

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Pitalito, 10 de noviembre de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El suscrito:

Ana Milena Babativa Contreras con C.C. No. 1083886668, autora del trabajo de grado titulado Tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del beneficio húmedo del café: una revisión, presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola; autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CdRom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARI OS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: *Ana Milena Babatua Contreras*

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del beneficio húmedo del café. Una Revisión

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Babativa Contreras	Ana Milena

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mujica Rodríguez	Edinson

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniera Agrícola

CIUDAD: Pitalito

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016

NÚMERO DE PÁGINAS: 10

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general
 Grabados Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos
 Retratos Sin ilustraciones Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Tratamientos anaerobios	Anaerobic treatments
2. Aguas residuales	Wastewater
3. Beneficio húmedo	Wet-processing
4. Café	Coffee
5. Mucílago	Mucilage

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este artículo, presenta una revisión de tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del cultivo del café, sus características, funcionalidad y las condiciones fisicoquímicas en las que estos tratamientos han presentado mejores eficiencias de remoción, teniendo en cuenta que estas herramientas permiten mejorar el control y optimización de tratamientos a aguas residuales del beneficio húmedo del café.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This article presents a review of anaerobic treatments used in wastewater from coffee growing, its features, functionality and physico-chemical conditions in which these treatments have provided better removal efficiencies, considering that these tools can improve performance, control, and optimization of wastewater treatment from coffee wet-processing.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Edinson Mujica Rodríguez



Firma:

TRATAMIENTOS ANAEROBIOS UTILIZADOS EN AGUAS RESIDUALES DEL
BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ: UNA REVISIÓN

ANA MILENA BABATIVA CONTRERAS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
PITALITO
2016

TRATAMIENTOS ANAEROBIOS UTILIZADOS EN AGUAS RESIDUALES DEL
BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ: UNA REVISIÓN

ANA MILENA BABATIVA CONTRERAS

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Agrícola

Director
Edinson Mujica Rodríguez
M.Sc. en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
PITALITO
2016

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del Director
Edinson Mujica Rodríguez
M.Sc. en Ingeniería Agrícola y Uso Integral
del Agua

Pitalito, 8 de noviembre, 2016

Tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del beneficio húmedo del café: Una Revisión

Anaerobic treatments used in wastewater from coffee wet-processing: A review

Ana Milena Babativa¹ y Edinson Mujica²

Resumen

Este artículo, presenta una revisión de tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del cultivo del café, sus características, funcionalidad y las condiciones fisicoquímicas en las que estos tratamientos han presentado mejores eficiencias de remoción, teniendo en cuenta que estas herramientas permiten mejorar el control y optimización de tratamientos a aguas residuales del beneficio húmedo del café.

Palabras clave: Tratamientos anaeróbicos, aguas residuales, mucílago

Abstract

This article presents a review of anaerobic treatments used in wastewater from coffee growing, its features, functionality and physico-chemical conditions in which these treatments have provided better removal efficiencies, considering that these tools can improve performance, control, and optimization of wastewater treatment from coffee wet-processing.

Key words: Anaerobic treatments, wastewater, mucilage

¹ Estudiante de Ingeniería Agrícola. Universidad Surcolombiana sede Pitalito. milena.ing.agricola@gmail.com

² MSc en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Docente Universidad Surcolombiana. edinsonagricola@gmail.com

1. Introducción

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales, se ha vuelto un tema muy común y necesario (García, 2015). Las reservas de agua disponibles para la población en el mundo, están disminuyendo por causas como deforestación acelerada, uso excesivo de aguas subterráneas, crecimiento de la población principalmente en regiones con escasez del líquido, mayor demanda de seguridad alimentaria y bienestar socio económico, y contaminación de origen industrial, urbano y agrícola (Cárdenas & Ortíz, 2014), además, de la pérdida en la calidad del agua por falta de tratamiento de aguas residuales (Cadena & Jaramillo, 2009).

Así mismo, la actividad agrícola, contribuye a cambiar directamente la oferta hídrica de una zona, cuando se vierte directamente las aguas residuales del proceso productivo a las fuentes de agua: Es el caso de la Caficultura, que hasta hace menos de 20 años, no estuvo exenta de generar impactos negativos en el medio ambiente (Moreno & Romero, 2016). La agro-industria del café genera un gran volumen de aguas residuales que se caracteriza por su alta resistencia orgánica, así como su contenido de color (Villanueva, *et al.*, 2014).

La industria cafetera es una de las principales fuentes contaminantes del continente latinoamericano, por medio de los beneficios de café, y a menor escala de las fábricas de café soluble. En los beneficios de café se implementan sistemas nuevos para reducir los consumos de agua y en consecuencia la generación de aguas residuales (despulpado en seco, recirculación de las aguas de transporte, desmucilaginado en seco, etc.). Los beneficios ecológicos (de bajo consumo de agua por tonelada de café procesado) producen una pulpa relativamente seca que puede ser transportada por ventiladores (sopladores) y para la cual es práctico el procesamiento por compostaje (García, 2001).

Éstas aguas, son biodegradables, pero poseen una acidez y concentración de materia orgánica alta, sólidos suspendidos conformados particularmente por pectina y protopectinas, demandas biológicas y químicas de oxígeno muy altas, del orden de 15000 a 30000 ppm en las aguas mieles, y entre 60000 y 120000 ppm en los lixiviados generados en la mezcla pulpa mucilago, lo que genera contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales

domésticas (Moreno & Romero, 2016); (Rodríguez, *et al.*, 2015).

En términos de contaminación acuática, se habla de Demanda Química de Oxígeno (DQO), que es un análisis de laboratorio que permite determinar químicamente la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua residual. Análogamente, mediante la determinación del Nitrógeno total, Nt, se conoce la proporción presente de este elemento para ajustar la relación C/N, la cual permite el desempeño óptimo de sistemas biológicos de tratamiento (Zambrano & Isaza, 1998).

Además, al no contar con infraestructura adecuada para el beneficio de café, es uno de los factores que afectan la implantación de un programa de buenas prácticas agrícolas en productores del grano (Guzmán, *et al.*, 2009).

Por tanto, para tratar de mitigar estos daños, se han utilizado diferentes tipos de tratamientos, entre los que se encuentra el manejo eficiente del agua en el proceso de beneficio húmedo del café y el tratamiento anaerobio como alternativa a los sistemas tradicionales de tratamiento de las aguas residuales generadas en el proceso. Aspectos que han sido acompañados de investigaciones tendientes a encontrar la solución más económica para descontaminarlas (Moreno & Romero, 2016); (Orozco, 2003).

Este documento pretende mencionar los tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del cultivo del café, como contribución al estudio, comprensión y desarrollo de los mismos.

2. Tratamientos anaerobios utilizados en aguas residuales del cultivo del café

Los procesos biológicos aplicados en tratamientos de colorantes y pigmentos se subdividen teniendo en cuenta el tipo de aceptor final de electrones, y de esta manera, se presentan procesos biológicos aerobios y anaerobios (Barrios, *et al.*, 2015). Un reactor anaerobio en su interior lleva a cabo un proceso bacteriano sin la utilización de oxígeno, con ventajas frente a los aerobios como economía y facilidad de aplicación, baja generación de biomasa, bajos requerimientos nutricionales, producción de metano y no requerimiento de oxígeno, por lo que se han

utilizado con éxito durante los últimos años (Muñoz, *et al.*, 2016; Zegers, 1987). Los reactores anaerobios son sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya sean domésticas o industriales con altas cargas orgánicas, basados en procesos biológicos de digestión de materia orgánica. (Van & Lettinga, 1994).

A continuación, en la Tabla 1, se dan a conocer las características específicas de los componentes de las aguas residuales del café:

Tabla 1. Caracterización de aguas residuales del beneficio del café (Hernández & Londoño, 1988).

Determinación	Tipo de agua residual de beneficio	
	Aguas de despulpado	Aguas de lavado
pH (unidades)	4,72	3,92
Conductividad (µs/cm)	593	232
Sólidos Totales (ppm)	12334	9393
Sólidos Disueltos (ppm)	10961	4938
Sólidos Suspendidos (ppm)	1373	4455
Cenizas (ppm)	389	400
Materia orgánica (ppm)	11946	8993
DQO (ppm)	12390	9484
NTK (ppm)	59,5	65,6
Oxígeno Disuelto (ppm)	4,25	3,85
Pectinas (ppm)	1225	3855
Fructuosa (ppm)	2052	207
Galactosa (ppm)	306	64
Glucosa (ppm)	531	125
Sacarosa (ppm)	200	511
Azúcares (Suma) (ppm)	3088	904
Ácido láctico (ppm)	316	687
Ácido acético (ppm)	59	54
Ácido cítrico (ppm)	1137	1512
Ácido propiónico (ppm)		
Ácido tartárico (ppm)	21	
Ácido fórmico (ppm)	126	
Ácido málico (ppm)	144	
Ácido galacturónico (ppm)	528	90
Ácidos carboxílicos (suma) (ppm)	2003	2297
Cafeína (ppm)	39,9	26,7
Ácido clorogénico (ppm)	3,13	4,47
Ca (ppm)	8,0	11,6
Na (ppm)	3,9	3,5
K (ppm)	81,7	92,5
Mg (ppm)	2,1	4,5
Fe (ppm)	0,7	1,2
Metales (suma) (ppm)	96,4	113,3

De acuerdo con el proceso biológico que realizan los microorganismos anaerobios y la ley de conservación de la materia; al retirar el contenido de materia orgánica, ésta inevitablemente se transformará o transferirá, dando lugar a la formación de subproductos que pueden ser reutilizados o desechados (Intriago & Esperanza, 2016); y pueden llegar a una remoción de color y DQO entre el 80 y 100% en periodos que oscilan entre los 2 y 58 días (Manu & Chaudhari, 2003; Méndez, *et al.*, 2005). Estos sistemas son cada vez más utilizados para tratar los efluentes biodegradables (Rodríguez, 2009).

En los tratamientos biológicos, se distingue gran variedad de procesos anaerobios (Ríos, 2015):

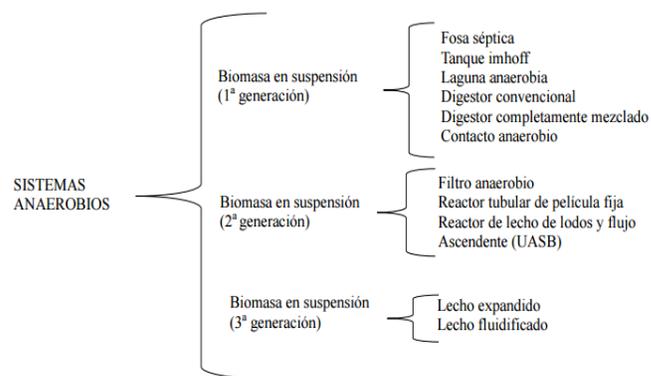


Figura 1. Procesos biológicos anaerobios (Moller, *et al.*, 2011)

Los tratamientos anaerobios más utilizados en el tratamiento de aguas residuales del café han sido las lagunas, los reactores de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) y los filtros (Garay, 2016); (Rodríguez, 2009). Los reactores anaerobios de segunda generación (manto de lodos y filtro), han sido los indicados para llevar a cabo el proceso de depuración (Noyola, 1989). Además, bajo condiciones anaerobias es posible remover hasta el 95% de colorantes como el azul Índigo, durante 5 días de operación (Ay, *et al.*, 2009); (Manu & Chaudhari, 2003).

El proceso de conversión anaerobia depende de diversos factores como, por ejemplo: del pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, entre otras (Sosa, *et al.*, 1999);(Van & Lettinga, 1994). Por otra parte, la digestión anaerobia es un proceso complejo, que requiere cierto control para asegurar su correcto funcionamiento, como la sensibilidad a las sobrecargas orgánicas, que pueden llevar a la desestabilización del proceso (Ortega, 2006).

A continuación, se relacionan algunos tratamientos anaerobios utilizados en el tratamiento de aguas residuales del café:

2.1. Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA)

Están compuestos por un reactor Hidrolítico-Acidogénico (HA), la Recámara de Dosificación (RD) y un Reactor Metanogénico (RM) (Zambrano, *et al.*,

2006); (Orozco, 2003). Los cuales permiten el tratamiento del mucílago fermentado, que corresponde al 26% de la contaminación total que generan los subproductos, y que está presente en las aguas residuales de lavado, con un aporte de 24 g de DQO por kilogramo de café en cereza, y una concentración entre 25.000 y 30.000 mg.L-1, cuando se utilizan en el lavado cantidades de agua entre 4 y 5 L.kg-1 de cps. Estos sistemas bien implementados, permiten generar vertimientos que cumplen con las disposiciones normativas para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales, Resolución 631 del 2015 (MINAMBIENTE, 2015).

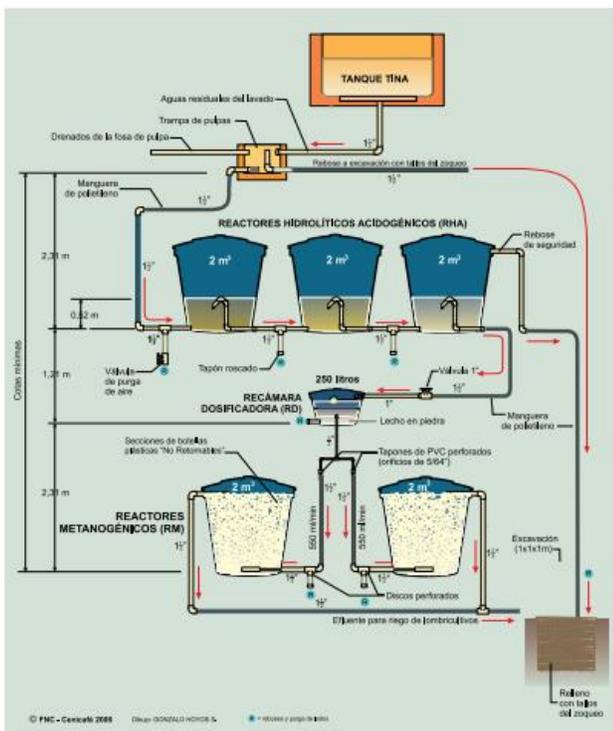


Figura 2. Esquema del sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), (Zambrano, *et al.*, 2006)

Además, con el fin de proteger los recursos hídricos presentes en la zona cafetera, se implementan humedales artificiales, utilizando plantas acuáticas como el buchón de agua, el repollo de agua, la oreja de agua y la lenteja de agua, ubicados a continuación de los SMTA, lo que permite obtener efluentes más limpios, los cuales contribuyen a la preservación del recurso hídrico, a la vez que la biomasa cosechada puede utilizarse para la producción de abonos orgánico (Rodríguez, 2009).

2.2. Reactor Anaeróbico con Deflectores (ABR)

Es útil para la producción de energía y eliminación de contaminantes, el ABR, es eficaz en la eliminación de carga orgánica (90%), nutrientes (82%) y sólidos suspendidos (95%), a partir de residuos de procesamiento de café. Los aumentos de la eficiencia de eliminación de contaminantes fueron dependiente del tiempo de retención hidráulica del sistema. También se estima que los residuos de café tienen un potencial para producir un rendimiento teórico de energía comprendida entre 4-10 millones de KJ/día y un fertilizante orgánico (digestato) de 18,8 a 25,2 kg VSS/día.

Como resultado, la Digestión Anaerobia (AD) sería una consideración más sensible como una opción de tratamiento ecológico de los residuos de café (Puebla, *et al.*, 2014). El uso de ésta, en el tratamiento de aguas residuales del café, se observa que no sólo reduce la emisión de gases de efecto invernadero para el medio ambiente, sino que también evita la creciente demanda de leña y carbón vegetal que causa una severa deforestación en las regiones productoras de café del mundo (Beyene, *et al.*, 2014). Se cargan los reactores por lotes y se mantienen durante 70 días para alcanzar una condición de estado estable para la digestión eficiente como lo sugiere Gerardi (2003) y De la Rubia, *et al.*, 2006. La eficiencia de remoción de carga orgánica y sólidos totales fue superior al 90%, y para los nutrientes alrededor del 82%.

El sistema de tratamiento de residuos anaeróbica se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de residuos municipales (Mata, 2003); (Racault, *et al.*, 1995); Sin embargo, no se ha utilizado para el tratamiento de los residuos de café. Por lo que la AD es una opción de gestión de residuos respetuosa del medio ambiente para el tratamiento eficaz del mismo.

2.3. Reactor de Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB)

Es un dispositivo que contiene aproximadamente un 40 % de lodo anaeróbico, denominado flóculo, la degradación anaeróbica del sustrato orgánico produce biogás. El flujo combinado de agua residual y biogás puede expandir algunos sólidos del lodo a la parte superior por lo que se requiere instalar un separador de tres fases a la salida del reactor (La Motta, *et al.*, 2007). El agua residual a tratar es alimentada por el fondo del

reactor, para que entre en contacto con el lodo (Rodríguez, 2009).

Se reporta el uso de un semi-piloto UASB para aguas residuales de café con residuos orgánicos de 15 kg DQO/m³-día y con remoción del DQO de 80–90 % en un tiempo de 6 horas (Harada, *et al.*, 1996).

Parawira *et al* (2008) reportaron el uso de reactores tipo UASB a nivel de laboratorio, para eliminar compuestos fenólicos en aguas residuales de café, alcanzando una remoción del 95 % del DQO en un afluente de 16,3 kg DQO/m³ durante 10 horas.

Los reactores UASB de dos etapas, son adecuadas para el tratamiento de aguas residuales de café procesado en húmedo con altas eficiencias de eliminación de materia orgánica y nutrientes, y la producción de metano (Puebla, *et al.*, 2014). El lodo activado operado en lote alimentado es una alternativa para pulir el efluente anaeróbico (Bruno & Oliveira, 2013).

El reactor UASB ha mostrado una alta eficiencia en la eliminación de compuestos fenólicos y la materia orgánica durante el tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café, incluso mientras se opera con valores altos de VOLr, por encima de los recomendados por la bibliografía (Campos, *et al.*, 2014).

2.4. Filtros anaeróbicos

Este tipo de reactores tiene un medio de soporte fijo inerte (poliuretano y PVC o silicatos: Vermiculita y sepiolita) al cual crecen adheridos los microorganismos. El agua residual puede tener un flujo vertical ascendente o descendente a través de la cámara del bioreactor. Usualmente, no se hace necesario contar con un compartimiento final de sedimentación (Romero, 2005).

Cantanero (1991) reporta que un filtro anaeróbico de flujo ascendente es apropiado a nivel técnico y económico para tratar aguas residuales de café logrando remociones entre el 80 y 90 % de la materia orgánica.

2.5. Reactor Híbrido Anaerobio de Flujo Ascendente (UAHR)

Éste, se hace de la hoja de acrílico transparente de 4 mm de espesor para estudiar el potencial de biometanización de las aguas residuales del café. El reactor híbrido es una versión modificada del sistema UASB con PVC hoja volante como el soporte sólido y combina las ventajas de la UASB con los reactores de película fija (Lettinga, 2001). El esquema del UAHR se ilustra en la Figura 3.

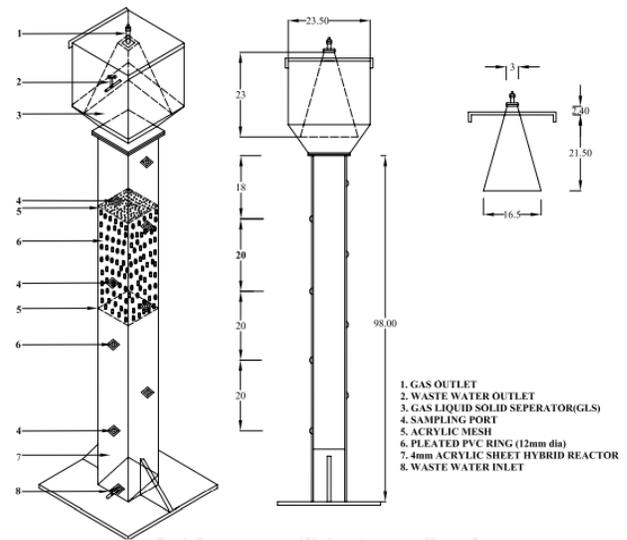


Figura 3. Detalles de diseño de UAHR, (Selvamurugan, *et al.*, 2010a)

Lo que permite diseñar sistemas de tratamiento in situ compactos de bajo costo y con un período de retención muy corto (Selvamurugan, *et al.*, 2010a). Además, el tratamiento biológico de las aguas residuales del procesamiento del café es más efectivo con la producción simultánea de energía en forma de metano y la combinación de proceso anaeróbico-aeróbico, es decir, biometanización seguido por la aireación y la construcción de humedales artificiales, es más adecuado como enfoque eco-amigable (Selvamurugan, *et al.*, 2010b).

2.6. Reactores de lecho fijo de flujo ascendente anaeróbicos

Los reactores presentan un rendimiento satisfactorio, especialmente cuando se utiliza la espuma como un

soporte. Por otra parte, se verificó que anaeróbica reactores de lecho fijo son una opción viable para el tratamiento de aguas residuales desde el procesamiento del grano de café (Fia, *et al.*, 2012).

2.7. Tecnología de lodo granular anaeróbico

Se percibe como el proceso de tratamiento de aguas residuales más prometedor y favorable, ya que cumple los criterios deseados para la tecnología del futuro en el desarrollo ecológico sostenible. El logro de una prevención y control de la contaminación efectiva requiere una gestión integrada de las emisiones al aire, agua y suelo, así como el uso eficiente de la energía y las materias primas. La producción de energía y la evaluación asociada con la granulación anaeróbica se delinean en la perspectiva del nexo entre agua y energía. La aplicación emergente de sistemas granulares anaeróbicos se asocia con la reducción certificada de las emisiones de carbono o de crédito establecidos en el Protocolo de Kyoto.

Un gránulo anaeróbico se compone de diversas poblaciones bacterianas que combaten una relación syntrophic microbiana. La degradación completa de compuestos xenobióticos industriales implica interacciones complejas entre las especies syntrophic prosperado dentro de la matriz de gránulos (Show, *et al.*, 2016). Los gránulos anaerobios están constituidos por células microbianas estrechamente agregadas que crecen en la matriz de los gránulos. Esto mejora las interacciones complejas entre las especies bacterianas syntrophic que conducen a la degradación eficiente de los contaminantes.



Figura 4. Gránulos anaerobios desarrollados en un biorreactor de aguas residuales química a gran escala el tratamiento (Show, *et al.*, 2016).

La granulación anaeróbica se ha convertido en una tecnología establecida para una variedad de aplicaciones industriales. La tecnología es aceptada tanto en los países desarrollados como en los países menos desarrollados. Los procesos anaeróbicos basados en lodo granular tales como los sistemas UASB y el Lecho Expandido de Lodo Granular (EGSB) están ordenando gradualmente una gran parte de aplicaciones industriales a gran escala. Aunque todavía UASB es la tecnología predominante en uso, los procedimientos de tipo ESGB están ganando más popularidad impulsada por la economía (Frankin, 2001). Sistemas de reactores desarrollo de ESGB y por etapas multi-fase anaerobia (SMPA) podrían conducir a nuevas generaciones muy prometedoras del sistema de tratamiento anaeróbico (Lettinga, *et al.*, 1997).

2.8. Tratamiento anaeróbico con tres reactores anaeróbicos horizontales (R1, R2 y R3)

Con el sistema de tratamiento integrado de los reactores anaeróbicos horizontales con manto de lodo y de lecho fijo, instalados en serie, es posible tratar las aguas residuales de procesamiento de café por vía húmeda, con rendimientos de eliminación de DQO y VSS alrededor del 80% y mayor producción de metano volumétrico y específico 1.50L (L reactor d) -1 y 0.16L (g DQO total de quita), respectivamente, en condición estable, aplicando VOL de 8,9 a 25,0 kg DQO total de (m³ d) -1 con TRH de 90 h.

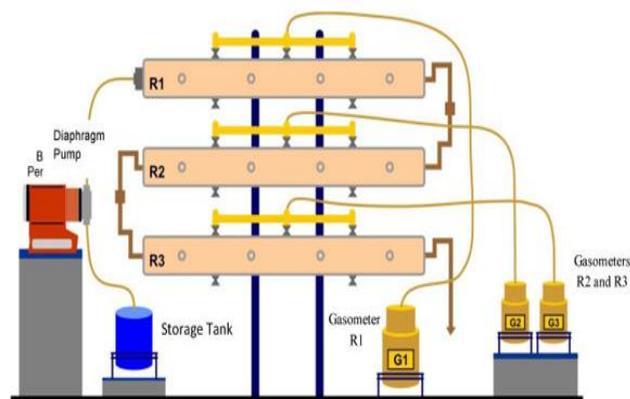


Figura 5. Equipo de ensayo compuesta por reactor horizontal anaerobio de manto de lodos (HASBR - R1) y reactores anaeróbicos horizontales de lecho fijo (HAFBR), llena de anillos de bambú (R2) y los cubos de fibra de coco (R3), gasómetros (G) y la bomba dosificadora de membrana (Oliveira & Bruno, 2013).

Los valores más altos de eliminación de DQO totales, Suspensión de Sólidos Volátiles (SSV) y fenoles totales, y la producción de metano se produjo en el primer reactor anaerobio horizontal, en el que se utilizó el manto de lodo. El segundo y tercer reactor anaeróbico horizontal de lecho fijo, eran importantes para aumentar y estabilizar estos valores y para dar cabida a los choques de carga orgánica. El uso de lecho fijo con fibras de coco cambió el color y aumentó la concentración de fenoles en el efluente debido a la descomposición de las fracciones menos estables del medio seguidor (Bruno & Oliveira, 2013).

2.9. Lagunas anaerobias

Consisten en estanques conectados en serie, con tamaños que oscilan entre 0,2 y 0,8 ha y profundidades entre los 2 y 4 metros, que operan en un rango de temperatura entre 6 y 50°C y con cargas orgánicas aplicadas entre 200 y 500 kg DBO₅/ha-d. Tienen porcentajes de remoción de la DBO₅ entre el 50 y el 95% (Ferrer & Seco, 1999).

Se reportan el uso de lagunas anaerobias en serie para el tratamiento de aguas en el despulpado y lavado de café con concentraciones de sólidos totales de 10600 ppm y DQO de 7999 ppm (Matos, *et al.*, 2000).

3. Conclusiones

La factibilidad técnico económica para la implementación de sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café depende en gran medida de la simplicidad y confiabilidad del sistema, así como del volumen y carga orgánica del residuo a tratar (Rodríguez, *et al.*, 2015).

Es necesario disminuir la concentración de las aguas mieles tratadas anaerobiamente a valores de DQO por debajo de 1172 ppm para poder utilizar sistemas de tratamiento con plantas acuáticas y que un biosistema integrado y en el cual se aproveche la biomasa generada para la elaboración de abono orgánico mediante el proceso de lombricultura o como suplemento de los sustratos tradicionales utilizados en la producción de hongos comestibles es el apropiado para el postratamiento de las aguas mieles del café (Rodríguez, 2009).

La DA es adecuada para el tratamiento de aguas residuales de café húmedo y permite diseñar sistemas de tratamiento in situ compactos de bajo costo y con un período de retención muy corto.

4. Referencias bibliográficas

- Ay, F., Catalkaya, E.C. & Kargi, F., 2009. A statistical experiment design approach for advanced oxidation of Direct Red azo-dye by photo-Fenton treatment. *Journal of hazardous materials*, 162(1), 230-236.
- Barrios, L.F., Gaviria, L.F., Agudelo, E.A. & Gallo, S.A.C., 2015. Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. *Dyna*, 82(191), 118.
- Beyene, A., Yemane, D., Addis, T., Assayie, A. & Triest, L., 2014. Experimental evaluation of anaerobic digestion for coffee wastewater treatment and its biomethane recovery potential. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(7), 1881-1886.
- Bruno, M. & Oliveira, R.A.d. 2013. Performance of UASB reactors in two stages followed by post-treatment with activated sludge in wastewater batch of wet-processed coffee. *Engenharia Agrícola*, 33(4), 808-819.
- Cadena, G. & Jaramillo, A., 2009. El papel estratégico del agua y el cultivo del café en Colombia.
- Campos, C.M.M., Prado, M.A.C. & Pereira, E.L., 2014. Kinetic parameters of biomass growth in a UASB reactor treating wastewater from coffee wet processing (WCWP). *Revista Ambiente & Água*, 9(4), 577-592.
- Cantanero, V., 1991. *Tecnología de tratamiento para los subproductos del beneficio húmedo del café*. Paper presented at the Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetera, 2. Manizales (Colombia). Resúmenes retrieved from
- Cárdenas, R. & Ortíz, J., 2014. *Manejo integrado del recurso agua en el beneficio húmedo del café, para la Asociación de Productores de Café "Acafeto" en el municipio de Fresno, departamento del Tolima*. Universidad de Manizales.
- De la Rubia, M., Perez, M., Romero, L. & Sales, D., 2006. Effect of solids retention time (SRT) on pilot scale anaerobic thermophilic sludge

- digestion. *Process Biochemistry*, 41(1), 79-86.
- Ferrer P, J. & Seco T, A., 1999. *Tratamiento de aguas. Introducción a los tratamientos físicos, químicos y biológicos*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).
- Fia, F.R., Matos, A.T., Borges, A.C., Fia, R. & Cecon, P.R., 2012. Treatment of wastewater from coffee bean processing in anaerobic fixed bed reactors with different support materials: performance and kinetic modeling. *Journal of environmental management*, 108, 14-21.
- Frankin, R., 2001. Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater. *Water Science and Technology*, 44(8), 1-6.
- Garay, J., 2016. *Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo del café del Distrito de la coipa en la Región Cajamarca 2014*. (Doctoral).
- García, J., 2015. *Aplicación del método Winkler como sustitución de la respirometría en la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en efluentes del proceso de beneficiado húmedo de café*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- García, S., 2001. Mitigación del impacto ambiental que generan los residuales sólidos del beneficio de café a partir de la producción de abono orgánico. *Unidad de Control y Gestión de Conocimiento (CATEDES). La Habana*.
- Gerardi, M.H., 2003. *The microbiology of anaerobic digesters*: John Wiley & Sons.
- Guzmán, N.G., Belenguer, J.A.S. & Marín, G.C., 2009. Identificación de factores críticos para implantar buenas prácticas agrícolas. *Ingeniería e investigación*, 29(3), 109-114.
- Harada, H., Uemura, S., Chen, A.C. & Jayadevan, J., 1996. Anaerobic treatment of a recalcitrant distillery wastewater by a thermophilic UASB reactor. *Bioresource Technology*, 55(3), 215-221.
- Hernández, H. & Londoño, R., 1988. *Análisis químico de algunos de los principales componentes de las aguas residuales del beneficio del café. Bogotá (Colombia), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Farmacia. 152 p. Tesis: Químico Farmacéutico*.
- Intriago, T. & Esperanza, D., 2016. *Estudio de la eficiencia en la remoción de DQO mediante reactores anaerobios UASB en zonas frías andinas*. Quito, 2016.
- La Motta, E.J., Silva, E., Bustillos, A., Padrón, H. & Luque, J., 2007. Combined anaerobic/aerobic secondary municipal wastewater treatment: pilot-plant demonstration of the UASB/aerobic solids contact system. *Journal of Environmental Engineering*, 133(4), 397-403.
- Lettinga G., 2001. Digestion and degradation, air for life. *Water Science and Technology*, 44(8), 157-176.
- Lettinga, G., Field, J., Van Lier, J., Zeeman, G. & Pol, L. H., 1997. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. *Water Science and Technology*, 35(10), 5-12.
- Manu, B. & Chaudhari, S., 2003. Decolorization of indigo and azo dyes in semicontinuous reactors with long hydraulic retention time. *Process Biochemistry*, 38(8), 1213-1221.
- Mata, J., 2003. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*: IWA publishing.
- Matos, A.T.d., Fia, R., Pinto, A., Gomes, R. & Rezende, A., 2000. *Qualidade das águas superficial e subterrânea em área alagada usada para tratamento de águas residuárias da lavagem e despulpa de frutos de cafeeiro*. Paper presented at the SIMPOSIO de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1. Pocos de Caldas (Brasil), Setembro 26-29, 2000. Resumos expandidos..
- Méndez, D., Omil, F. & Lema, J., 2005. Anaerobic treatment of azo dye Acid Orange 7 under batch conditions. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(2), 264-272.
- Moller, G., Sandoval, Y., Ramirez, A., Ramirez, E., Cardozo, L., Escalante, V. & Ortiz, G., 2011. *Tratamiento de aguas residuales*. Instituto Mexicano de tecnología del agua.
- Moreno, N. & Romero J, A.A., 2016. *Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras*. Universidad de Manizales.
- Muñoz, M., Fuentes, V. & Aldás, M.B., 2016. Reactor anaerobio de flujo horizontal con medio de soporte de polietilentereftalato. *Enfoque UTE*, 7(2), pp. 97-108.
- Noyola, A., 1989. *Los procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales*. In: *Seminario Internacional sobre Biotecnología*

- en la Agroindustria Cafetalera*. Paper presented at the Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetalera, 1. Xalapa (México), Abril 12-15. México.
- Oliveira, R.A.d. & Bruno, N., 2013. Start-up of horizontal anaerobic reactors with sludge blanket and fixed bed for wastewater treatment from coffee processing by wet method. *Engenharia Agrícola*, 33(2), 353-366.
- Orozco, P.A., 2003. Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. (Trabajo de pregrado, Ingeniería Química). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. . 95 p.
- Ortega, N. M., 2006. *Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process*: Universal-Publishers.
- Parawira, W., Read, J.S., Mattiasson, B. & Björnsson, L., 2008. Energy production from agricultural residues: high methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 32(1), 44-50.
- Puebla, Y.G., Pérez, S.R., Hernández, J.J. & Girón, V. S., 2014. Performance of a UASB reactor treating coffee wet wastewater. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 50-56.
- Puebla, C.Y.G., PérezII, C.S.R., VaronaI, Y.C., Jiménez, M.J. & HernándezIII, D.C., 2014. Two-phase anaerobic digestion of coffee wet wastewater: Effect of recycle on anaerobic process performance. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 25-31.
- Racault, Y., Boutin, C. & Seguin, A., 1995. Waste stabilization ponds in France: a report on fifteen years experience. *Water Science and Technology*, 31(12), 91-101.
- Ríos, P., 2015. Planta modular de tratamiento biológico para aguas residuales.
- Rodríguez, N., Sanz, J., Oliveros, C. & Ramirez, C., 2015. Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café.
- Rodríguez, N., 2009. *Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas*. (Doctoral), Universitat Politècnica de València.
- Romero, J., 2005. *Tratamiento de aguas residuales* (E. C. d. Ingeniería Ed. 3ra ed ed.). Colombia.
- Selvamurugan, M., Doraisamy, P., Maheswari, M. & Nandakumar, N., 2010a. High rate anaerobic treatment of coffee processing wastewater using upflow anaerobic hybrid reactor. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 7(2), 129.
- Selvamurugan, M., Doraisamy, P. & Maheswari, M., 2010b. An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. *Ecological Engineering*, 36(12), 1686-1690.
- Show, K.Y., Yan, Y.G., Lee, D.J. & Tay, J.H., 2016. Green Technologies for Industrial Wastewater Treatment: Sustainable Attributes and Prospects of Anaerobic Granulation *Green Technologies for Sustainable Water Management* (pp. 231-254).
- Sosa, R., Chao, R. & Río, D., 1999. Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás. *Habana, Cuba*.
- Van, A.C. & Lettinga, G., 1994. *Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate*: John Wiley & Sons.
- Villanueva, M., Bello, R., Wareham, D., Ruiz, E. & Maya, M., 2014. Discoloration and organic matter removal from coffee wastewater by electrochemical advanced oxidation processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(12), 1-11.
- Zambrano, D., Rodríguez, N., Lopez, U., Orozco, P. & Zambrano, A., 2006. Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café.
- Zambrano, D.A. & Isaza, J., 1998. Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 49(4), 279-289.
- Zegers, F., 1987. Descomposición anaerobia de materia orgánica. *Memorias del curso Arranque y operación de Sistemas UASB. Cali. Universidad Agrícola de Wageningen-Holanda.[Links]*.