empeño dentro de la formación como ingeniero ambiental.

Índice

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
2. Materiales y Métodos	13
2.1 Toma de muestras	13
2.2 Métodos analíticos	14
2.3 Bioensayos AME	14
2.4 Biodigestores.....	14
3. Resultados y discusión	16
3.1 Bioensayos AME	17
3.2 Biodigestores	18
3.3 Generación de metano.....	19
3.4 Remoción de amonio	20
4. Conclusiones	23
Referencias	25

Índice de tablas

<i>Tabla 1</i> Medio basal alimentación etapa 1, etapa 2 y etapa 3.....	15
<i>Tabla 2</i> Caracterización de la muestra Laguna 4	16
<i>Tabla 3</i> Actividad metanogénica específica y porcentaje de relación SSV/SST del agua de la Laguna 4	18

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Esquema de operación biodigestor 1	16
<i>Figura 2</i> Generación acumulada de CH ₄ del bioensayo en función del tiempo	17
<i>Figura 3</i> Concentración de DQO soluble	19
<i>Figura 4</i> Generación acumulada de CH ₄ en los biodigestores en función del tiempo de operación.	20
<i>Figura 5</i> Remoción de nitrógeno en el tiempo de operación. A) Biodigestor 1, b) Biodigestor 2, C) Biodigestor 3 y D) Biodigestor 4	23

Digestión anaerobia en lechos bacterianos para remoción de nutrientes y generación gas metano a partir de agua residual de una extractora de aceite crudo de palma

Andrés Dillon¹, Rodny Peñafiel¹

¹Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Colegio de Ciencias e Ingeniería, Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador.

Resumen

En el presente estudio se analiza la tasa de generación de metano y los procesos de remoción de la materia orgánica y nutrientes en biodigestores de lechos bacterianos a escala de laboratorio para purificar agua residual de una extractora ubicada en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. La operación de los reactores anaeróbicos se realizó en tres etapas en las que se alimentó diferentes mezclas de agua residual y medio basal: en la primera etapa se alimentó el medio basal con acetato, en la segunda etapa se alimentó el medio basal con acetato/glucosa y en la tercera etapa se alimentó medio el basal con acetato/glucosa y una creciente concentración de amonio. Como inóculo microbiano se usó agua de una laguna anaeróbica de la extractora. La actividad metanogénica específica (AME) del inóculo es inicialmente baja ($0.052 \text{ gDQO-CH}_4 \text{ gSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$), sin embargo la AME del efluente de los biodigestores aumentó hasta un valor de $0.42 \text{ gDQO-CH}_4 \text{ gSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$. El porcentaje de remoción de DQO promedio es de 86%. La mayor tasa de generación de metano fue 81.85 mL d^{-1} es decir 227 mL gDQO^{-1} . El porcentaje máximo de remoción de amonio es de 85%.

Palabras Clave: POME, anammox, digestión anaeróbica, actividad metanogénica, metano, biodigestores, DQO

Abstract

This study analyzes the methane generation and removal of organic matter and nutrients in attached growth laboratory biodigesters to treat wastewater from a palm oil mill located in Esmeraldas, Ecuador. Experiments were carried out in three different feeding stages consisting in a basal medium and wastewater from an anaerobic pond of the mill: in the first stage the feed included a basal medium with acetate; in the second stage a basal medium with acetate/glucose was used; in the third stage a basal medium with acetate/glucose and an increasing ammonium concentration was fed. Wastewater from an anaerobic pond of the mill was used as microbial inoculum. The initial specific methanogenic activity (SMA) of the inoculum is low ($0.052 \text{ gCOD-CH}_4 \text{ gSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$) nevertheless the SMA of the biodigester effluent increases to $0.42 \text{ gCOD-CH}_4 \text{ gSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$. The COD removal average is 86%. The highest methane generation rate was 81.85 mL d^{-1} , 227 mL gCOD^{-1} . The maximum ammonium removal was 85%.

Keywords: POME, anammox, methanogenic activity, methane, bioreactor, anaerobic digestion, COD

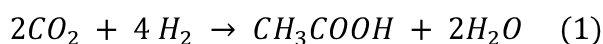
Introducción

La industria de extracción de aceite crudo de palma es una actividad que puede generar significativos problemas ambientales relacionados con la generación de residuos sólidos, contaminación de cuerpos de agua y suelos, emisión de gases de efecto invernadero, pérdida de la biodiversidad y deforestación (WWF, 2004). En el Ecuador la producción de aceite de palma ha crecido un 7% en la última década, utilizando 250 000 hectáreas de terreno, generando entre 2.5 a 3 m³ de agua residual “POME” (*Palm Oil Mill Effluent*) por tonelada de aceite crudo de palma (ANCUPA, 2015). Estas descargas por sus altas cantidades de materia orgánica necesita de tratamientos previos para que sean descargados en cuerpo de agua o en el alcantarillado cumpliendo los mandatos establecidos TULAS en relación al Manejo y Calidad del Agua (Muñoz, 2010).

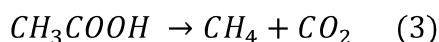
La aplicación de tecnologías como la digestión anaeróbica tiene varias ventajas en comparación a otras tecnologías como la aplicación de tratamiento aeróbicos (Igwe y Onyegbado, 2007). Entre sus ventajas principales se encuentra el menor costo de aplicación de dicha tecnología, utilización de microorganismos remediadores nativos y propios del efluente, remoción de carga orgánica y de nutrientes y la generación de productos energéticos como el biogás compuesto principalmente de CH₄, el cual puede ser utilizado dentro de la misma industria reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero GEI, costos operacionales, además de promover la utilización de energías renovables (Rupani et al., 2010).

La digestión anaerobia consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En cada una de estas intervienen distintos microorganismos simbióticos y competidores. En la etapa inicial: Se produce la hidrólisis del material orgánico particulado y macromoléculas mediante reacciones de óxido-reducción catalizada por enzimas

extracelulares de microorganismos fermentativos, generando compuestos orgánicos solubles precursores de la acidogénesis los cuales se metabolizan en el interior de las células (Teng et al., 2013). En la acidogénesis, la fermentación se realiza en presencia de bacterias acidogénicas anaeróbicas obligadas o facultativas quienes fermentan compuestos solubles de la hidrólisis en ácidos orgánicos como el acético propiónico y butírico (El-Fadel y Massoud, 2001). Etapa acetogénica: las bacterias acetogénicas donantes de H_2 , CO_2 y acetato, transforman los productos de la acidogénesis por medio de la deshidrogenación acetogénica la cual puede fermentar ácidos grasos volátiles (Ecuación 1), lactatos y alcoholes o sintetizar el acetato a partir de H_2 , CO_2 (Nayano et al., 2010).



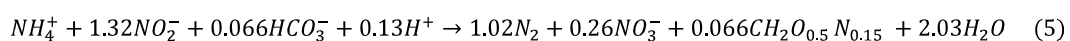
La última etapa de fermentación metanogénica: los organismos metanogénicos forman metano y dióxido de carbono a partir de sustratos orgánicos sencillos mono carbonatados como el ácido acético (Cecchi et al., 1989). Esta degradación se produce principalmente por dos grupos de microorganismos anaeróbicos estrictos: los microorganismos metanogénicos acetoclásticos, los cuales degradan el ácido acético en metano y dióxido de carbono (Ecuación 2) y las bacterias metanogénicas hidrogenófilas las cuales reducen el dióxido de carbono con hidrógeno y producen metano y agua (Ecuación 3) (Jetten et al., 2005)



Estudios de Garzón y Peñafiel (2015) realizados en biodigestores de 2 litros con inóculos de la Laguna 4 y desarrollados en una etapa inicial con agua de la Laguna 3 como sustrato y en una etapa posterior con medio basal acetato, mostraron que la generación máxima es alcanzada mediante la alimentación de acetato como sustrato dando como resultado una generación de CH_4 de 62.14 mL d^{-1} (Pazmiño y Peñafiel., 2015).

La problemática entorno a las altas concentraciones de nitrógeno en el *POME*, radica en la eutrofización y disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos de aguas receptoras causando detrimento de la vida acuática (Bae et al., 1998). La remoción biológica de nitrógeno del agua residual se puede desarrollar por nitrificación y desnitrificación, procesos que requieren altas cantidades de energía y se los realiza en secciones separadas del bioreactor, debido al requerimiento de oxígeno por los microorganismos nitrificantes (sección aeróbica) y la ausencia de oxígeno para los desnitrificantes (sección anóxica) (Strous et al 1997). Estos procesos implican altos costos económicos debido a la adición de oxígeno en el proceso de nitrificación. Se necesita 4.57 g O₂ por cada g-N-NH₄⁺ para oxidar el amonio a nitrato. Por otra parte, para llevar a cabo el proceso de desnitrificación es necesario la adición de materia orgánica (4.6 g DBO₅ por cada g-N-NO₃⁻ reducido) (López, 2009)

El proceso anammox (*Anaerobic Ammonium Oxidation*) se presenta como alternativa para la remoción de nitrógeno por procesos biológicos. Las bacterias anammox, microorganismos quimiolitotrofos, oxidan el amonio en condiciones anaeróbicas utilizando el nitrito como aceptor de electrones (Ecuación 5). La ventaja principal de este proceso en relación a procesos convencionales radica en que los microorganismos no necesitan cantidades altas de materia orgánica biodegradable para realizar el proceso de oxidación de amonio, además la biomasa generada por procesos anammox (0.066 mol-C·mol⁻¹ NH₄⁺ eliminado) es menor que la producida por los procesos de nitrificación (0.105 mol C·mol⁻¹ NH₄⁺ eliminado) (Strous, 1997).



El lento crecimiento de la biomasa anammox es la principal desventaja al momento de la aplicación de este proceso debido a su velocidad específica de crecimiento con $\mu_{max} = 0.065 \text{ d}^{-1}$, y un tiempo de duplicación $t_{1/2}$ es de 11 días, velocidad 11 veces menor en comparación a microorganismos nitrificantes (Beun, 2000). Este lento crecimiento de la bacterias anammox está relacionado con la baja velocidad específica de consumo de amonio,

$0.04 \mu\text{mol NH}_4^+ \text{ mg de proteína}^{-1} \text{ min}^{-1}$, velocidad siete veces menor a la de las bacterias oxidantes del amonio $0.3 \mu\text{mol NH}_4^+ \text{ mg de proteína}^{-1} \text{ min}^{-1}$ (Jetten et al., 2001).

La utilización de tecnologías en reactores que eviten la movilización microbiana en biodigestores promueve una mayor eficiencia en el aumento de la actividad microbiana de digestión (Bermúdez, 2000). El lento crecimiento de las bacterias anammox requiere la aplicación de tecnologías que permitan una importante retención de la biomasa. Los dos principales sistemas utilizados para la acumulación de biomasa se dividen en sistemas con biomasa fijada en lechos bacterianos y procesos de biomasa en suspensión (Rojas et al., 2008). Las tecnologías de lechos bacterianos con mayor aplicabilidad son filtros anaerobios y reactores fluidificados (Guerra et al 2001). Los filtros anaerobios permiten que los microorganismos se encuentren fijados sobre la superficie de un material o soporte inerte el cual permite que se atrapen y se generen biopelículas en intersticios. Los reactores fluidificados trabajan mediante la fijación de los microorganismos sobre partículas de materia inerte que se encuentran fluidificadas por el flujo ascendente del fluido (Rojas et al., 2008). Estos procesos promueven el incremento y la retención de la biomasa dando como resultado que la biomasa formada no sea extraída en el efluente (Lozano et al 2004).

Los objetivos del presente estudio son: 1) evaluar la operación de biodigestores anaerobios de lechos bacterianos a escala laboratorio en tres etapas en las que se varía su alimentación; 2) determinar la producción de gas metano en cada biodigestor; 3) analizar la eficiencia del proceso de remoción materia orgánica y amonio.

2. Materiales y Métodos

2.1 Toma de muestras

Las muestras de agua para el presente estudio se tomaron de la laguna anaerobia “Laguna 4” del sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria extractora de aceite de

palma ubicada de la Provincia de Esmeraldas Ecuador. Agua residual de esta laguna mostró en estudios previos de Pazmiño y Peñafiel (2015) una elevada actividad metanogénica específica.

2.2 Métodos analíticos

Los parámetros determinados se realizaron de acuerdo a los protocolos del LIA-USFQ que se basan en los métodos estándar para el análisis de agua y agua residual de la APHA (*American Public Health Association*) (APHA, 2012) y de la EPA (*Environmental Protection Agency*) (epa, 2000): demanda química de oxígeno total y soluble (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), nitratos, amonio, pH y potencial redox.

2.3 Bioensayos AME

Los bioensayos AME (Actividad Metanogénica Específica) se desarrollaron mediante el método de desplazamiento de líquido utilizando medio basal de acetato descrito en el estudio desarrollado por Garzón y Peñafiel (2015).

2.4 Biodigestores

Se instalaron 4 biodigestores herméticos de 4 L de capacidad con un volumen de operación de 3 L (Figura 1). En cada biodigestor se colocó una malla plástica de polietileno de alta densidad para soporte de trozos de mangueras para promover la fijación microbiana (lecho bacteriano). Los biodigestores se arrancaron con una mezcla de 2700 mL de medio basal acetato (Tabla 1) y 300 mL de agua de Laguna 4 (Tabla 2). En la primera etapa se alimentó únicamente con 90% de medio basal acetato y 10% agua de la Laguna 4. En la segunda etapa se alimentó con 90% de medio basal acetato + glucosa y 10% agua de la Laguna 4. En la tercera etapa se incrementó semanalmente la concentración de amonio en el medio basal glucosa + acetato (Tabla 1). El volumen de alimentación fue 150 mL d⁻¹ con un

tiempo retención hidráulico (*Hydraulic Retention Time, HRT*) de 20 días y con carga orgánica de 0.12 g DQO d⁻¹.

Tabla 1 Medio basal alimentación etapa 1, etapa 2 y etapa 3

Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		
Medio basal acetato		Medio basal (acetato + glucosa)		Medio basal (acetato + glucosa)		
Compuesto	[mg L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]		
NH ₄ Cl	280	280	286.4	292.8	299.2	305.6
KH ₂ PO ₄	250	250	250	250	250	250
MgSO ₄ ·7H ₂ O	100	100	100	100	100	100
CaCl ₂	10	10	10	10	10	10
NaHCO ₃	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Extracto de levadura	10	10	10	10	10	10
Solución de elementos traza ¹	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL
CH ₃ COONa 3H ₂ O*	5316	2658	2658	2658	2658	2658
NaHPO ₄		148	148	148	148	148
Glucosa	-	2343	2343	2343	2343	2343

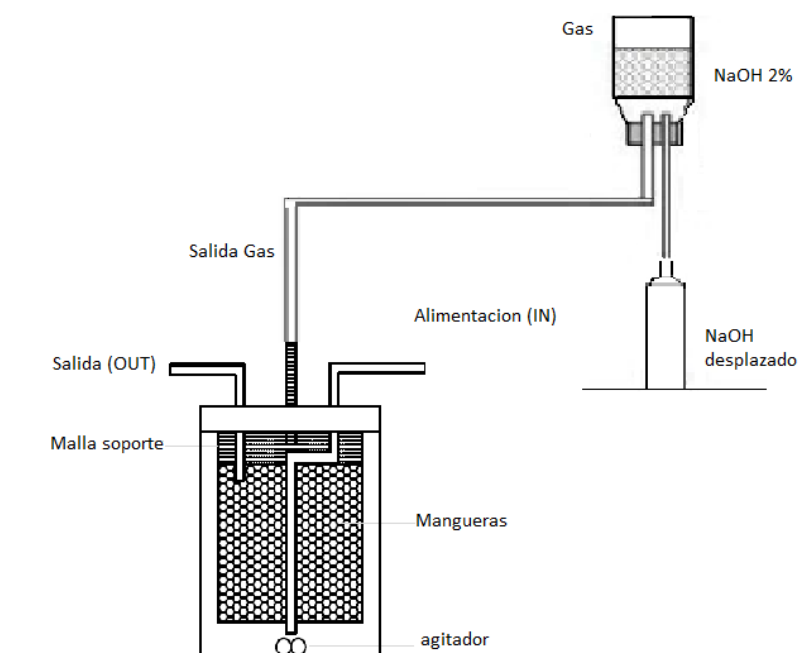


Figura 1 Esquema de operación biodigestor 1

3. Resultados y discusión

La caracterización físico química del agua de la Laguna 4 del sistema de tratamiento de la planta extractora de aceite de crudo de palma se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2 Caracterización de la muestra Laguna 4

PARAMETRO	Unidad	Laguna 4
pH		7.06
DQO _{Soluble}	[mg/L]	1497
Sólidos totales	[g/L]	4.1
Sólidos volátiles	[g/L]	1.4
Sólidos suspendidos totales	[g/L]	0.1
Sólidos suspendidos volátiles	[g/L]	0.09
Nitrato	[mg/L]	221
Amonio	[mg/L]	226

En la Tabla 2 se puede observar que el pH se encuentra en un rango neutro. La DQO de Laguna 4 es alta debido a la cantidad de materia orgánica que se descarga en el proceso de

extracción del aceite de palma (Tchobanoglous et al., 2010). En relación a los sólidos del agua de la Laguna 4 se presentan valores de ST y SV de 4.1 y 1.4 g L⁻¹ respectivamente, además que los SST y SSV se encuentran entre 0.1 y 0.09 g L⁻¹. Los sólidos volátiles son un medida indirecta de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra la Laguna 4. Con respecto a la concentración de nitrato en la Laguna 4 se puede notar que existe una concentración de 221 mg NO₃ L⁻¹. Por otro lado la concentración de amonio se encuentra en 226 mg NH₄⁺ L⁻¹ y se relaciona con las condiciones anaeróbicas de la Laguna 4.

3.1 Bioensayos AME

La AME evalúa la capacidad que tienen los microorganismos metanogénicos para convertir un sustrato orgánico (acetato) en CO₂ y CH₄ bajo condiciones controladas (Cheng et al., 2012). La Figura 2 muestra la producción de gas metano (moles) en función del tiempo. Se puede observar la tendencia de producción de metano es similar a la literatura, es decir con estados de crecimiento graduales y fases estacionarias (Rodríguez, 2009). La Tabla 3 presenta la actividad metanogénica específica del inoculo Laguna 4 y del biodigestor 1, 175 días después del inicio de su operación.

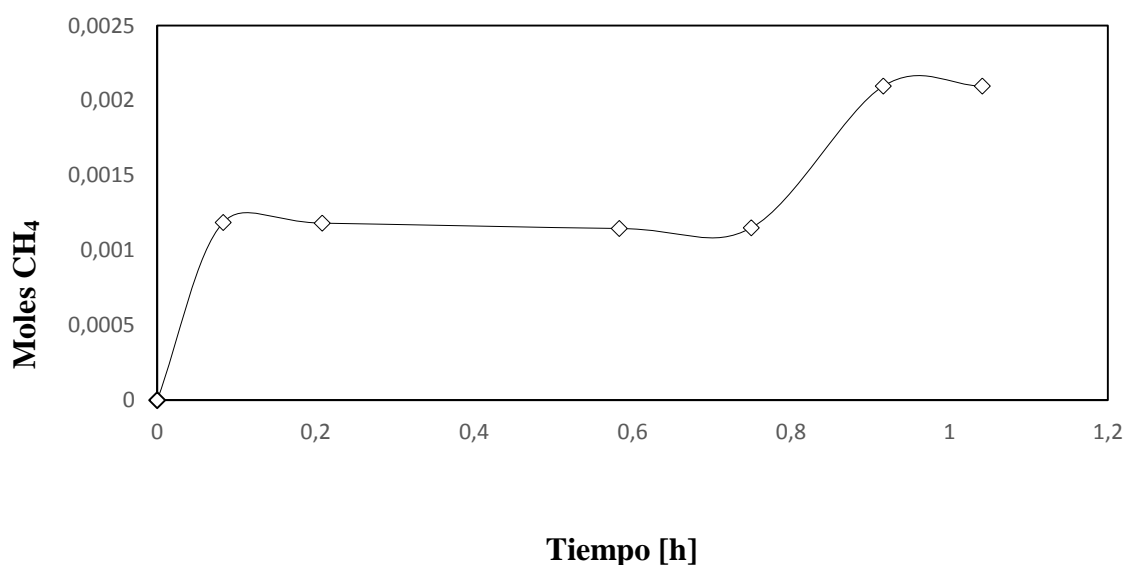


Figura 2 Generación acumulada de CH₄ del bioensayo en función del tiempo

Leyenda: (◊) Agua Laguna 4.

Tabla 3 Actividad metanogénica específica y porcentaje de relación SSV/SST del agua de la Laguna 4

Actividad Metanogénica Específica		
Muestra	gDQO-CH₄ gSSV⁻¹ d⁻¹	%SSV/SST
Agua Laguna 4	0.052	90%
Agua biodigestor 1	0.42	90%

En la Tabla 3 puede apreciar que la AME para el agua de la Laguna 4 es baja. La literatura determina valores óptimos de generación de metano que se encuentran entre 0.5 a 1 g DQO-CH₄ gSSV⁻¹ d⁻¹ (Poh et al 2010). La proporción %SSV/SST se encuentra en condiciones óptimas las cual sugieren proporciones mayores a 60% SSV/SST (Igwe y Onyegbado, 2007). Esta proporción indica que el agua de la Laguna 4 puede ser utilizada como inóculo debido a que los SST representan la concentración de sólidos presentes en el inóculo microbiano y los SSV representan la fracción de biomasa presente en los SST (Abdurahman et al 2013). La AME del biodigestor 1 presenta 0.42 g DQO-CH₄ gSSV⁻¹ d⁻¹ 8 veces superior al agua de la Laguna 4. Este valor se relaciona al enriquecimiento mediante medio basal glucosa y acetato durante los 175 días de operación

3.2 Biodigestores

La Figura 3 muestra la concentración de DQO total del efluente de los cuatro biodigestores durante el tiempo de operación. Los biodigestores R1, R2, R3 y R4 arrancan con concentraciones de 2400 mg DQO L⁻¹. Los primeros 15 días los biodigestores no fueron alimentados para que puedan comenzar una adaptación inicial a las condiciones de operación. Se evidencia la tendencia de estabilización de los biodigestores en el día 60 para R1, R2 y R4 llegando a concentraciones de 293, 203 y 456. En R3 la estabilización se presenta en el día 80 llegando a concentraciones de 309 mg DQO L⁻¹, este comportamiento se atribuye a falla en el sistema hermético del biodigestor. El porcentaje de remoción en promedio es de 87%, valor

que se encuentra acorde a la literatura que establece rango de remoción de DQO entre 80-90% en biodigestores (Kluber y Conrad 1998). El estado estacionario en los biodigestores se llega en promedio 40 días después del inicio de cada etapa de alimentación a excepción de la etapa 3 que utiliza la misma alimentación de la etapa 2 con pequeños incrementos en la concentración de amonio. Durante la etapa 2 la concentración de la DQO del efluente de los biodigestores muestra un ligero aumento para R3 y R4 con 328 y 773 mg DQO L⁻¹ respectivamente y una disminución que llega a 266 mg DQO L⁻¹ tanto para R1 y R2. En la etapa 3 se presenta un aumento en cada biodigestor con valores de 690 mg DQO L⁻¹ para R1 y R3 y 497 mg DQO L⁻¹ para R2 y 388 mg DQO L⁻¹ para R4.

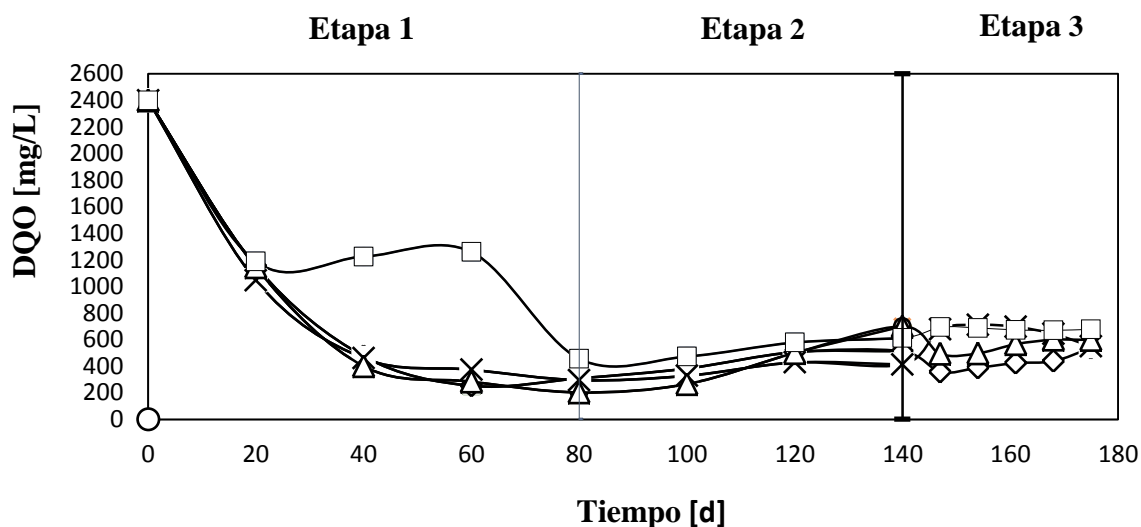


Figura 3 Concentración de DQO soluble

Leyenda: R1(X), R2 (Δ), R3 (□) y R4 (◇) en función del tiempo de operación de los biodigestores.

3.3 Generación de metano

En la Figura 4 se presenta la generación de gas metano acumulada durante el periodo de operación de los biodigestores. Se observa que durante los primeros 40 días los biodigestores generan una cantidad mínima de biogás. Durante la etapa 2 la generación de metano no está influenciada por el medio basal glucosa, Hernández (2003) determina que el

medio basal glucosa influencia directamente en el incremento de comunidades de bacterias, produciendo simbiosis y competencia a las archeas metanogénicas. Entre los días 130 a 150, la producción de gas para R1 y R2 llega a su máximo con valores de $81.65 \text{ mL CH}_4 \text{ d}^{-1}$, es decir $227 \text{ mL g DQO}^{-1}$. Estos valores se encuentran similares a estudios similares Garzón et al., (2015) en el que se utilizó otro tipo de alimentación. La generación de metano para R3 y R4 no fue significativa y se atribuye a los problemas de su hermetismo al arranque experimental donde el ingreso del oxígeno causó que los microorganismos no se adecuen a sus condiciones anaerobias. La actividad metanogénica específica de los biodigestores aumento a $0.42 \text{ g DQO CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$ después de los 175 de operación y alimentación con medio basal glucosa y acetato.

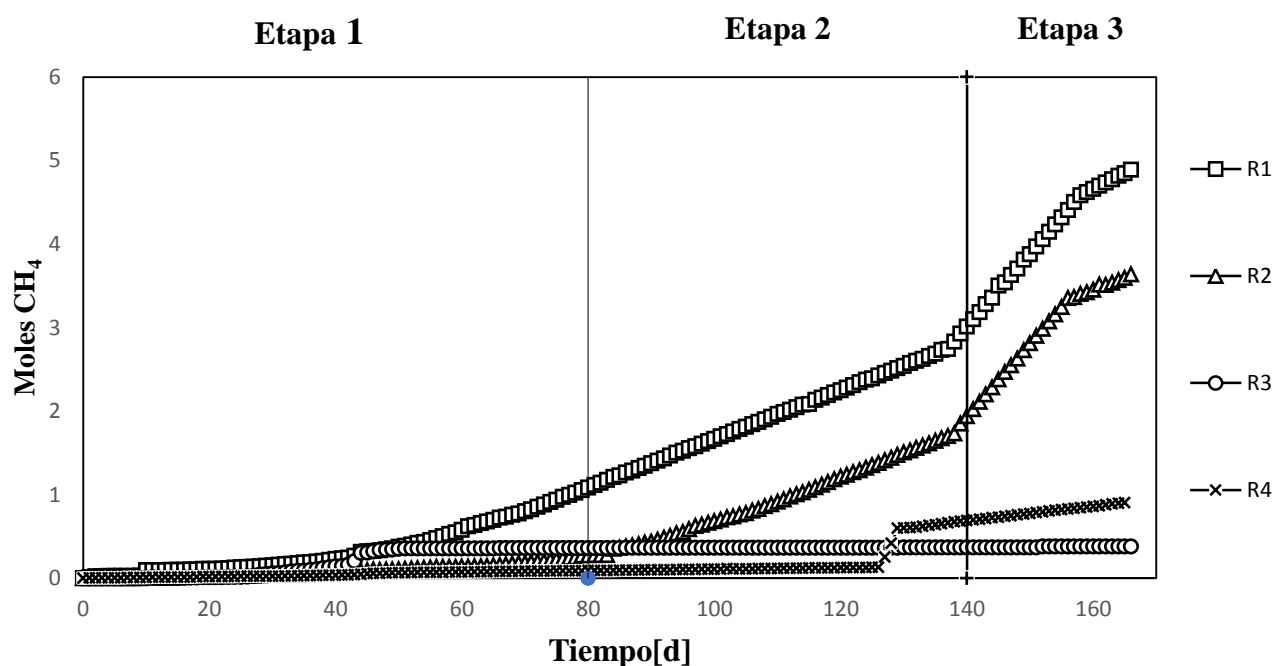


Figura 4 Generación acumulada de CH_4 en los biodigestores en función del tiempo de operación.

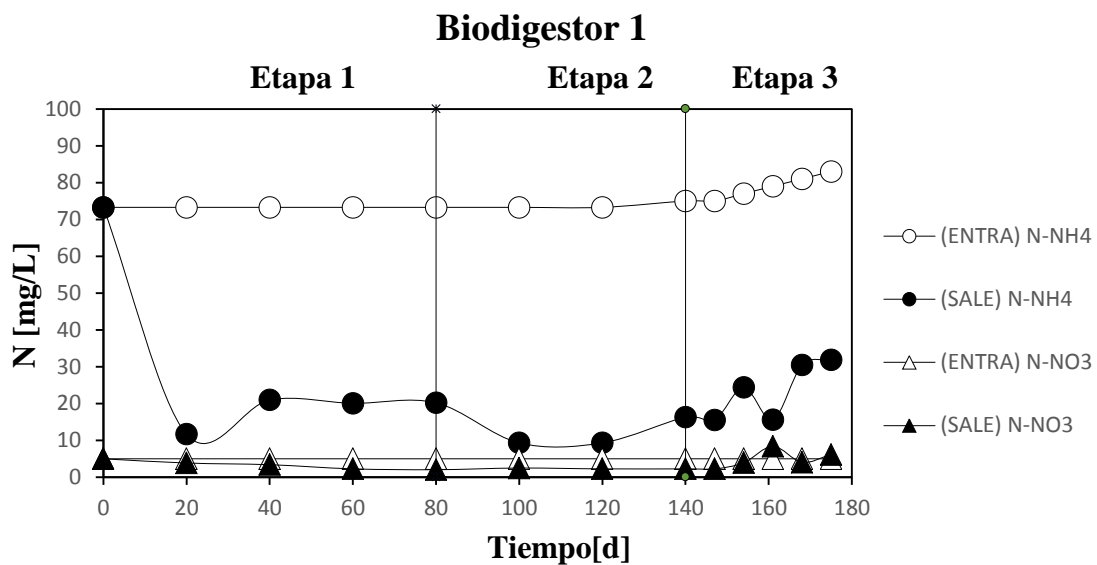
Leyenda: R1 (\square), R2 (Δ), R3 (\circ) y R4(x)

3.4 Remoción de amonio

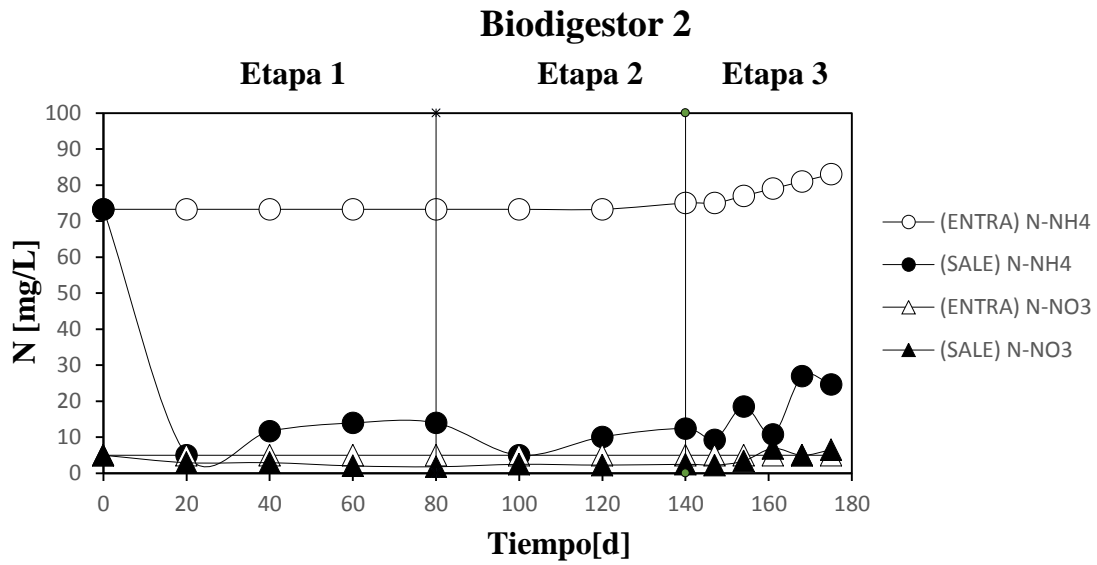
En la Figura 5 se muestra la concentración de amonio y nitrato en la alimentación y efluente de los biodigestores. Se observa que el biodigestor 1 y 2 presentan una mayor

remoción de N-NH_4^+ mg L^{-1} que los biodigestores 3 y 4. En la etapa R1, R2, R3 y R4 alcanzan valores en el día 20 de 11.64, 9.92, 4.29, 19.41 mg N-NH_4^+ respectivamente, en la etapa 2 en el día 100 poseen valores de 9.31, 2.48, 21.74 y 12.42 mg N-NH_4^+ . En la etapa 3 al introducir una concentración adicional de 2 $\text{mg N-NH}_4^+ \text{L}^{-1}$ por semana en el día 175 poseen valores de 31.87, 24.69 50 y 23 mg N-NH_4^+ , dicho aumento de concentración no inhibe la degradación de amonio por parte de los microorganismos. La eficiencia de remoción promedio de cada etapa es de 87%. Según literatura estos porcentajes de remoción de amonio en reactores anaeróbicos pueden desarrollarse por procesos microbiológicos *anammox* (Theuretzbacherer et al., 2015).

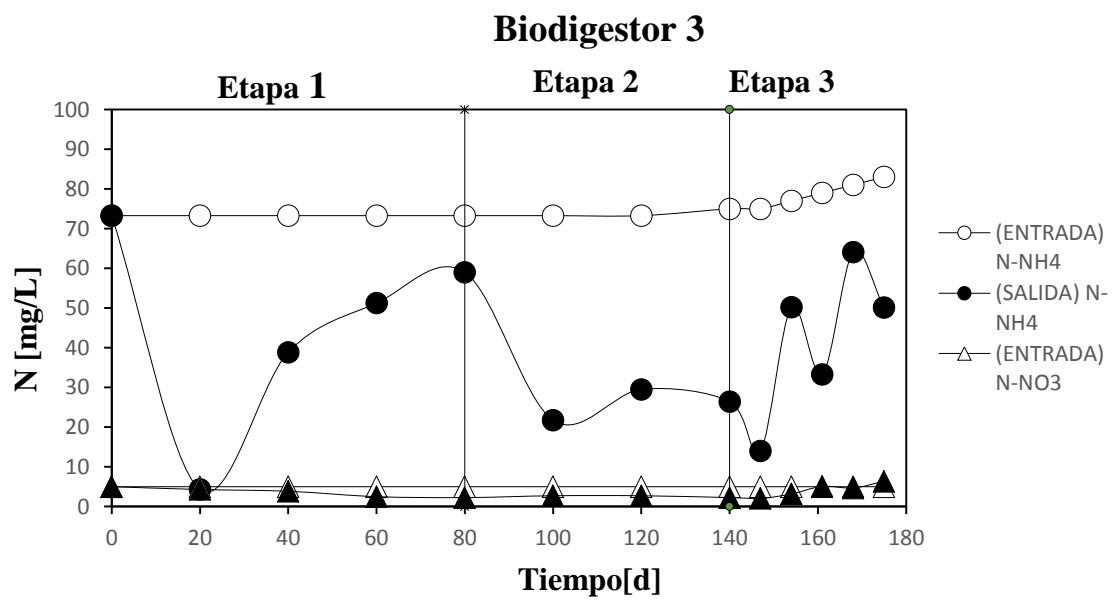
A)



B)



C)



D)

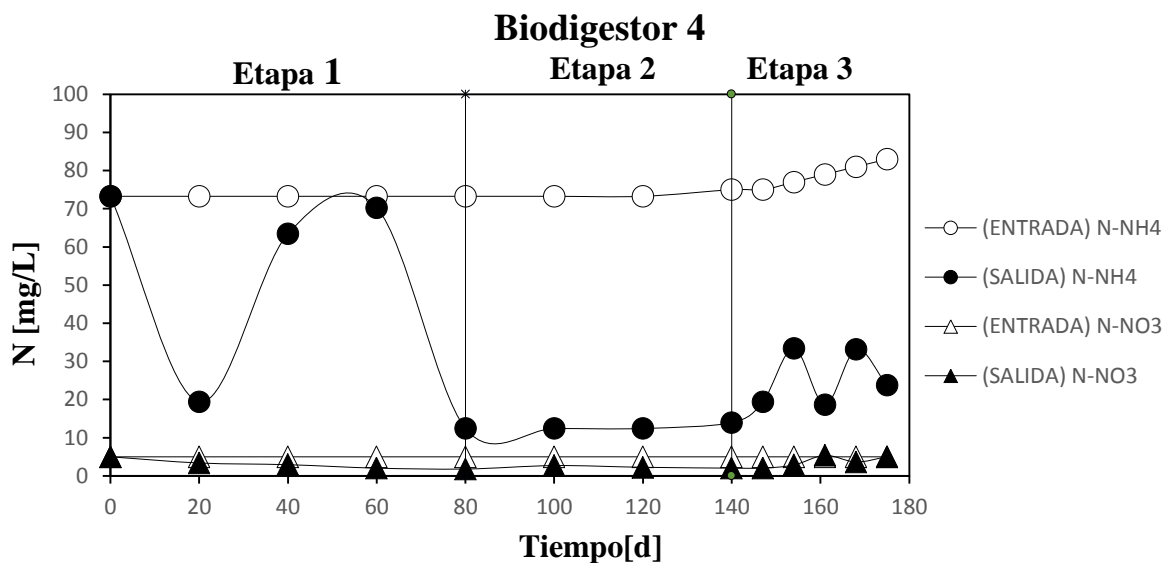


Figura 5 Remoción de nitrógeno en el tiempo de operación. A) Biodigestor 1, b) Biodigestor 2, C) Biodigestor 3 y D) Biodigestor 4

4. Conclusiones

La remoción máxima de DQO se presenta en el Biodigestor 2 con un porcentaje de remoción de 89%, valor que concuerda con la literatura que establece porcentajes de remoción de materia orgánica por digestión anaerobia entre 60 a 97%. Esto se atribuye a los procesos de digestión de la materia orgánica por parte de los microorganismos anaerobios.

La Actividad Metanogénica Específica del inóculo es baja $0.052 \text{ g DQO CH}_4 \text{ g}^{-1}\text{VSS d}^{-1}$, sin embargo al comparar con la AME de $0.42 \text{ g DQO CH}_4 \text{ g}^{-1}\text{VSS d}^{-1}$ del biodigestor 2 se determina que durante el tiempo de operación, la alimentación con medio basal acetato promovió al enriquecimiento microbiano metanogénico en el biodigestor.

El medio basal mineral de glucosa no tiene influencia en el incremento de la generación de biogás. La producción de biogás se mantiene en 81 mL de CH₄ d⁻¹, en rangos similares a los estudios previos de Garzón y Peñafiel (2015).

Los porcentajes de remoción de N-NH₄⁺ mg L⁻¹ son consistentes con la literatura y están probablemente relacionados con el proceso de reducción de amonio por procesos microbiológicos *anammox*.

Referencias

- Abdurahman N.H., Rosli Y.M., Azhari N.H. (2013) *The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment : A Review, Int. Perspect. Water Qual. Manag. Pollut. Control.* 87 – 106. doi:10.5772/54331.
- ANCUPA. 2015 *Desarrollo de nuevas tecnologías para el mejoramiento en la extracción de aceite rojo de palma africana.* Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador. p28.
- APHA. (2012) *Standard methods for the examination of water and wastewater,* American Public Health Association Washington, DC.
- Bae, J.H., Cho, K.W., Lee, S.J., Bum, B.S. and Yoon, B.H. (1998) *Effects of the leachate recycle and anaerobic digester sludge recycle on the methane production from solid wastes.* Water Sci. Technol. 38(2), 159-158
- Bermúdez, R. (2000) *Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de desilaría por tratamiento anaerobio.* Rev. Int Contam. Ambient., 16 (3), 103-107.
- Beun J.J., Van Loosdrecht M.C.M. and Heijnen, J.J. (2000). *Anaerobic granulation.* Water Sci.Technol. 41 (4-5). 41-48
- Cecchi, F., Pavan, P., Mata Alvarez, J., Bassetti, A., Farneti, A. (1989). *Analysis of the thermophilic semi-dry anaerobic fermentation of the organic fraction of the municipal solid waste sorted by plant.* En: Thomé- kozmiensky, K.J. (Ed). Recycling International, EF-Verlag GmbH, Berlin. 1:241-247.

- Cheng X.Y., Li Q., Liu C.Z. (2012) *Coproduction of hydrogen and methane via anaerobic fermentation of cornstalk waste in continuous stirred tank reactor integrated with up-flow anaerobic sludge bed*, *Bioresour. Technol.* 114: 327–333. doi:10.1016/j.biortech.2012.03.038.
- Colleran E., Concannon F., Golden T., Geoghegan F., Crumlish B., Killilea E et al.(1992) *Use of methanogenic activity tests to characterize anaerobic sludges, screen for anaerobic biodegradability and determine toxicity thresholds against individual anaerobic trophic*, *Water Sci. Technol.* 25: 31–40.
- El-Fadel M., Massoud, M. (2001) *Methane emissions from wastewater management*. *Environmental Pollution*, 114:177-185
- EPA. (2000) *Wastewater Technology Fact Sheet. Anaerobic Lagoon*, US-EPA
- Garzón P., Peñafiel R., Ochoa V (2015) *Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales*. *Avances. Ciencias. Ingeniería. (Quito)* Vol. 7, No. 2, Págs. C130-C137
- Guerra R., González S., Trupiano A., Figueroa M. (2001) *Perfiles De Actividad Metanogénica Específica En Un Reactor Uasb (Reactor Anaeróbico De Flujo Ascendente Y Manto De Lodos) Utilizado Para El Tratamiento De Líquidos Cloacales Pre-Sedimentados*, *Asades.* 6.

Hernandez, C. (2003) *Crecimiento y formación de productos en cultivos aerobios y anaerobios de Bacillus Subtillis con glucosa xilosa y Celobiosa*. Intituto Tecnológico de Zacatepec

Igwe J.C, Onyegbado, C.C.(2007) *A review of palm oil mill effluent (POME) water treatment*, *Glob. J. Environ. Res.* 1:54–62.

Jetten M,S.M., Schmid, MC., Van de Pas-Schoonen. KT., Sinninge Damste, J.S and Strous,M (2005) *Anammox organisms:Enrichment, cultivationand environmental analysis*. *Methods Enzymol* 397, 34-57

Jetten, M.S.M., Wagner, M, Fuerst, J.A., Van Loosdrescht, M.C.M., Kuenen, J.G. and Strous, M (2001). *Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process*. *Curr. Opinion Biotechnol.* 12, 238-288

Klüber H.D y Conrad R. (1998) *Effects of nitrate, nitrite, NO and N₂O on methanogenesis and other redox processes in anoxic rice field soil*, *FEMS Microbiol. Ecol.* 25 301–318.

Muñoz, A. (2010). *La Palma Africana en el Ecuador*. Ancupa

Nayono, S.E., Winter, J., Gallert, C., (2010). *Anaerobic digestion of pressed off leachate from the organic fraction of municipal solid waste*. *Waste Manage.* 30, 1828– 1833.

- Lopez, H. (2009) *Desarrollo del Proceso Anammox para el Tratamiento de Lixiviados: Puesta en Marcha y Aplicación*. Universidad de Girona ISBN: 978-84-692-1407-7
- Lozano C.J.S., Mendoza M.V., Arango M.C., Monroy E.F.C. (2009) *Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment*, *Waste Manag.* 29: 704–711. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.021.
- Pazmiño G., R. Peñafiel. (2015) *Determinación de generación de metano y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias del sistema de tratamiento de aguas residuales de una empresa extractora de aceite de palma africana*, Quito
- Poh P.E., Yong W.J., Chong M.F. (2010) *Palm oil mill effluent (POME) characteristic in high crop season and the applicability of high-rate anaerobic bioreactors for the treatment of pome*, *Ind. Eng. Chem. Res.* 49 (2010) 11732–11740. doi:10.1021/ie101486w
- Rodríguez, J. (2009). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Cali: Universidad Del Valle
- Rojas M.A., Netto A.O., Zaiat M. (2008) *Actividad metanogénica específica en un reactor anaerobio - Aerobio aplicado al tratamiento de agua residual doméstica*, *Interciencia.* 33: 284–289.

- Rupani P.F., R.P Singh, Ibrahim M.H., Esa N. (2010) *Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as a sustainable practice*, *World Appl. Sci. J.* 11: 70–81.
- Strous, M., Gerven, E. V., Zheng, P., Kuenen, J.G and Jetten, M.S.M. (1997) *Ammonium removal from concentrated waste streams with the Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) process in different reactor configurations*. *Water Res.*, 31(8), 1955-1962.
- Teng T., Wong Y., Ong S., Norhashimah M., Rafatullah M. (2013) *Start-up Operation of Anaerobic Degradation Process for Palm Oil Mill Effluent in Anaerobic Bench Scale Reactor (ABSR)*, *Procedia Environ. Sci.* 18 (2013) 442–450. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.059>.
- Theuretzbacher F., Lizasoain J., Lefever C., Saylor M.K., Enguidanos R., Weran N., et al. (2015) *Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion*, *Bioresour. Technol.* 179 299–305. doi:10.1016/j.biortech.2014.12.008
- Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F.L., Abu-Orf M., Bowden G., et al. (2014) *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- WWF. (2004) *Palm oil: Productive and versatile*. Recuperado de: http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/agriculture/palm_oil/about/ (accessed July 04, 2016).

