

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**EFICIENCIA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A ESCALA PILOTO
EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL
BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ**

POR

BALDEMAR GONZÁLEZ ROBLERO

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

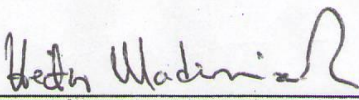
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

EFICIENCIA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A ESCALA PILOTO EN EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIADO
HÚMEDO DEL CAFÉ

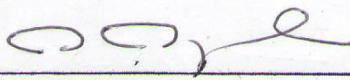
TESIS DEL C. **BALDEMAR GONZÁLEZ ROBLERO** QUE SE SOMETE A
LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA Y
APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:


INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

ASESOR: 
DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

COASESOR: 
M.C. GAMALIEL MEJÍA GONZÁLEZ

COASESOR: 
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

COASESOR: 
BIOL. MARÍA ISABEL BLANCO CERVANTES


DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

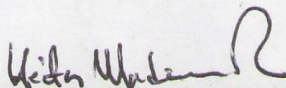
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

EFICIENCIA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A ESCALA PILOTO EN EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIADO
HÚMEDO DEL CAFÉ

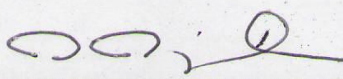
TESIS DEL C. BALDEMAR GONZÁLEZ ROBLERO QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR Y APROBADA COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

PRESIDENTE: 
DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

VOCAL: 
M.C. GAMALIEL MEJÍA GONZÁLEZ

VOCAL: 
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

VOCAL: 
ING. JOEL LIMONES AVITA

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

DEDICATORIA

ADios, por darme las fuerzas para llegar hasta donde estoy, que a pesar de todos los problemas y obstáculos siempre me ha dado una solución, por su inmenso amor y por darme todas las virtudes de la vida para salir adelante.

Amis padres; BaldemarAulán González Pérez, este título va por ti papá por todo el apoyo incondicional que me has brindado, por darme el estudio, por tus consejos, por educarme y estar siempre conmigo. A mi madre **AmericaRoblero Gómez** por ser una excelente madre, por darme todo el amor, cariño, por tus consejos y enseñanzas, este triunfo te lo dedico a ti mami. Los amo.

Amis hermanos; Ofni, Ebil,Abisaí y a mi hermana Yenni, este logro se los dedico a ustedes por ser mi inspiración y motivación para alcanzar este sueño, por apoyarme en todo los aspectos en el trayecto de mi carrera, por sus consejos, ejemplos y por todos los buenos y malos momentos que hemos pasado desde nuestra infancia. Los amo.

AIDr. Héctor Madinaveitia Ríos, por dirigir este trabajo de tesis, por ser una gran persona y por haber confiado en mí.**Al M. en C. Gamaliel Mejía González**, por ser un gran amigo y un gran asesor, este logro no sería posible sin su ayuda. Gracias por todo.

A mi flakiita hermosa, este esfuerzo te lo dedico a ti por ser una gran persona muy especial en mi vida, por tu amor y cariño, por toda la ayuda que me has brindado y sobre todo, por el privilegio y la bendición de ser padres por primera vez de nuestra hermosa hija. Gracias por hacerme el más feliz del mundo. Te quiero mucho.

A mi hija, por ser mi inspiración y fuerza para seguir adelante, por ser lo más valioso en mi vida y mi razón de vivir, este triunfo va por ti mi pequeña Keylin. Te amo.

A 'MB' este título te lo dedico a ti por ser una persona especial en mi vida, por ser parte de mi inspiración para alcanzar lo que hoy soy, que a pesar de las circunstancias en que nos encontramos, siempre estaré agradecido por todo lo que eres, por tu cariño, comprensión, confianza, por escucharme y por todos los momentos que pasamos desde que nos conocimos. tqmm C.L.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme el don de la vida, la salud, por darme una familia maravillosa y por la oportunidad de terminar mi carrera profesional.

Amis padres, por darme la educación, amor, cariño, confianza, por el gran sacrificio que hicieron para poder concluir mis estudios, que de manera incondicional siempre me apoyaron a largo del camino para alcanzar mis metas, por sus consejos y ejemplos, gracias!!

Amis hermanos, por todo el apoyo moral y económico que me han brindado para hacer realidad este sueño.

A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Unidad Laguna, por darme la oportunidad de realizar mis estudios dentro de sus instalaciones, por haberme becado durante toda la carrera y por educarme profesionalmente para enfrentarme al mundo laboral.

Amis compañeros de clase, por su compañerismo durante mi estancia en la universidad y por todos los momentos inolvidables, en especial a Pedro y Rubén que siempre me apoyaron en todos los momentos.

Amis amigos, por brindarme su amistad, confianza, apoyo moral y económico, por estar siempre conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, por comprenderme, escucharme y por todos los consejos que nunca olvidaré. A Magdalena, Oneldaí, Yarenia, Sarita, Pbro. Marcos Antonio, María Magdalena, José Iván, sari, Uri, Zuli, Keila y en especial a Antonia que siempre ha estado a mi lado en las buenas y en las malas, te quiero mucho flakiita. Y a todas aquellas personas que hicieron parte de este presente.

AEI Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Tapachula, Chiapas, México, por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de Tesis dentro de sus instalaciones. En especial al M.C. Gamaliel Mejía González por abrirme las puertas del Laboratorio de Microbiología y Contaminación Ambiental a su cargo y al M.C. David Herrera López responsable del

Laboratorio de Química Ambiental para la realización de los análisis de este proyecto. A Hilda Ivón Moreno Ortiz y Williams Iván Selvas Villafuerte por ser parte de este proyecto de investigación, por el apoyo incondicional, su amistad y confianza que me dieron durante mi estancia dentro del Laboratorio de Microbiología Ambiental.

Al proyectoredISA (Red de Espacios de Innovación Socioambiental) atreves de FORDECYT-CONACYT (Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación – Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por el financiamiento para la construcción del humedal artificial.

Amis asesores, Dr. José Luis Reyes Carrillo, Biol. María Isabel Blanco Cervantes, Ing. Joel Limones Avitiay al Dr. Héctor Madinaveitia Ríos por sus comentarios y colaboraciones de la presente. Al M.C. Gamaliel Mejía González por brindarme su amistad, su apoyo incondicional y dedicación en el asesoramiento y desarrollo de este trabajo, por su comprensión, amabilidad, paciencia y por transmitirme sus conocimientos. Gracias por confiar en mí Gama.

A la M.C. Yadira Siu Rodas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) – Centro de Biociencias (CENBIO) campus IVy al **M. en C. David Herrera López** de ECOSUR, Unidad Tapachula por sus aportaciones, sugerencias y comentarios en la revisión de la presente. Muchas gracias.

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE APÉNDICE.....	X
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Antecedentes.....	4
Humedales artificiales (HA).....	6
Componentes y funcionamiento de los HA.....	8
Clasificación de los HA.....	8
Humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial.....	9
Desarrollo de los Humedales Artificiales Subsuperficiales de Flujo Horizontal (HASSFH).....	10
Tipos de aguas residuales tratadas en HASSFH.....	11
Importancia de las plantas en los HA.....	13
Especies usadas en los HASSFH.....	14
Mecanismos de remoción de contaminantes.....	15
Remoción de materia orgánica.....	15
Remoción de nitrógeno.....	17
Remoción de fósforo.....	18
Remoción de bacterias patógenas.....	20
Remoción de metales pesados.....	21
Ventajas y desventajas de los HA.....	22

Aguas residuales del beneficiado húmedo del café	23
Producción de café en el Estado de Chiapas, México.....	23
Beneficiado húmedo del café.....	23
Características de las aguas residuales del café.....	24
Principales contaminantes del beneficio húmedo del café.....	25
Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café.....	26
Normatividad de descargas de aguas residuales.....	27
Tratamiento de aguas residuales del café.....	28
MATERIALES Y METODOS	30
Establecimiento del HA piloto.....	30
Diseño y construcción del humedal artificial.....	30
Especie vegetal.....	31
Caudal y tiempos de retención hidráulica.....	32
Adaptación de la planta vegetal y lavado del soporte.....	33
Alimentación y operación del sistema.....	33
Muestreo.....	34
Evaluación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.....	35
Eficiencia de remoción de la materia orgánica.....	37
Análisis estadístico.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
Parámetros físicos.....	39
Oxígeno disuelto.....	39
Temperatura.....	41
pH.....	43
Conductividad eléctrica.....	44
Parámetros químicos.....	45
Demanda química de oxígeno.....	45
Demanda bioquímica de oxígeno.....	47
Nitrógeno total por kjeldahl.....	48
Fósforo total.....	49
Parámetros microbiológicos.....	51
Coliformes totales.....	51

Coliformes fecales.....	52
Eficiencia de remoción de la materia orgánica en el HA.....	53
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES.....	60
LITERATURA CITADA.....	62
APÉNDICE.....	79

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro		Página
1.	Composición del mucílago y la pulpa de café.....	26
2.	LMP de contaminantes básicos de las AR en cuanto a consumo humano y aguas de descarga a los ríos.....	28
3.	Frecuencia de los parámetros evaluados y condiciones de muestreo.....	37
Figura		Página
1.	Clasificación de los HA para el tratamiento de aguas residuales.....	9
2.	Representación de los diferentes HA para el tratamiento de aguas residuales.....	12
3.	Representación esquemática de un HASSFH.....	12
4.	Procesos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en los HA.....	16
5.	Diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	32
6.	Puertos de muestreo dentro del sistema.....	35
7.	Comportamiento del OD en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	40
8.	Promedio de la concentración del OD en los diferentes puertos de muestreo del humedal en los dos tiempos de retención.....	41

9.	Comportamiento de la temperatura en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	42
10.	Promedio de la temperatura en los diferentes puertos de muestreo del humedal en los dos tiempos de retención.....	42
11.	Comportamiento del pH en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	44
12.	Comportamiento de la CE en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	45
13.	Comportamiento de la concentración de la DQO en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	46
14.	Comportamiento de la concentración de la DBO ₅ en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	48
15.	Comportamiento de la concentración del NTK en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	49
16.	Comportamiento de la concentración del PT en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	51
17.	Comportamiento de los CT en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	52
18.	Comportamiento de los CF en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención.....	53
19.	Porcentaje de remoción promedio en términos de la DQO, DBO ₅ , NT, PT, CT y CF durante los dos tiempos de retención.....	55

ÍNDICE DE APÉNDICE

Cuadro		Página
4.	Valores de los parámetros físicos medidos en el afluente y efluente del HA en el TRH de 6 días.....	79
5.	Valores de los parámetros físicos medidos en el afluente y efluente del HA en el TRH de 12 días.....	80
6.	Valores de OD y Temperatura medidos en los diferente puertos de muestreo del HA en el TRH de 6 días.....	81
7.	Valores de OD y Temperatura medidos en los diferente puertos de muestreo del HA en el TRH de 12 días.....	82
8.	Concentración de parámetros químicos evaluados en el afluente y efluente del HA en el TRH de 6 días.....	83
9.	Concentración de parámetros químicos evaluados en el afluente y efluente del HA en el TRH de 12 días.....	84
10.	Valores de los parámetros microbiológicos evaluados en el afluente y efluente del HA en el TRH de 6 días.....	85
11.	Valores de los parámetros microbiológicos evaluados en el afluente y efluente del HA en el TRH de 12 días.....	86
12.	Porcentaje de remoción del HA en cuanto a los parámetros evaluados en los dos TRH.....	87

RESUMEN

En la presente investigación se diseñó y se construyó un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a escala piloto de 1.4m² (0.70m x 2m) de superficie, 0.4m de profundidad con una abertura de la base hacia la altura de 1m y con pendiente hacia el efluente del 1%, como tratamiento primario para remover la materia orgánica de las aguas residuales de despulpado del beneficiado húmedo del café. Se evaluó la eficiencia del humedal artificial mediante el porcentaje de remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, operado bajo dos tiempos de retención hidráulica: 6 y 12 días. Se analizaron los siguientes parámetros físicos: Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura (T), Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Hidrógeno (pH); químicos: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Nitrógeno Total por Kjeldahl (NTK) y Fósforo Total (PT); microbiológicos: Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF). Mediante estos análisis se pudo observar que el sistema remueve considerablemente los contaminantes ya que de acuerdo a los parámetros medidos se determinó que el sistema bajo el tiempo de retención hidráulica de 12 días con un caudal en el efluente de 16.66 L/día fue más eficiente al mostrar mayor porcentaje de remoción en términos de la DQO (90%), DBO₅ (40%), NT (83%), PT (97%), CT (88%) y CF (89%) respectivamente. Concluyendo que el sistema es altamente eficiente en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual de despulpado del café, obteniendo remociones por arriba del 80%. Por lo anterior, la aplicación de los humedales artificiales es una alternativa viable

para el tratamiento de estas aguas residuales, ya que son tecnologías simples de operar, la infraestructura para su construcción es muy simple y asequible y su mantenimiento es relativamente fácil y económico.

Palabras clave: Remoción de contaminantes, residuos del café, materia orgánica, *Saccharum officinarum*, flujo subsuperficial.

INTRODUCCIÓN

La industria cafetalera es considerada como una de las fuentes de mayor contaminación en el mundo con alteraciones adversas en el ambiente. En México esta problemática se genera en la producción del café donde se utiliza como proceso de beneficio, la vía húmeda. La situación se agrava cuando los centros de despulpe de café se encuentran ubicados en zonas de montañas donde están los ecosistemas más frágiles (Álvarez *et al.*, 2011; Lara *et al.*, 2007).

En la región del Soconusco en Chiapas, México, la mayor parte del café producido es de tipo arábica (*coffea arábica*), que es procesado por el beneficio de la vía húmeda, donde se requiere grandes cantidades de agua, aproximadamente 8 litros por cada kilogramo de café (SAGARPA, 2003).

Las Aguas Residuales (AR) de este procesamiento (vía húmeda) son desechadas directamente a los ecosistemas sin previo tratamiento, y aportan una alta concentración de contaminantes orgánicos así como una alta carga de nutrientes a las aguas receptoras, lo cual contribuye al fenómeno de la eutrofización (Kröger *et al.*, 2012).

En la actualidad no se cuenta con sistemas de tratamiento eficientes en todos los beneficios de la región, por lo cual es necesario buscar y encontrar alternativas de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables (Arias y Brix, 2003). Uno de las soluciones a esta problemática es la aplicación de los humedales artificiales, que se han convertido hoy en día, en una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales, ya que ayudan a

resolver problemas de manejo de desechos líquidos en zonas rurales, así como en urbanas (Vymazal, 2010; Guido-Zárete y Duran de Bazúa, 2008).

A diferencia de muchos sistemas convencionales de tratamiento que generan una gran cantidad de lodos y subproductos (Arroyave, 2010), es que los HAson simples de operar, la infraestructura para su construcción es muy simple y su mantenimiento es relativamente fácil y económico.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un humedal artificial a escala piloto para remover la materia orgánica de las aguas residuales de despulpado del beneficiado húmedo del café bajo dos tiempos de retención hidráulica.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas residuales de despulpado del beneficiado húmedo del café.
- Evaluar la eficiencia del humedal artificial bajo dos diferentes tiempos de retención hidráulica.

HIPÓTESIS

El humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal remueve más del 50% de materia orgánica.

REVISIÓN DE LITERATURA

Antecedentes

El término “humedal artificial”, se empezó a emplear en la década de los 90; sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que las antiguas culturas como son la China y la Egipcia utilizaban a los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales (Brix, 1994).

El estudio sobre humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se inició en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania- USA que pertenece a la Dra. Kathe Seidel, en el cual plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*), es posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la remoción de bacterias (coliformes, *Salmonella* y enterococos) presentes en las aguas residuales (Seidel, 1966; Llagas y Gómez, 2006).

Posteriormente, con base en los trabajos realizados por la Dra. Seidel; en el año de 1967 se comenzó a desarrollar un sistema a gran escala. En Estados Unidos, el desarrollo de los humedales artificiales se basó en los resultados obtenidos en los humedales naturales y en los trabajos realizados en Europa. En un principio se utilizaron los humedales naturales como una vía para el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, se observó que ocurrían cambios en la composición de las especies comunes de estos sitios por lo que se decidió comenzar a diseñar humedales artificiales para tratar las

aguas residuales, los cuales demostraron su eficacia para estos fines (Reed, 1995).

En los años de 1970s – 1980s los humedales artificiales sólo eran utilizados para tratar aguas domesticas o municipales y a partir de los 90s, estos sistemas son usados para tratar todo tipo de agua residual (Vymazal, 2005b).

En México, también se han implementado humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo: en 2005 en Santa Fe de la Laguna, Michoacán, instalaron humedales subsuperficiales plantados con carrizo y tule para el tratamiento de las aguas residuales de esa comunidad ribereña, con capacidad de tratamiento de 3L/seg (CONAGUA, 2009).

En Oaxaca se estableció un proyecto de optimización de lechos de raíces para el tratamiento de aguas residuales municipales, con una duración de 3 años, teniendo como objetivos: a) Conocer las características actuales de los lechos de raíces (1999), b) Proponer una alternativa de diseño de lecho de raíces optimizada (1999), c) Promover y asesorar la construcción del sistema (2000) y d) Evaluar el comportamiento del sistema (2000-2001) para demostrar la capacidad y eficiencia en la remoción de la DBO, sólidos suspendidos y microorganismos como coliformes (López, 2000).

En Tapachula, Chiapas se instaló y monitoreó un humedal subsuperficial de flujo vertical como tratamiento terciario de aguas provenientes de la población combinadas con las guas provenientes del beneficiado del café. El sistema estuvo integrado por tres celdas unidas en paralelo, con área total de

300 m². Los análisis estadísticos demostraron grandes eficiencias de remoción (Orozco *et al.*, 2006).

La mayoría de los trabajos realizados a nivel nacional, están enfocados a demostrar que los humedales artificiales son una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

A pesar que los humedales artificiales son ampliamente utilizados en Europa y Estados Unidos, el desarrollo de esta tecnología no se ha visto favorecido en países en vías de desarrollo. De acuerdo a la CONAGUA (2009), en México, los estados donde se han implementado humedales artificiales son Aguascalientes, Chihuahua, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Sinaloa y Tlaxcala.

Actualmente existen en total 64 sistemas de humedales individuales en todo el país, y 96 sistemas donde combinan el humedal artificial con algún otro tipo de tratamiento: Tanque Séptico, UASB, tanque Imhoff, Sedimentación (CONAGUA, 2010).

Humedales artificiales

Diferentes autores definen a los Humedales Artificiales (HA) como sistemas de tratamiento de AR que imitan la actividad depuradora realizada por los humedales naturales (Reyes-Luz *et al.*, 2011; Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2001) que se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y una comunidad viviente (plantas y microorganismos) adaptados a la vida acuática o a un suelo saturado. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un sustrato (grava o arena), impermeabilizado con

geomembrana para retener los lixiviados, que hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el AR de la entrada es depurado progresiva y lentamente (Delgadillo *et al.*, 2010; Arias *et al.*, 2010; Romero *et al.*, 2009).

Los HA han evolucionado durante las últimas cinco décadas en una tecnología de tratamiento viable que se puede aplicar a todo tipo de AR como: industriales, agrícolas, aguas pluviales, aguas de escorrentía y lixiviados. Estos sistemas son específicamente construidos para el tratamiento de AR donde la contaminación se elimina a través de los procesos que son comunes en los humedales naturales, solo que en los HA estos procesos se llevan a cabo bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad (Reyes-Luz *et al.*, 2011; Vymazal, 2010).

La aplicación de los HA ayuda a resolver el problema de manejo de desechos líquidos domésticos en zonas rurales, así como áreas urbanas. Estos sistemas son caracterizados por su simplicidad, bajo costo de operación y no se requiere de conocimiento técnico especializado para su mantenimiento (Zou *et al.*, 2012; Orozco *et al.*, 2006; Fenoglio, 2003).

Una característica común entre todos los HA es que funcionan como un reservorio de minerales secundarios que se precipitan de las aguas receptoras. Así, el agua que se descarga en el efluente (salida) de los humedales es de mucha mejor calidad que la que fue recibido en el afluente (entrada) (Nicomrat *et al.*, 2006).

Componentes y funcionamiento de los HA

Dentro de los HA se pueden encontrar una serie de componentes, los principales son: el soporte, vegetación, microorganismos y el agua. El sustrato funciona como medio filtrante, como conductor hidráulico, como soporte para el enraizamiento de las plantas vegetales y como un medio de fijación para las comunidades microbianas. La vegetación puede ser de diferente especie y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrientes, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas. Los microorganismos son la parte fundamental del funcionamiento de los HA, ya que de ellos depende la mayor parte de la eficiencia de remoción de la materia orgánica y la transformación de compuestos nitrogenados y de fósforo contenidos en las aguas residuales (Ariaset *al.*, 2010; Kadlec y Wallace, 2009; Scholz y Byoung, 2005; Vymazal, 2001)

Clasificación de los HA

La clasificación de los HA se basa principalmente en: el tipo de macrófita (emergente, sumergida, hojas flotantes y de libre flotación) y con base a la hidrodinámica, los HA pueden ser de flujo superficial y de flujo subsuperficial. Los humedales de flujo subsuperficiales pueden ser clasificados a su vez de acuerdo con la dirección del flujo, en vertical u horizontal (Vymazal, 2010). En la figura 1 se observa el esquema de clasificación de los HA para el tratamiento de aguas residuales.

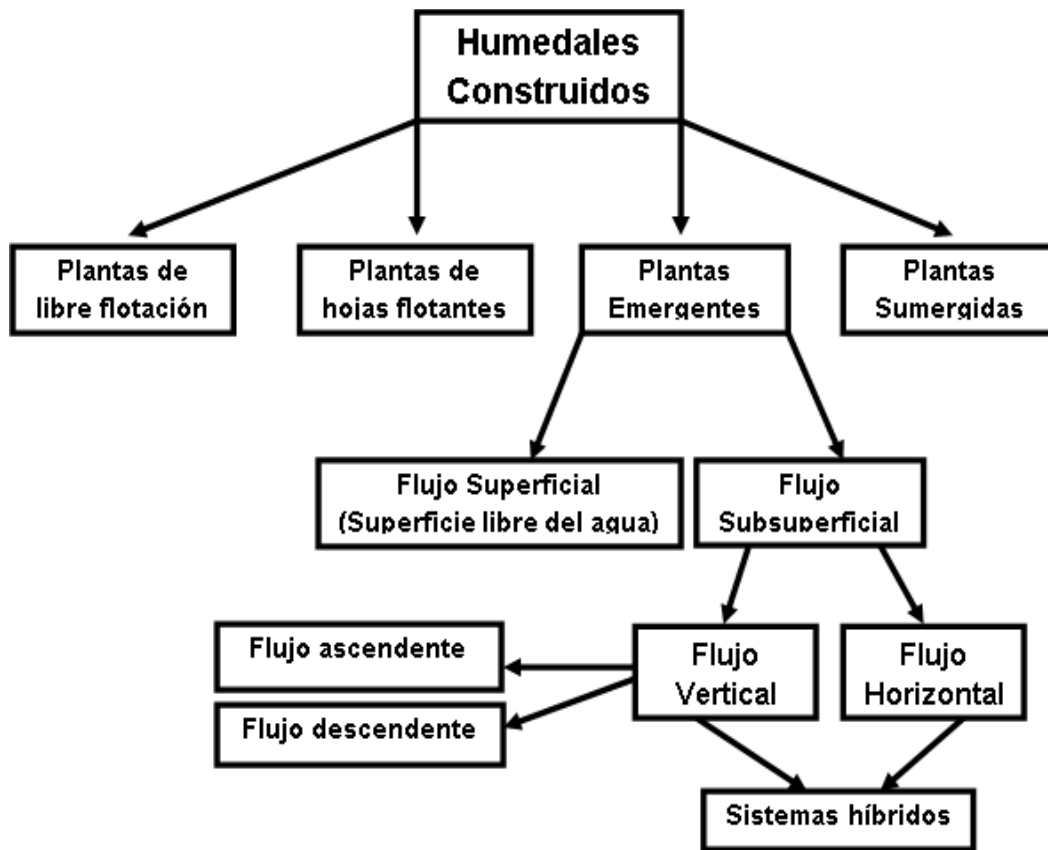


Figura 1. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Fuente: Vymazal (2001).

Humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial

Los HA de flujo superficial son aquellos donde el agua circula a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera, estos tipos de humedales son una modificación al sistema de lagunas convencionales, con la diferencia en su profundidad (entre 0.1m y 0,6 m). Los HA de flujo subsuperficial, se caracterizan por que la circulación del agua es a través de un medio poroso subterráneo con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. Estos sistemas se clasifican a su vez en Humedales Artificiales Subsuperficiales de Flujo Vertical (HASSFV) y en Humedales Artificiales Subsuperficiales de Flujo Horizontal (HASSFH) (Zou *et al.*, 2012; Chen, 2011;

Chenget *al.*, 2011; Delgadillo *et al.*, 2010; Arias *et al.*, 2010). En la figura 2 se observan las representaciones de los diferentes tipos de HA para el tratamiento de las AR

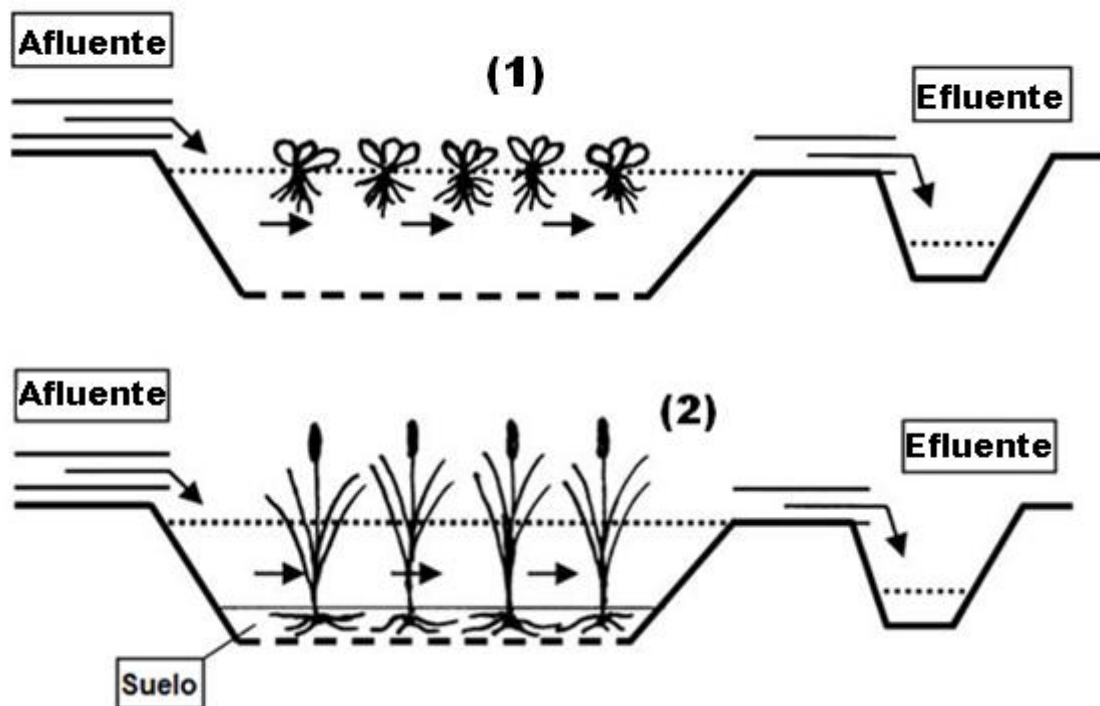
Los HASSFH son construidos en camas cavadas en el suelo, donde el AR fluye a través del soporte en forma horizontal y entra en contacto con las biopelículas y rizomas, donde los contaminantes son eliminados mediante procesos físicos, químicos y biológicos (García *et al.*, 2010; Giácoman *et al.*, 2010; Arias *et al.*, 2010). En la figura 3 se observa la representación de un HA de flujo horizontal.

Desarrollo de los HASSFH

Los primeros experimentos con HASSFH fueron iniciados por Seidel en la década de los 60's y mejorado a finales de la misma década por Reinhold Kickuth bajo el nombre "método de la zona de la raíz", y a principios de los 70's esta tecnología se extendió por toda Europa. Sin embargo, los trabajos de Kickuth fueron descartados debido al tipo de suelos cohesivos utilizados que mostraba una baja permeabilidad hidráulica, posteriormente a finales de los 80's científicos del Reino Unido sustituyeron estos suelos por otros medios porosos, tales como la grava por su alta conductividad hidráulica y que actualmente esta característica de diseño es utilizada. De hecho, el uso de medios porosos con alta conductividad hidráulica fue propuesto originalmente por Seidel (Vymazal, 2010; Vymazal, 2005b).

Tipos de aguas residuales tratadas en HASSFH

Los humedales de flujo horizontal se han utilizado para el tratamiento de AR durante más de cinco décadas. La mayoría han sido diseñados para el tratamiento de AR domésticas o municipales. En la actualidad los HASSFH se utilizan para el tratamiento de AR procedentes de: la industria (refinerías de petróleo, fábricas de productos químicos, producción de papel, curtidurías, industrias textiles y destilería); procesamiento de alimentos (producción y elaboración de la leche, queso, patatas, azúcar); lixiviados de rellenos sanitarios; la agricultura y ganadería (escorrentía producida en los terrenos que contienen grandes cantidades de abonos y fertilizantes, excrementos del ganado y productos químicos como insecticidas), recibiendo más atención los lixiviados procedentes de la agricultura y rellenos sanitarios (Vymazal, 2009; Vymazal y Kröpfelová, 2009a).



Importancia de las plantas en los HA

Los principales efectos de la vegetación en los humedales son: 1) Proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula a través de raíces y rizomas, esta crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular; 2) Crean microambientes aeróbicos alrededor de las raíces donde tienen lugar procesos microbianos, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación; 3) Amortiguan las variaciones ambientales, cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración; 4) Asimilación de nutrientes, su contribución a la remoción de nutrientes es entre un 10% del N y un 20% del P, dependiendo del tipo de agua residual a tratar (Vymazal, 2011; Vera *et al.*, 2010; García y Corzo, 2008).

Entre las recomendaciones dadas por García y Corzo (2008) para la selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales, se debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes sugerencias:

- Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
- Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
- La biomasa subterránea debe poseer una superficie específica para potenciar el crecimiento de una biopelícula microbiana.

- Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
- Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
- Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
- Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- Se deben utilizar especies propias de la flora local.

Especies usadas en los HASSFH

La presencia de macrófitos es una de las características más sobresalientes de los humedales. Las macrófitas que crecen en un HA tiene varias propiedades en relación con el proceso de tratamiento que les hacen un componente esencial del diseño. Sin embargo, sólo las funciones de algunas macrófitas se aplican a los humedales artificiales de flujo horizontal. La planta más utilizada en todo el mundo es *Phragmites australis* (carrizo). Las especies del género *Typha latifolia* (*angustifolia*, *domingensis*, *orientalis* y *glauca*) y *Scirpus* (por ejemplo, *lacustris*, *validus*, *californicus* y *yacutus*), que son otras especies de uso común. En muchos países, y especialmente en los trópicos y subtrópicos, las plantas locales, incluyendo las especies ornamentales se utilizan para la construcción de HA. Desde el punto de vista teórico, muchas especies emergentes podrían ser utilizadas para HA de flujo horizontal, pero en realidad, sólo un número limitado de especies se ha utilizado hasta ahora (Vymazal, 2011).

Las plantas vegetales correspondientes al grupo de macrófitas emergentes, han demostrado buena capacidad de adaptación y en especial, son resistentes a las condiciones ambientales adversas predominantes cuando se trata de aguas residuales (Arias y Brix, 2003).

Mecanismos de remoción de contaminantes

En un HA se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos fisicoquímicos y biológicos tienen lugar.

- Remoción de materia orgánica

La mayor parte de la Materia Orgánica (MO) es removida principalmente por filtración a través del soporte, producido por la biomasa vegetal y la interacción con el suelo. En humedales de flujo horizontal, la MO es retenida cerca de la entrada y cerca de la superficie en sistemas verticales (Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001).

La MO particulada que ingresa al humedal se convierte en partículas más pequeñas por medio de la fragmentación abiótica, que pueden ser hidrolizadas por enzimas extracelulares. Las enzimas son excretados por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. El resultado de la hidrólisis es la formación de sustratos sencillos (por ejemplo, carbohidratos o aminoácidos) que pueden ser asimilados por las bacterias heterótrofas aeróbicas o fermentativas facultativas. Los ácidos a su vez pueden ser asimilados por bacterias sulfatoreductoras, metanogénicas y también, por

supuesto, por las heterótrofas aeróbicas. Los sustratos sencillos presentes en el AR son asimilados directamente sin necesidad de hidrólisis previa (Londollo y Marín, 2009; García y Corzo, 2008). En la Figura 4 se muestra una representación esquemática de los procesos implicados en la degradación de la MO en los humedales.

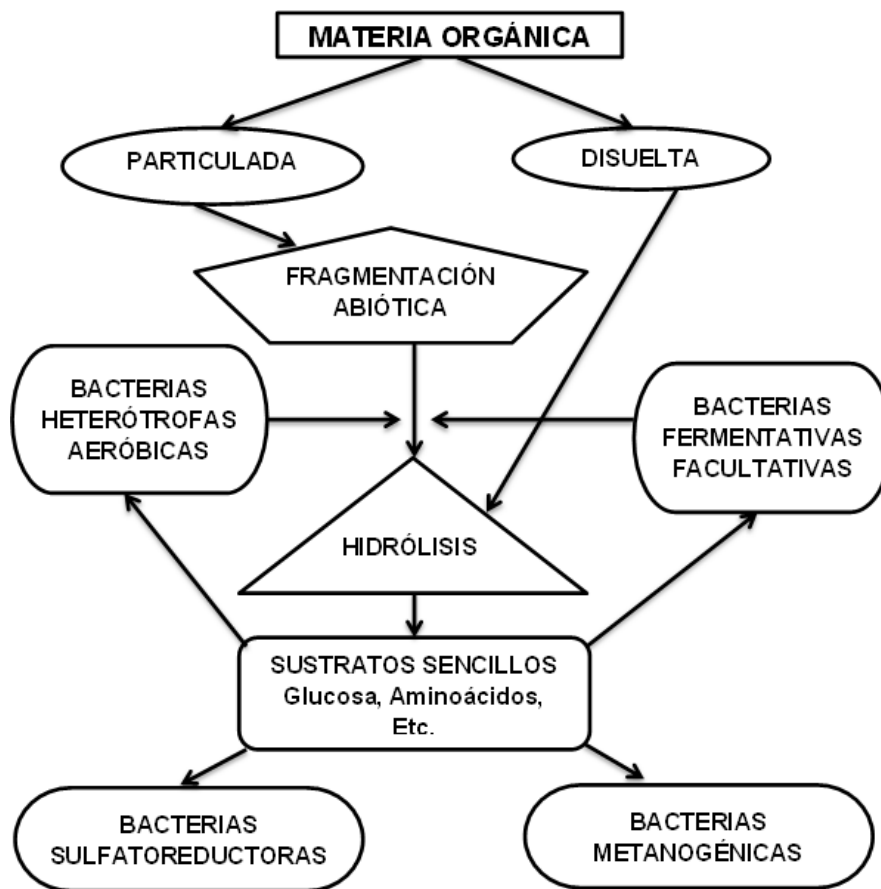


Figura 4. Procesos que intervienen en la degradación de la MO en los humedales. Fuente: García y Corzo (2008).

El principal mecanismo responsable de la eliminación de la MO en los humedales de flujo horizontal, es la actividad de bacterias aerobias y anaerobias, así como la sedimentación y filtración de partículas de

materia orgánica. La vegetación y el sustrato, juegan un papel importante para el crecimiento microbiano (Albuquerque *et al.*, 2009; Vymazal y Kröpfelová, 2009a; Li *et al.*, 2008). Dependiendo de los sustratos del suelo y la composición del efluente, otros aceptores de electrones inorgánicos, tales como nitrato, dióxido de manganeso, hidróxido férrico, sulfato y carbonato puede regular la descomposición de la materia orgánica (Kadlec y Reddy, 2001).

- Remoción de nitrógeno

La mayor parte del Nitrógeno (N) está presente en la naturaleza como N orgánico o amoniacal. La remoción de N en los humedales se logra a través de dos vías: por el ciclo del N y por el almacenamiento del mismo. Los principales mecanismos de remoción de N en HA son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación (Vymazal, 2010; Delgadillo *et al.*, 2010).

El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico con múltiples transformaciones bióticas / abióticas que involucra a siete estados de valencia (+5 a -3). Los compuestos incluyen una variedad de formas de nitrógeno inorgánico y orgánico que son esenciales para toda la vida biológica. La forma inorgánica más importante de nitrógeno en los humedales es el amonio (NH_4^+) y nitritos (NO_2). El nitrógeno gaseoso puede existir como dinitrógeno (N_2), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), Tetróxido de nitrógeno (N_2O_4) y amoníaco (NH_3) (Vymazal, 2007).

Los HA de flujo horizontal proporcionan buenas condiciones para la desnitrificación, pero la capacidad de estos humedales para la

nitrificación completa es muy limitado debido a la falta de oxígeno característico de este tipo de sistemas. La emisión de gas N_2 generado durante la desnitrificación es considerada como la principal vía de eliminación de N en los humedales de flujo horizontal (Kyambadde *et al.*, 2005; Vymazal, 2007; Xuan *et al.*, 2009; Vymazal y Kröpfelová, 2009b).

Los procesos que afectan a la eliminación y la retención de N durante el tratamiento de AR en los HA son múltiples e incluyen la volatilización del NH_3 , nitrificación y la absorción microbiana, además, la mineralización (amonificación), la reducción de nitrito a amonio (nitritoamonificación), la oxidación del amoníaco anaerobio (ANAMMOX), la fragmentación, la adsorción, desorción y la lixiviación (Pérez-Peláez *et al.*, 2011; Gaboutloeloe *et al.*, 2009; Vymazal y Kröpfelová, 2009b; Kyambadde *et al.*, 2005).

Vymazal (2010) menciona que la eliminación de N está limitado principalmente por las condiciones anóxicas / anaeróbicas en lechos de filtración que no permiten la nitrificación a amoníaco. Además menciona que varios tipos de HA puede combinarse con el fin de lograr un mayor efecto del tratamiento, especialmente para el N.

- Remoción de fósforo

El Fósforo (P) generalmente se encuentra en la naturaleza en forma de fosfatos orgánicos e inorgánicos, tales como: ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El P ligado orgánicamente está presente en fosfolípidos, ácidos nucleicos, nucleoproteínas, azúcares fosforilados o polifosfatos orgánicos condensados (Vymazal, 2007). La eliminación biológica de P se produce dentro de las biopelículas que se desarrollan sobre el sustrato y los microorganismos

presentes en los sedimentos (Madigan, 2004; Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001).

Debido a que el P es un nutriente esencial para los seres vivos, los microorganismos y las plantas presentes en los procesos de tratamiento pueden asimilarlo e incorporarlo a sus tejidos celulares. Cuando el P no es removido de las AR y cuando éste llega en concentraciones relativamente altas a los cuerpos receptores de descarga, este nutriente permite el crecimiento y desarrollo de una gran cantidad de algas y otros microorganismos. Cuando se lleva a cabo la degradación de las algas, tienden a flotar en la parte superficial del agua limitando el paso de la luz solar y, con ello, limitando que la fotosíntesis se lleve a cabo de manera normal, lo que causa una caída en la concentración de oxígeno provocando la muerte de peces y otros organismos superiores, este fenómeno se le conoce como “eutrofización” (Tang *et al.*, 2012; Reyes-Luz *et al.*, 2011).

Específicamente, la retención del P se efectúa principalmente por la precipitación y adsorción en el medio de soporte, que es de gran importancia en los HASSFH debido a sus efectos sobre la eficiencia de remoción del P (Zemanová *et al.*, 2010; Benhua *et al.*, 2006). También la absorción por la planta intervienen en la retención del P (Vymazal, 2007; Vohla *et al.*, 2007; Vohla *et al.*, 2005). Además, la asimilación por las plantas e inmovilización microbiana apoya el proceso de retención del mismo (Maine *et al.*, 2007; Kaasik, 2006; Yuan *et al.*, 2005).

En los humedales de flujo horizontal, la eliminación de nutrientes, especialmente P, es limitada debido a que la biomasa de raíces llena los espacios porosos del sustrato (generalmente grava), dirigiendo el flujo de las

aguas residuales en los sustratos más profundos de los humedales, las plantas no son regularmente cosechadas y la descomposición de la vegetación permanece en la superficie del sustrato (Dzakpasu *et al.*, 2011). Además, Vymazal (2010) dice que la eliminación del P está restringida por el uso de materiales de filtro con baja capacidad de absorción.

- Remoción de bacterias patógenas

En AR se encuentran una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias, hongos y protozoarios. Los grupos más estudiados como indicadores de contaminación son los Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), *Streptococcus Fecales* y *Escherichia Coli* (Kadlec y Reddy, 2001).

Los HA con vegetación emergente en todo el mundo han demostrado la remoción de CT y CF hasta 95 – 99% mientras que la remoción de *Streptococcus* es menor, un 80-95% (Vymazal, 2005a).

Los CT son bacterias aerobias y anaerobias facultativas no esporuladas. La capacidad de reproducción de estos bacilos, dentro de los intestinos de los animales homeotérmicos (de sangre caliente), es favorecida por las condiciones adecuadas de temperatura, materia orgánica, pH y humedad. Los CF constituyen un subgrupo de los CT de 0.0002-0.0003 mm por 0.002 a 0.003 mm. Se diferencian de los CT por ser tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44.5 °C), lo que les permite estar mejor adaptados a la vida al interior del animal (Delgadillo *et al.*, 2010).

Los HA con vegetación emergente ofrecen alta remoción de bacterias entéricas (CT-CF), pero el efecto del tratamiento varía entre los sistemas y

tipos de HA. Los humedales de tipo subsuperficial de flujo horizontal son más eficaces en la eliminación de bacterias, este fenómeno se da por la presencia de oxígeno en la columna de agua de la rizosfera y por la presencia de exudados de plantas con propiedades antimicrobianas (Reinoso *et al.*, 2008; Vymazal, 2005a).

- Remoción de metales pesados

Los Metales Pesados (MP) es un término colectivo dado a todos los metales que tienen un peso molecular superior al Calcio. Los principales MP nocivos presentes en el agua residual son: Plomo, Cobre, Zinc, Cromo, Mercurio, Cadmio y Arsénico. Sin embargo, algunos metales como el Cobre y el Zinc también son micronutrientes esenciales para las plantas y los microorganismos. Los metales pesados se encuentran en la matriz de los HA en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeras las formas más biodisponibles. Los procesos fisicoquímicos como la adsorción, precipitación, sedimentación y difusión, determinan la distribución entre las partículas y las fases disueltas. La remoción de metales pesados en HA, también se da por acción microbiana, en zonas aerobias del sistema se pueden encontrar mecanismos de oxidación microbiana aerobia, mientras que en zonas anaerobias la remoción de metales se da cuando los microorganismos usan a los metales como aceptores finales de electrones (Delgadillo *et al.*, 2010; Maine *et al.*, 2007; Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001).

En general las aguas residuales tratadas con HA pueden alcanzar las estrictas normas de descarga, con la reducción de la concentración de nitrógeno de 93% al 55% y fósforo de 42% - 97%. También han demostrado

ser relativamente insensibles a muchos metales tóxicos en aguas residuales capaces de remover y desintoxicar algunos de los metales con gran éxito (Debinget *al.*, 2010; Jin y Kelley, 2007).

Ventajas y desventajas de los HA

Las principales ventajas de los HA en el tratamiento de AR son: 1) Tratamiento efectivo y minimización de equipos mecánicos; 2) Baja producción de lodos; 3) La única energía para su funcionamiento es la del sol; 4) No requieren de la adición de reactivos ni de energía para airear el agua o recircularla; 5) Son muy efectivos en la degradación de la MO (DBO, DQO) y en la reducción de algunos metales pesados presentes en el agua residual; 6) Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son problema, mientras el sistema se opere adecuadamente y se mantenga el nivel subsuperficial de flujo; 7) La infraestructura para su construcción es muy simple y asequible; 8) Su mantenimiento y operación es relativamente fácil y económico; 9) Es una tecnología muy adecuada para ser aplicada en proyectos de cooperación dado que no genera dependencia tecnológica (Giácomanet *al.*, 2010; García y Corzo, 2008; Vymazal, 2010; Vymazal, 2001).

Las desventajas en el uso de los HA son: 1) Requieren de un área extensa (dependiendo del flujo del caudal) en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento; 2) En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la remoción de la materia orgánica; 3) Puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico (Giácoman *et al.*, 2010; Delgadillo *et al.*, 2010).

Aguas residuales del beneficiado húmedo del café

Producción de café en el Estado de Chiapas, México

Chiapas, es un estado sustentado históricamente en la agricultura y dentro de esta se encuentra la producción y comercialización del café, que ha sido el cultivo de mayor importancia social y económica (Pohlan, 2002). México ha sido uno de los países con mayor producción de café a nivel mundial, teniendo una producción anual de 1, 294,896 toneladas de café, de los cuales el Estado de Chiapas produce un total de 537, 425, ocupando así el primer lugar en producción a nivel nacional (SIAP, 2010).

En la región del Soconusco, Chiapas, el cultivo del café ocupa una superficie de 75,505 Ha de un total de 240,800 Ha en todo el estado de Chiapas; con una producción de 665,199 quintales (1Qq = 57.7 Kg) de un total de 2,134,280 Qq ocupando el primer lugar de producción del café tipo arábica (*coffea arábica*). En Centro America, Colombia y México y sobre todo en el Estado de Chiapas, este café es procesado por el beneficio de la vía húmeda, donde se utiliza grandes cantidades de agua, aproximadamente 8 litros por cada kilogramo de café (Orozco *et al.*, 2006; SAGARPA, 2003).

Beneficiado húmedo del café

Los frutos maduros del cafeto, para convertirse en grano “oro”, son sometidos a un proceso que se conoce con el nombre de “beneficiado”, el cual consiste en una serie de operaciones que tienen por objeto despojar a los granos de sus envolturas (pulpa, mucílago, pergamino y película). Para el beneficiado existen dos procesos diferentes, vía húmeda y vía seca. El proceso

de la vía húmeda se efectúa en cinco pasos: 1) Eliminación de la pulpa (despulpado); 2) Desmucilagínación (fermentado), 3) Lavado; 4) Secado del café pergamino, y 5) Trillado y calibrado. En el proceso de la vía seca, los frutos frescos son sometidos a tres operaciones: 1) Secado de la cereza (café en fruto); 2) Eliminación de las envolturas secas en una única operación mecánica, y posteriormente 3) Trillado y calibrado. Cabe mencionar que el proceso del beneficio húmedo se efectúa en la zona aledaña a las plantaciones y requiere grandes cantidades de agua, por lo que los beneficios se construyen a orillas de los ríos y en zonas con abundantes recursos hídricos (Bello, 2002)

Características de las aguas residuales del café

En aguas de despulpado del café, se pueden observar características como color café-rojizo, turbidez elevada (1,000 UNT), mal olor y un pH ácido (3 – 4). Además, tienen altas concentraciones de DQO (5,000 – 10,00 mg/L), DBO₅ (>7,000 mg/L), NT (>30 mg/L) y PT (>60 mg/L) (Sokolov, 2002; Bello, 2002).

El café maduro presenta una composición en la cual el grano, que es la parte aprovechable para el proceso, representa el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de beneficiado genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos (Pujole *et al.*, 2001).

Después de la primera fermentación de azúcares en el agua residual de café, las sustancias orgánicas diluidas se descomponen muy lentamente por procesos microbiológicos que utilizan el oxígeno del agua. Este proceso causa problemas como la demanda de oxígeno para descomponer el material orgánico en el agua residual. Además del mal olor y el cambio de color del

agua (de color verde oscuro a negro después de un tiempo) que es causado por los componentes químicos del color rojo de la baya del café (flavonoides). Estos colores de la fruta son en realidad los precursores del color marrón del agua del pantano de humus, que es completamente dañino para las especies acuáticas (ByJan y Ken, 2002).

Las operaciones de despulpado y lavado generan como mínimo 67 kg de Demanda Química de Oxígeno total (DQOt) de café y 75 kg de DQOt de café oro respectivamente. Esta carga orgánica y los grandes volúmenes de agua utilizada en el proceso son los que dificultan la utilización de un sistema efectivo de tratamiento (Sokolov, 2002).

De acuerdo con Haddis y Devi (2008), Mejía (2006) y Hernández y Hidalgo (2000), las aguas residuales del café tienen un pH muy ácido entre 3 - 4, si se descargan directamente a los cuerpos de agua sin previo tratamiento, trae como consecuencia el deterioro del ambiente. Los ácidosacéticos a partir de la fermentación de los azúcares en el mucílago, hacen que este tipo de AR sea muy ácida con un pH hasta 3.8, bajo estas condiciones ácidas, plantas y animales superiores difícilmente podrán sobrevivir (ByJan y Ken, 2002).

Principales contaminantes del beneficiado húmedo del café

Los principales contaminantes que se generan en el proceso del beneficiado húmedo del café son: aguas de despulpado, aguas de lavado, mucílago y la pulpa. En el cuadro 1 se observan la composición del mucílago y la pulpa del café.

En AR de despulpado de café, se pueden encontrar compuestos químicos tóxicos como: ácido clorogénico, taninos, alcaloides como cafeína,

ácido cafeico, polifenoles, azúcares reducidos y otros compuestos, que en altas proporciones, disminuyen la calidad del agua, además, la degradación biológica del material orgánico de estos componentes en el agua residual suelen ser recalcitrantes (Mohanpuria *et al.*, 2010; ByJan y Ken, 2002).

Cuadro 1. Composición del mucílago y la pulpa de café. Fuente: By Jan y Ken (2002).

Mucilago		Pulpa	
Agua	84,2%	Extracto etéreo	0,48%
Proteínas	8,9%	Fibra cruda	21,4%
Azúcares		Proteína cruda	10,1%
- Glucosa (reducción)	2,5%	Extracto libre de nitrógeno	31,3%
- Sacarosa (sin reducción)	1,6%	Taninos	7,8%
Pectina	1,0%	Substancias pectinas	6,5%
		Azúcares no reductores	2,0%
		Reducción de azúcares	12,4%
		Ácido clorogenico	2,6%
		Cafeína	2,3%
		Ácido cafeico total	1,6%

Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café

Las AR del proceso de despulpado y lavado del café, comúnmente conocida como *agua miel*, se consideran como una de las fuentes de contaminación en el sector cafetalero, ya que contienen una alta concentración de contaminantes orgánicos. El proceso de despulpado y lavado de 1 kg café

genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por 6 personas en un día (Pujolet *et al.*, 2001; Hernández y Hidalgo, 2000).

El vertimiento de las aguas del beneficiado a las corrientes de agua en épocas de cosecha, causa afectaciones severas a los cuerpos de aguas receptoras, suelos y ecosistemas. En primer lugar se tiene el alto consumo de agua por parte del beneficiado húmedo, una vez que estas aguas residuales entren en contacto con los ríos, arrastraran aguas cargadas con una alta concentración de sólidos en suspensión, sedimentos e impurezas químicas y serán depositadas aguas abajo, provocando la eutrofización, disminución del oxígeno disuelto, disminución del pH, afectaciones a nichos ecológicos acuáticos (especies, animales y vegetales), deterioro de la calidad del suelo y una creciente erosión del mismo, imposibilidad del uso de las aguas para el consumo humano y modificaciones en el paisaje (Sokolov, 2002; ByJan y Ken, 2002; Pujol *et al.*, 2001).

Normatividad de descargas de aguas residuales

Cada país tiene normas y leyes que regulan las descargas de aguas residuales, en México existe la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y en bienes nacionales. Con base al a la caracterización de las aguas residuales de café y de acuerdo con la norma mexicana expuesta anteriormente, parámetros como

DBO₅, PT, NT y pH están fuera de los LMP, para lo cual es necesario implementar tecnologías de tratamiento que solucionen este problema. En el cuadro 2 se observan los LMP para contaminantes básicos de las AR.

Cuadro 2. LMP de contaminantes básicos de las AR en cuanto consumo humano y aguas de descarga a los ríos.

Parámetros Físicoquímicos	Límites Máximos Permisibles	
	NOM-127-SSA1-1994 ⁺	NOM-001-SEMARNAT-1996 ⁺⁺
pH (unidades)	6.5 – 8.5	5 – 10
Turbidez (NTU)	5	NA
Coliformes Totales (NMP/100mL)	2	NA
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	No detectable	NA
Cloruros (mg/L)	250	NA
Dureza (mg/L)	500	NA
Nitratos (mg/L)	10	NA
DBO ₅ (mg/L)	NA	200
Fósforo (mg/L)	NA	30
Nitrógeno (mg/L)	NA	60

Tratamientos de aguas residuales de café

El tratamiento de las AR de los beneficios húmedos de café ha sido tema de estudio de muchos investigadores alrededor del mundo. Varias tecnologías se han propuesto y se han aplicado, que van desde los tanques estabilizadores hasta procesos biológicos anaerobios más avanzados en tratamiento de aguas residuales (Chanakya y De Alwis, 2004; Chanakya *et al.*, 1998; Gathuo, 1995; Bello y Castillo, 1988; Maheswaran, 1988; Calzada *et al.*, 1984).

Se han llevado a cabo estudios donde se han evaluado HA en el tratamiento de AR de café, donde reportan eficiencias de remoción de contaminantes por arriba del 90% (Ramírez *et al.*, 2009; Orozco *et al.*, 2005).

Orozco *et al.*, (2006) evaluaron un sistema para tratar AR de café, el cual incluyó sedimentadores, reactor de lodos activados y un HA de flujo vertical como sistema terciario, utilizando *Saccharum officinarum* (caña de azúcar), reportando porcentajes de remoción del 92% para DQO y 95 – 96% para coliformes fecales.

Moreno *et al.*, (2012) evaluaron un sistema de humedales de flujo horizontal en el Ejido de Alpujarras, Cacahoatán, Chiapas en el 2010, para tratar aguas residuales crudas de lavado del café, usando la especie “caña de azúcar” como plantas vegetales. Evaluaron TRH de 2, 4 y 6 días, determinando que el tiempo de retención de 6 días mostró mayor porcentaje de remoción, con resultados por arriba del 90% de remoción de materia orgánica, sin embargo, el trabajo fue presentado como un “caso de estudio” y donde advierten que los resultados estuvieron sujetos a las condiciones de la cosecha de café de los productores y por lo tanto la generación del agua residual con el que alimentaron los HA estudiados.

Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la eficiencia de un HASSFH a escala piloto con tiempos de retención y con caudales de alimentación bien establecidos. Además, también se evaluó el tratamiento de las AR de despulpado del beneficiado húmedo del café, el cual tiene características particulares a aguas de lavado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del HA piloto

El HA piloto se estableció en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) Unidad Tapachula, Chiapas, México, ubicado entre las coordenadas geográficas 14° 53' 58" de latitud norte y 92° 17' 3.62" de longitud oeste. Con una altura de 170 msnm (GPSMAP 60CSx GARMIN). Para lo cual se diseñó, construyó y se operó un humedal artificial de tipo subsuperficial con flujo horizontal aplicado al tratamiento de las AR de despulpado del beneficiado húmedo del café bajo dos TRH. El periodo de operación comprendido fue de Agosto de 2011 a Enero de 2012. Los análisis de las muestras se procesaron en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental y Agroecología de esta Unidad.

Diseño y construcción del HA

Con el fin de probar la eficiencia de remoción de la materia orgánica de las AR de despulpado del beneficiado húmedo del café, en el mes de septiembre de 2011 se diseñó y se construyó un HASSFH (figura 5) con las siguientes características: un contenedor de madera de 1.4m² (0.70m x 2 m) de superficie y profundidad de 0.40 m con una abertura de la base hacia la altura de 1m, impermeabilizado con geomembrana de 1mm de espesor para retener los lixiviados, sobre la cual se colocó un medio poroso de: 0.10 m de arena, 0.20 m de grava de ¾ y 0.10 m de arena, con una pendiente del 1% hacia el efluente. En la parte media, se colocaron 6 puertos de muestreo con tubería de

PVC de 2" de diámetro previamente perforada (5mm de diámetro) a una profundidad de 0.4 m separados entre sí (0.60 m de largo y 0.40 m de ancho). Una vez construido el humedal, se procedió a llenar directamente el sistema con agua de la llave mediante bidones (22 L), obteniendo de esta manera un volumen total de trabajo de 200 L de capacidad.

Especie vegetal

La especie vegetal utilizada para este sistema fue *Saccharumofficinarum* (caña de azúcar). Se eligió esta especie ya que pueden adaptarse a condiciones de acidez y alcalinidad diferentes (Morales y Herrera, 2009; Díaz y Portocarreo, 2002). Los esquejes de la caña se cultivaron en ECOSUR, se sembraron en bolsas de polietileno con tierra y composta (proveniente de la pulpa de café) a una proporción del 50% respectivamente, una vez que las plantas alcanzaron la altura adecuada (18 – 26 cm) se implantaron en el humedal con una densidad de plantas de 4 brotes/m² a una distancia entre cada brote de 40 cm de largo y 30 cm de ancho.

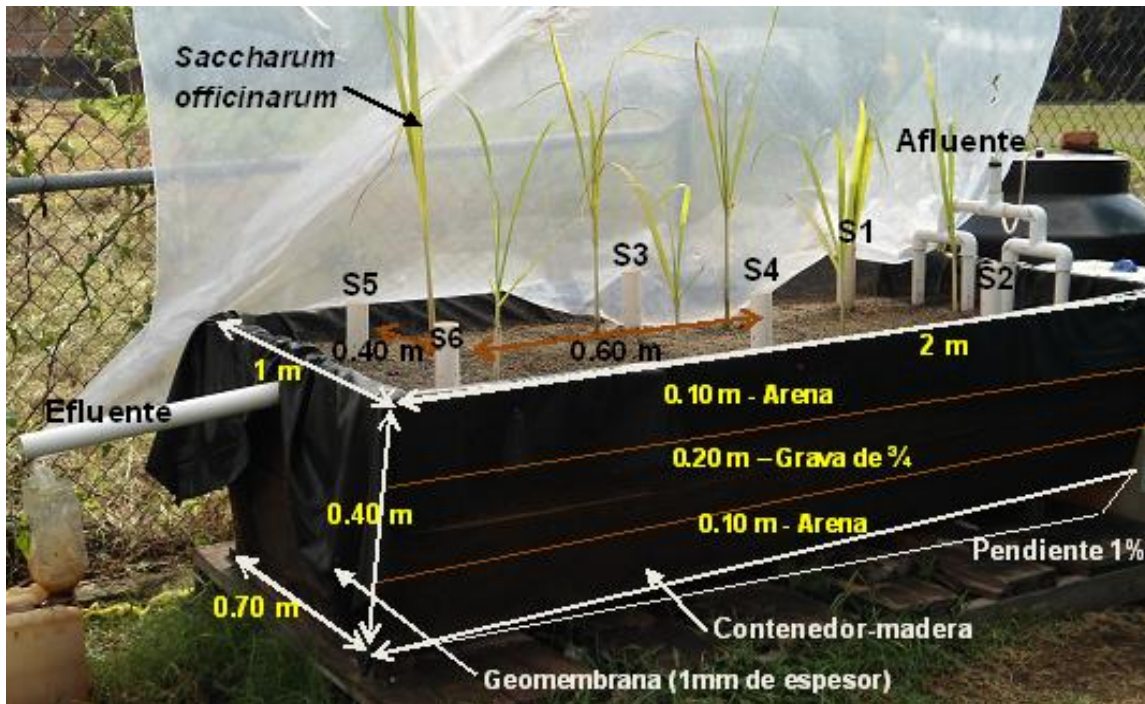


Figura 5. Diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Caudal y tiempos de retención hidráulica

Una de las variables importantes es el caudal (Q), ya que a través de este se cuantifican consumos, la disponibilidad del recurso hídrico y se planifica la gestión necesaria. El caudal se define como el volumen de agua que pasa por una sección en un determinado tiempo (t), es decir: $Q = v/t$ (Londoño y Marín, 2009).

El flujo de alimentación al sistema para los dos tiempos de estudio fue continuo, se operó bajo 2 TRH, la primera de 6 días (33.33 L/día) con un tiempo de operación de 31 días y la segunda de 12 días (16.66 L/día) con 37 días de operación. Estos flujos se alimentaron en el afluente del humedal con tubería de PVC controlando el flujo del mismo con una bomba peristáltica (MINIPULS 3 – GILSON). Se consideró para esta investigación la época de

cosecha de café que comenzó en Octubre de 2011 terminando los últimos días del mes de enero de 2012.

Adaptación de la planta vegetal y lavado del soporte

Para el primer tiempo de retención hidráulica las plantas vegetales fueron sembradas en el mes de septiembre de 2011 dejando las plantas sembradas en el humedal un mínimo de 6 días antes de ser alimentado, esto con el fin de que crecieran y se adaptaran al medio de trabajo. En este mismo lapso de tiempo se llevó a cabo el lavado del sustrato con agua de la llave para eliminar las sales minerales presentes en la grava y la arena. Transcurrido este tiempo (6 días), el humedal fue alimentado con agua de despulpado del café.

Alimentación y operación del HA

El AR de despulpado del café utilizado para alimentar el sistema del primer TRH fue proporcionado por la finca “La Alianza” ubicada en el municipio de Cacahoatán, Chiapas, mientras que para alimentar el segundo TRH el AR lo proporcionó la finca “Hamburgo” ubicado en el municipio de Tapachula, Chiapas, estas dos fincas producen café de tipo arábica. En el arranque del sistema periódicamente (una vez por semana) se recolectaron bidones de almacenamiento (22 L) de AR de despulpado del café.

La operación del primer TRH comenzó en octubre de 2011 con un flujo de 33.33 L/día. Cabe mencionar que al término de este periodo de estudio las

plantas fueron extraídas y el sistema fue lavado con agua limpia de la llave durante 5 días, posteriormente en el mes de noviembre del mismo año fueron plantadas nuevas plantas de la misma especie. El inicio de operación del segundo TRH fue en el mismo mes de noviembre del mismo año con un flujo de 16.66 L/día concluyendo en el mes de enero de 2012.

Muestreo

Se ubicaron 5 puertos de muestreo: en el Afluente (A), Sitio uno (S1), Sitio dos (S2), Sitio tres (S3) y en el Efluente (E) (figura 6). Se recolectaron muestras en cada uno de los puertos para analizar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. La recolección de las muestras se llevó a cabo durante los dos tiempos de retención hidráulica. En el cuadro 3 se observa la frecuencia, el volumen y las condiciones de muestreo. El manejo de las muestras como recolección, preservación y almacenamiento se llevaron a cabo conforme a las normas oficiales mexicanas aplicadas para cada parámetro.

Cabe mencionar que en el tiempo de retención hidráulica de 12 días, la toma de muestras para los análisis químicos y microbiológicos se inició entre los 15 – 20 días después de haber iniciado la operación del sistema, esto se debió prácticamente por problemas técnicos y climatológicos que demoraron dichos análisis y que se ven reflejados en los resultados, mientras que para el de 6 días el muestreo para los análisis se inició en el arranque del sistema.

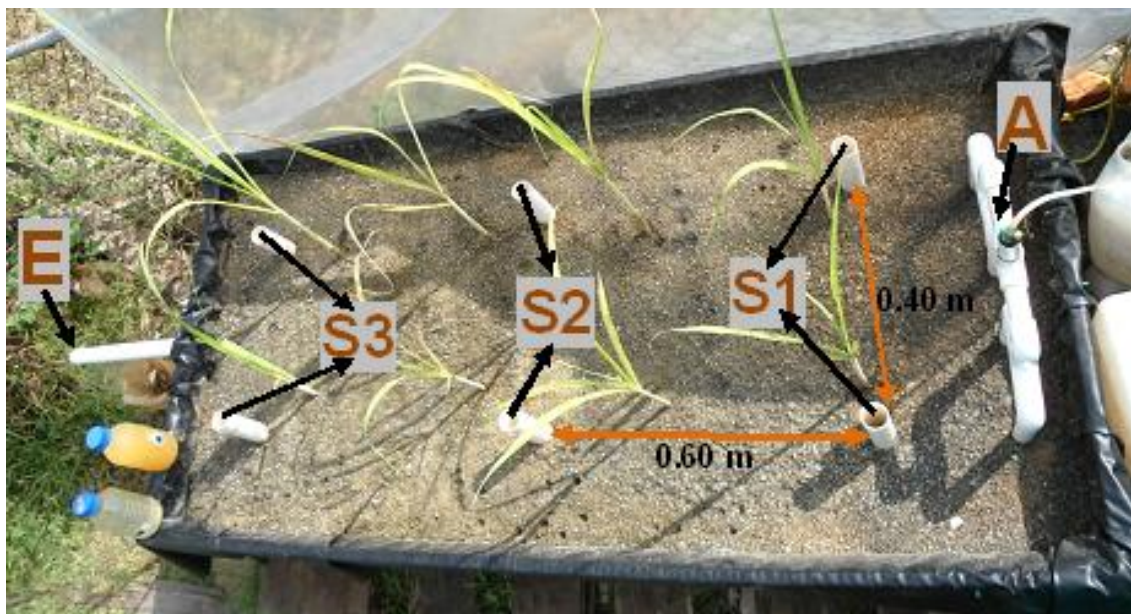


Figura 6. Sitios de muestreo dentro del HA.

Evaluación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Los parámetros físicos que se midieron son: Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura (T), Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (CE). El OD y T se determinaron *in situ* con un electrodo selectivo portátil (WaterQuality Checker-HORIBA-U10), el pH fue leído con un potenciómetro (Marc. OAKTON-pH 1100 series) y la CE con un potenciómetro Thermo Electro (Marc. ORION 4 STAR – pH.ConductivityBenchtop) estos dos últimos parámetros fueron determinados en Laboratorio.

Diariamente se realizaron las mediciones de OD, T, pH y CE tanto para el afluente como en el efluente de los dos períodos evaluados. Respecto a OD y T se hicieron lecturas en los diferentes sitios de muestreo (S1, S2 y S3) para ver el comportamiento de estos parámetros dentro del humedal.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron los siguientes análisis: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Nitrógeno Total por Kjeldahl (NTK) y Fósforo Total (PT), Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF). Estos análisis se realizaron únicamente a las muestras del punto del afluente y efluente.

La determinación de DQO, se llevó a cabo mediante el método de digestión a reflujo cerrado / espectrofotométricamente de acuerdo al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-AA-030-SCFI-2001).

La DBO_5 se determinó con forme al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-AA-028-SCFI-2001) por el método Winkler en un periodo de incubación de 5 días (método yodométrico).

El NTK se determinó mediante el método de Kjeldahl por destilación con forme al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-AA-026-SCFI-2010). La determinación del PT fue llevado a cabo por el método del cloruro estanoso con base al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-AA-029-SCFI-2001).

Los análisis microbiológicos de coliformes totales y coliformes fecales se determinaron mediante el método del Número Más Probable (NMP) de acuerdo al procedimiento establecido en la Norma Mexicana (NMX-AA-42-1987).

Cuadro 3. Frecuencia de los parámetros evaluados y condiciones de muestreo.

Parámetro	Frecuencia	Puerto	Volumen de muestra (mL)	Observaciones
OD T	Diario	A - S1 - S2 S3 - E	<i>In si tu</i>	El análisis es inmediato. Se introduce el electrodo previamente calibrado en el puerto de muestreo. Leer la medición directamente del instrumento.
pH CE	Diario	A – E	100	La medición es inmediata y no debe exceder de 2 h. Se introduce el electrodo previamente calibrado en la muestra. Leer la medición directamente del dispositivo.
DQO	Diario	A – E	>50	El análisis es inmediato, en caso contrario conservar en refrigeración a 4°C no excediendo más de 28 días.
DBO₅	2 veces por semana	A – E	100	El análisis es inmediato, en caso contrario conservar en refrigeración a 4°C no excediendo más de 24 h.
NTK	2 veces por semana	A – E	500	El análisis es inmediato, en caso contrario conservar en refrigeración a 4 ± 2°C no excediendo más de 30 días, en condiciones de obscuridad.
PT CT	2 veces por semana	A – E	>150	El análisis es inmediato, en caso contrario conservar en refrigeración a 4°C no excediendo más de 28 días.
CF	2 veces por semana	A - E	50	El análisis debe iniciar dentro de las 2 h próximas a la recolección y en ningún caso este lapso debe exceder de 6 h.

Eficiencia de remoción de la materia orgánica

La remoción se entiende como la capacidad del sistema para eliminar parte de la concentración de contaminantes que se encuentra en el agua

residual. La eficiencia de remoción se basa solo en las concentraciones del punto del afluente y efluente del sistema y es típicamente expresado como un porcentaje de la concentración del afluente, además esta eficiencia es independiente de cambios en la concentración del afluente, pero disminuye con el aumento del caudal (Mitchell y Mcnevin, 2001).

Para calcular la eficiencia de remoción del humedal artificial se utilizó la siguiente expresión matemática (Londoño y Marín, 2009):

$$\% R = \frac{[A]A - [A]E}{[A]A} * 100$$

Dónde:

$\%R$ = Porcentaje de remoción

$[A]A$ = Concentración del analito en el afluente

$[A]E$ = Concentración del analito en el efluente

100= Factor de conversión de porcentaje

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante estadístico descriptivos, se calculó: desviaciones estándares, promedios, máximos y mínimos y basados en estos se hacen diferencias entre TRH y porcentajes de remoción..

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta la diferencia entre las características del afluente y efluente del HA respecto a los dos TRH evaluados en cuanto a los parámetros físicos (OD, T, pH, CE), químicos (DQO, DBO₅, NTK, PT) y microbiológicos (CT, CF) y la comparación entre la eficiencia de remoción (%) promedio en ambostiempos. Para cada parámetro se presenta un gráfico donde se muestra el comportamiento de las concentraciones a través del tiempo.

Parámetros físicos

- Oxígeno Disuelto

La concentración del OD en el afluente para el TRH-6 se mantuvo en un promedio de 0.38 mg/L (± 0.17 mg/L) y para el TRH-12 fue de 0.36 mg/L (± 0.26 mg/L). Mientras que las lecturas del efluente en ambos TRH presentaron un aumento en la concentración con un promedio de 4.50 mg/L (± 0.70 mg/L). En la figura 7 se observa el comportamiento del OD a través del tiempo. El aumento considerable de OD registrado en el efluente, se atribuye a fenómeno físico de mezclado del O₂ atmosférico, que resulta ser más favorable en comparación del agua del afluente donde la concentración de la MO fue nueve veces más alta. Otro factor que contribuye al aumento del OD es la difusión del oxígeno a través de la planta vegetal y liberado en las raíces (Kuschket *al.*, 2003).

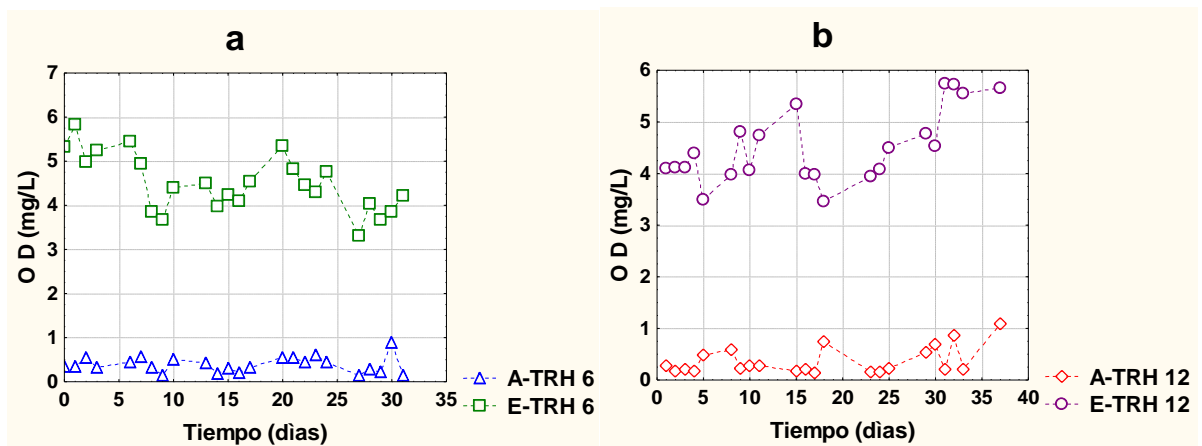


Figura 7. Comportamiento del OD en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6; b) TRH-12; A-TRH 6 = afluente del TRH de 6 días; E-TRH 6= efluente del TRH de 6 días; A-TRH 12= afluente del TRH de 12 días; E-TRH 12= efluente del TRH de 12 días (incluye para los demás gráficos).

La concentración promedio del OD en los diferentes puertos de muestreo, no presentó diferencias durante los dos TRH (figura 8). En el TRH-6 el S1 tuvo un promedio de 0.28 mg/L, mientras que para el S2 y S3 fue de 0.37 mg/L de oxígeno. Durante todo el periodo de estudio del TRH-12 el S1 tuvo un promedio de 0.7 mg/L, 0.84 mg/L para el S2 y 0.68 mg/L para el S3. Las bajas concentraciones de OD determinadas en los sitios S1, S2 y S3 es causado por las actividades microbianas en la degradación de la MO (Sunet *al.*, 2005). Sin embargo, otros mecanismos fisicoquímicos pueden estar relacionados a la baja concentración del OD mediante las demandas de oxígeno químico de agentes reductores tales como el hierro ferroso (Vymazal y Kröpfelová, 2008).

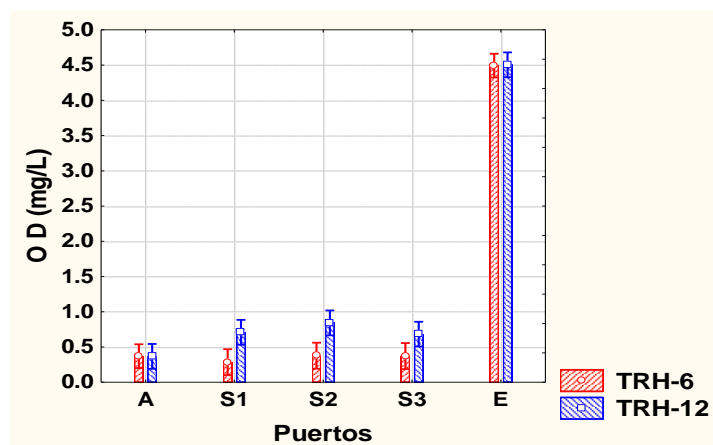


Figura 8. Promedio de la concentración del OD en los diferentes puertos de muestreo del humedal en los dos tiempos de retención.

- Temperatura

La temperatura del agua es uno de los estímulos cíclicos importantes en la eliminación de los contaminantes, por ejemplo la solubilidad del oxígeno en el agua depende mucho de la temperatura, a mayor temperatura menor es la solubilidad del oxígeno. Cuando la temperatura es más baja, los procesos de difusión de los contaminantes son más lentos (Akratos y Tsihrintzis, 2007). El valor promedio del afluente para ambos tiempos de retención (6 y 12 días) se mantuvo en 29 °C (± 2 °C), mientras que para el efluente de los dos TRH, el promedio se mantuvo entre 29 °C (± 2 °C) y 31 °C (± 1 °C) respectivamente (figura 9). Estos valores son atribuidos a temperaturas ambientales. Estos rangos de temperatura encontrados pueden favorecer a la eliminación de nutrientes, especialmente al proceso de eliminación del nitrógeno (mineralización, nitrificación y desnitrificación) en los humedales (Akratos y Tsihrintzis, 2007; Kadlec y Reddy, 2001).

En la figura 10, se compara la temperatura promedio en los diferentes puertos de muestreo. Para el TRH-6 la temperatura en el S1 fue de 27 °C y 28 °C para el S2 y S3. Durante el estudio del TRH-12 la temperatura de S1 fue de 28 °C y 27 °C para el S2 y S3.

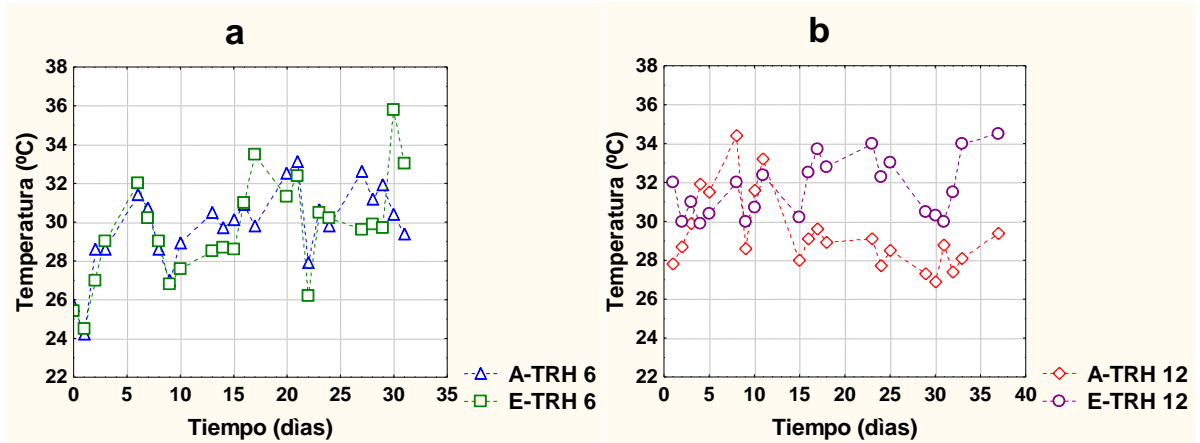


Figura 9. Comportamiento de la temperatura en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6; b) TRH-12

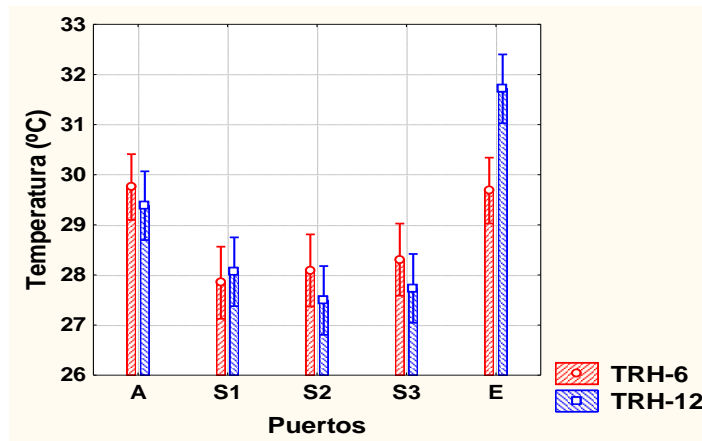


Figura 10. Promedio de la temperatura en los diferentes puertos de muestreo del humedal en los dos tiempos de retención.

- pH

Con relación al pH, se observó diferencias notables entre el agua del afluente y del efluente. En la figura 11 se pudo observar el comportamiento del pH a lo largo de los dos tiempos de operación. Los datos de pH del afluente para los dos tiempos de retención (TRH-6 y TRH-12) presentaron valores de 3.5 y 3.2 respectivamente. Para el efluente del TRH-6, al inicio de operación presentó un valor de 4.8 que a lo largo del estudio aumentó considerablemente a 6.4, mientras que para el inicio del TRH-12 el pH incrementó y tendió a estabilizarse a lo largo del estudio, presentando valores de 6.2 con un aumento al final de la operación de 7.2, esto sin la necesidad de agregar agentes neutralizantes. La estabilización del pH en humedales artificiales se ha explicado por la presencia de minerales como hierro y magnesio que forman parte del soporte, donde los iones de estos minerales funcionan como amortiguador en el medio (Vymazal y Kröpfelová, 2008). De esta manera, el agua del efluente es de mejor calidad, donde es posible la reutilización del mismo o descargarlos directamente a los cuerpos de agua de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas de descarga a ríos. Cabe mencionar que en estudios anteriores con otros sistemas de tratamientos para AR del café, ha recurrido a agentes neutralizantes como la sosa para alcalinizar estas aguas y poder efectuar los procesos biológicos de depuración.

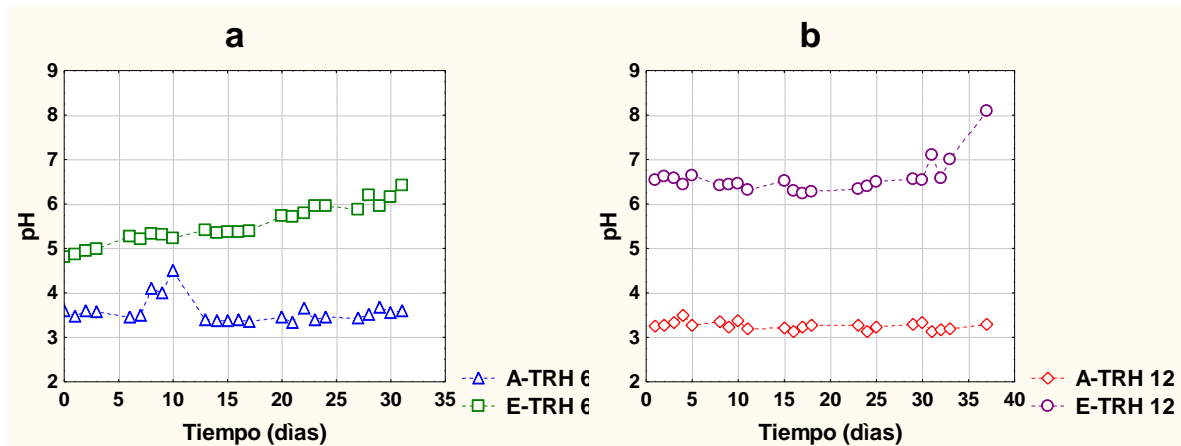


Figura 11. Comportamiento del pH en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6; THH-12

- Conductividad eléctrica

En cuanto a la conductividad eléctrica, para el TRH-6 los valores de alimentación presentaron variaciones entre 400 y 800 $\mu\text{s/cm}$, mientras que para el efluente de este mismo TRH el comportamiento tendió a disminuir registrándose lecturas al inicio de 1,700 $\mu\text{s/cm}$ hasta 1,000 $\mu\text{s/cm}$ al final del proceso. Para el TRH-12 la conductividad tuvo un comportamiento del afluente similar a la del efluente (figura 12). El incremento de la conductividad eléctrica está relacionado a la reducción del volumen hídrico y la posterior concentración de sales, producto de la transpiración de las plantas vegetales. Además, con la producción de una descarga de iones producto de la descomposición de las raíces y rizomas que emergen del soporte, como consecuencia de la actividad de las bacterias presentes en las mismas (Coleman *et al.*, 2001). Según Casellos-Osorio y García (2007), la conductividad eléctrica es mayor en el efluente que en el afluente, esto es debido probablemente a la evapotranspiración vegetal.

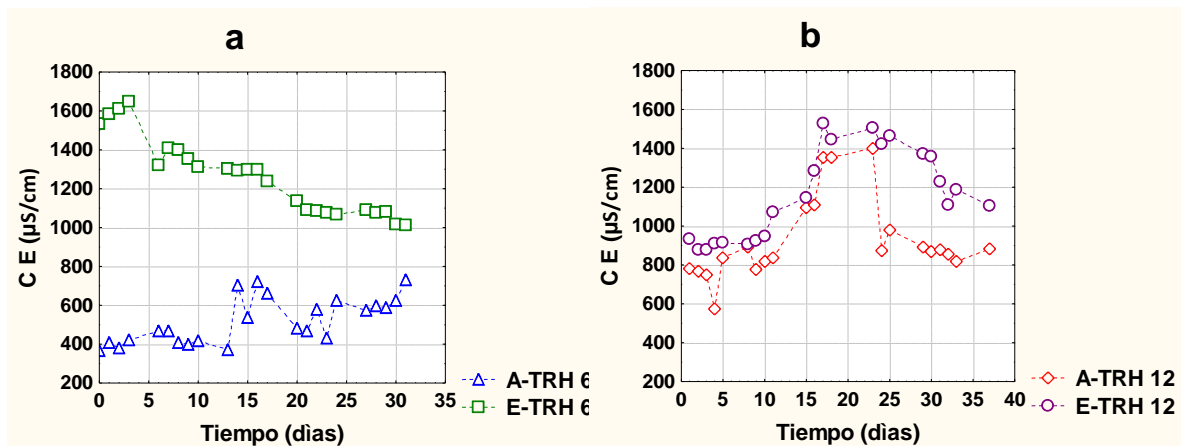


Figura 12. Comportamiento de la CE en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6; THH-12

Parámetros químicos

- Demanda química de oxígeno

En la figura 13 se observa el comportamiento de la concentración de la DQO del afluente y efluente durante los dos tiempos de retención. La concentración promedio del afluente del TRH-6 fue de 2,400 mg/L, mientras que para el efluente del mismo tiempo de retención fue de 800 mg/L, reduciéndose 3 veces la concentración del afluente, el cual se mantuvo estable durante todo el tiempo de estudio. Para el TRH-12 la concentración promedio del afluente fue de 6,600 mg/L observándose fluctuaciones en todo el tiempo de operación, mientras que para el efluente de este mismo tiempo de retención la DQO se redujo hasta de 11 veces, alcanzando una concentración de 600 mg/L que se mantuvo estable durante todo el periodo de estudio. Cabe mencionar también, que aun cuando la concentración del afluente fue mucho mayor en el tiempo de retención de 12 días y que además se presentaron

fluctuaciones, los resultados del efluente para ambos tiempos siempre se mantuvieron bajos y sin tendencia a aumentar, esto indica que el sistema funciona como un amortiguador que a través del tiempo se mantuvo constante.

La disminución de la MO es debido al suministro de oxígeno de las plantas, lo cual favorece el desarrollo de la comunidad microbiana responsable en gran parte del proceso de remoción de la DQO (Vymazal y Kröpfelová, 2009a). Asimismo, también se ha descrito que las plantas emergentes de los humedales incrementan tal remoción, porque dan lugar a velocidades bajas del agua, facilitando el proceso de filtración y sedimentación y permite un mayor desarrollo microbiano para la degradación de la MO (Vera *et al.*, 2010; Albuquerque *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2008). Además, otros aceptores de electrones inorgánicos, como nitrato, dióxido de manganeso, hidróxido férrico, sulfato y carbonato puede regular la descomposición de la MO (Kadlec y Reddy, 2001).

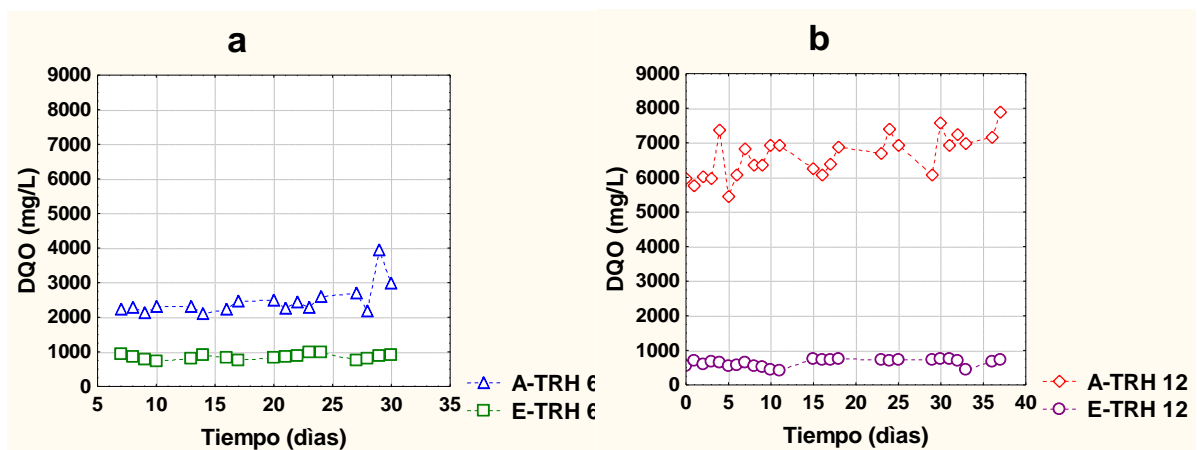


Figura 13. Comportamiento de la concentración de la DQO en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6; THH-12

- Demanda bioquímica de oxígeno

En la figura 14 se observa el comportamiento de la concentración de la DBO₅ del afluente y efluente durante los tiempos de operación. En cuanto a la concentración promedio de la DBO₅ para los dos tiempos de retención (6 y 12 días) fue de 1,200 y 1,100 mg/L respectivamente, presentando fluctuaciones durante todo el tiempo de estudio. Al final de la evaluación, para el TRH-6 la concentración del efluente inicial fue de 800 mg/L con una disminución al final del estudio de 700 mg/L, mientras que para el efluente del TRH-12, se encontró una concentración inicial de 900 mg/L que a través del tiempo tendió a disminuir alcanzando una concentración final de 500 mg/L, reduciéndose 2.2 veces la concentración del afluente. El oxígeno transmitido por la vegetación a la zona de las raíces y por la columna de agua durante la fotosíntesis es indispensable en la reducción de la DBO₅. Kadlec y Reddy (2001), mencionan que para la degradación de este parámetro se requiere del transporte de los constituyentes disueltos situados dentro de las biopelículas microscópicamente finas que cubra todas las superficies húmedas, o por la zona de las raíces de las plantas vegetales. Además, se considera que la sedimentación, la adsorción y el metabolismo microbiano llevado a cabo dentro del humedal mejora la remoción de la DBO₅ (Karathanasis *et al.*, 2003).

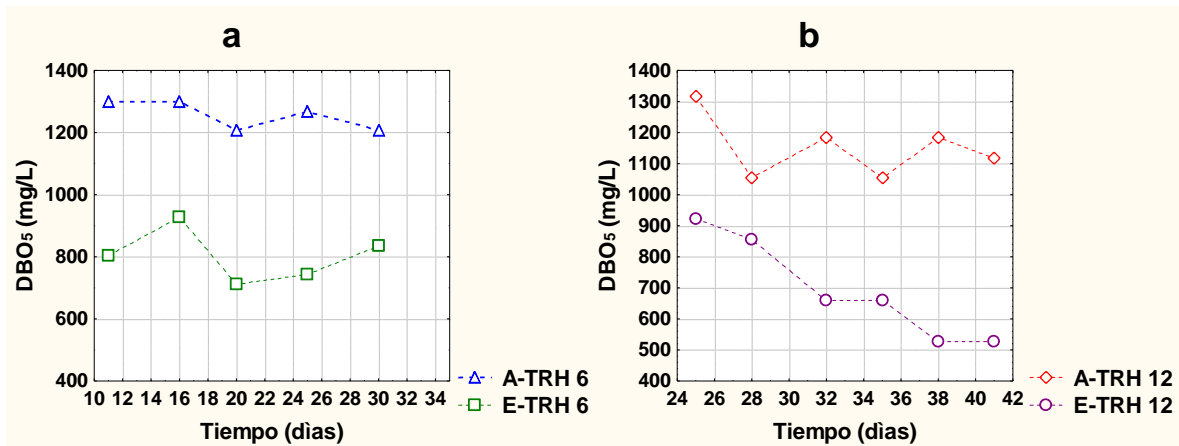


Figura 14. Comportamiento de la concentración de la DBO_5 en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención: a) TRH-6 - b) TRH-12.

- Nitrógeno Total por Kjeldahl

En la figura 15 se observa el comportamiento de la concentración del NTK en los dos tiempos de estudio. La concentración promedio del afluente del TRH-6 fue de 31 mg/L, donde se observaron fluctuaciones durante todo el tiempo de estudio, mientras que para el efluente la concentración promedio fue de 7 mg/L, reduciéndose 4 veces la concentración del afluente, el cual se mantuvo en un rango entre 5 – 11 mg/L durante todo el tiempo de operación. Para el TRH-12, la concentración promedio del afluente fue de 42 mg/L, mientras que para el efluente la concentración se redujo hasta de 7 veces, alcanzado concentraciones con un promedio de 6 mg/L, el cual se mantuvo constante en el todo el tiempo de evaluación.

Los procesos de descomposición y mineralización del nitrógeno orgánico llevados a cabo en el humedal por medio de los microorganismos, transforman el nitrógeno orgánico a nitritos (nitrificación) o nitratos (desnitrificación), estos procesos dependen en gran medida de la concentración de oxígeno presente

en el humedal (Vymazal, 2002). Los procesos de remoción del nitrógeno ocurren en diferentes zonas del soporte, el proceso para su comprensión puede dividirse en pasos, iniciando con la amonificación del amonio (NH_4^+), seguido por la nitrificación (NO_2^-) y desnitrificación (N_2) (Vymazal, 2010; Delgadillo *et al.*, 2010). Además, la remoción de este nutriente dentro del sistema aumenta con el tiempo, a medida que se va generando una mayor densidad de plantas dentro del mismo, de esta manera todo el ciclo del nitrógeno es afectado por la temperatura (Akratos y Tsihrintzis, 2007; Kadlec y Reddy, 2001). Selvas (2012), reportó que la disminución del nitrógeno orgánico en humedales artificiales de flujo horizontal se debe en gran parte al aumento del amonio (N-NH_4^+) y nitratos (N-NO_3^-) a través del tiempo, debido al proceso de nitrificación.

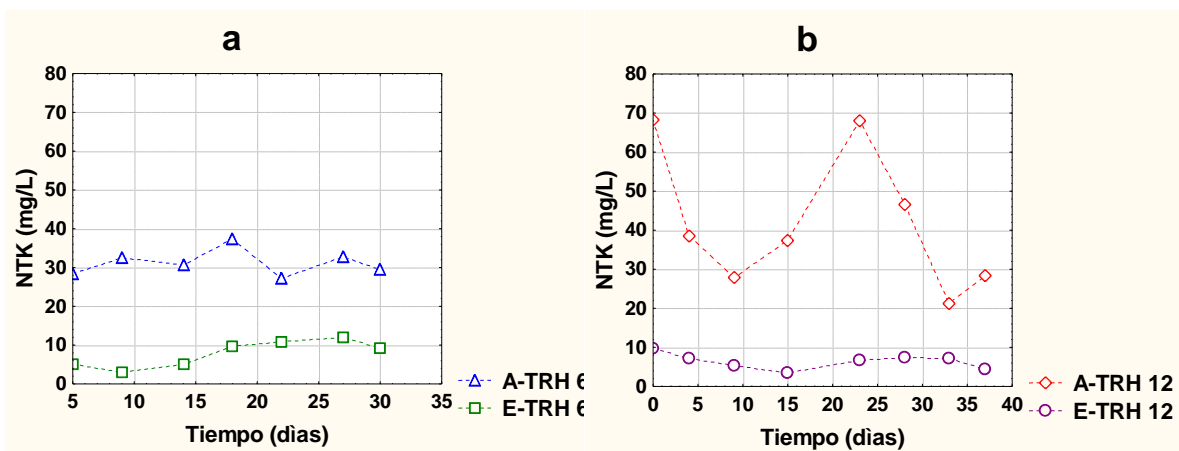


Figura 15. Comportamiento de la concentración del NTK en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención: a) TRH-6 - b) TRH-12.

- Fósforo Total

En la figura 16 se observa el comportamiento de la concentración del fósforo a través del tiempo. Respecto a la concentración del fósforo de afluente

del TRH-6 el promedio fue de 65 mg P/L que se redujo hasta de 6.5 veces alcanzando una concentración promedio del efluente de 10 mg P/L, el cual se mantuvo constante en todo el tiempo de estudio, mientras que para TRH-12 la concentración promedio del afluente fue de 168 mg P/L, obteniendo una concentración final del efluente de 4 mg P/L, que se redujo hasta 42 veces la concentración del afluente, el cual se mantuvo estable en todo el periodo de estudio. Se observa que, aun cuando los valores de la concentración del afluente fue mucho mayor en el TRH-12, los resultados del efluente para ambos tiempos de retención siempre se mantuvieron bajos, es decir el sistema se mantuvo constante a través del tiempo, funcionando como un amortiguador.

La remoción del fósforo en el humedal depende en gran parte de la etapa de crecimiento de las plantas vegetales, del soporte como medio filtrante por medio de la adsorción, precipitación, absorción de la vegetación y de los microorganismos presentes en los sedimentos (Madigan, 2004; Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001). La remoción en este tipo de soporte (arena y grava), tienen estrechamente relación con su composición y propiedades químicas tales como el pH, Ca, Al y Fe. Por otra parte las condiciones de aireación en el filtro de arena ayudan a mejorar la eliminación mediante la prevención de la reducción de Fe y la liberación de $PO_4\text{-P}$ (Vymazal, 2007; Vohla *et al.*, 2005).

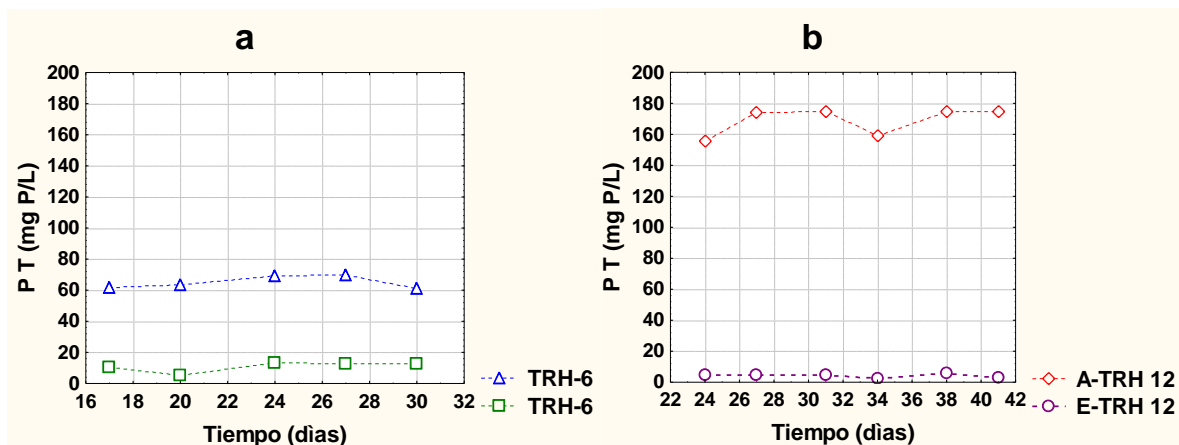


Figura 16. Comportamiento de la concentración del PT en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6 - b) TRH-12.

Parámetros microbiológicos

- Coliformes Totales

En la figura 17 se observa el comportamiento de los coliformes totales en ambos tiempos de estudio. Durante la evaluación del humedal el promedio de coliformes totales en el afluente del TRH-6 fue de 1.16×10^5 NMP, donde se observa fluctuaciones en todo el tiempo de operación, mientras que para el efluente de este mismo tiempo de retención fue de 2.51×10^3 NMP, reduciéndose 46 veces la concentración del afluente, el cual se mantuvo estable en todo el periodo de estudio, mientras que para el TRH-12 el promedio de coliformes totales en el afluente fue de 1.69×10^5 NMP, que se redujo hasta de 58 veces, alcanzando un promedio final de 2.89×10^3 , que se mantuvo constante a través del tiempo de estudio. La disminución del número de bacterias se debe en parte a que los humedales artificiales actúan como biofiltros excelentes a través de un complejo de factores fisicoquímicos y

biológicos que todos participan en la remoción del mismo (Molleda *et al.*, 2008; Sleytret *et al.*, 2007). Además, la reducción de las partículas suspendidas es uno de los factores principales para la eliminación de bacterias entéricas (coliformes totales y fecales) de la fase de agua, gobernado por la vegetación (Stenstrom y Carlander, 2001).

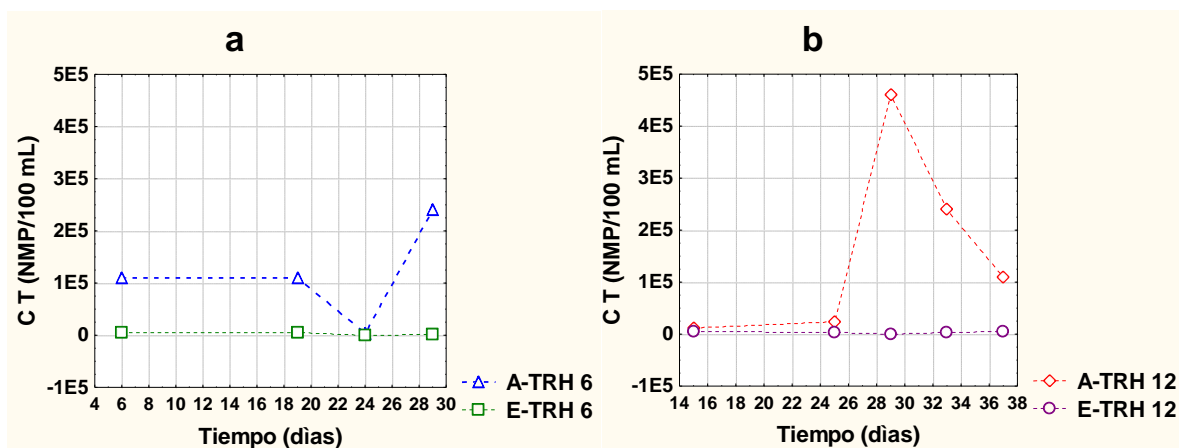


Figura 17. Comportamiento de los CT en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6 – b) TRH-12.

- Coliformes Fecales

En la figura 18 se observa el comportamiento de los coliformes fecales en ambos tiempos de estudio. El promedio de los coliformes fecales del afluente del TRH-6 fue de 2.09×10^3 NMP, observándose fluctuaciones en todo el tiempo de operación, mientras que para el efluente de este mismo tiempo de retención, el promedio fue de 4.83×10^2 NMP, reduciéndose 4 veces la concentración del afluente, mientras que para el TRH-12 el promedio de coliformes fecales en el afluente fue de 2.53×10^3 NMP, que se redujo hasta de 55 veces, alcanzando un promedio final de 4.60×10^1 NMP, que se mantuvo constante en todo el tiempo de estudio. La remoción de los coliformes fecales

se debe en parte al filtro de la grava de menor tamaño en el soporte que se genera en el biofilm o la biopelícula sustancial (Karathanasis, *et al.*, 2003). Kadlec y Wallace (2009), consideran que la remoción de los coliformes fecales en humedales de flujo horizontal subsuperficial es incrementada debido a largos tiempos nominales de retención hidráulica o bajas cargas hidráulicas, por materiales del soporte finos (arena); por temperaturas cálidas del agua y a bajas profundidades del soporte. También es debido a la vegetación emergente utilizada que son más eficaces en la eliminación de bacterias entéricas, fenómeno dado por la presencia de oxígeno en la columna de agua de la rizosfera y por la presencia de exudados de plantas con propiedades antimicrobianas (Delgadillo *et al.*, 2010; Reinoso *et al.*, 2008; Vymazal, 2005a)

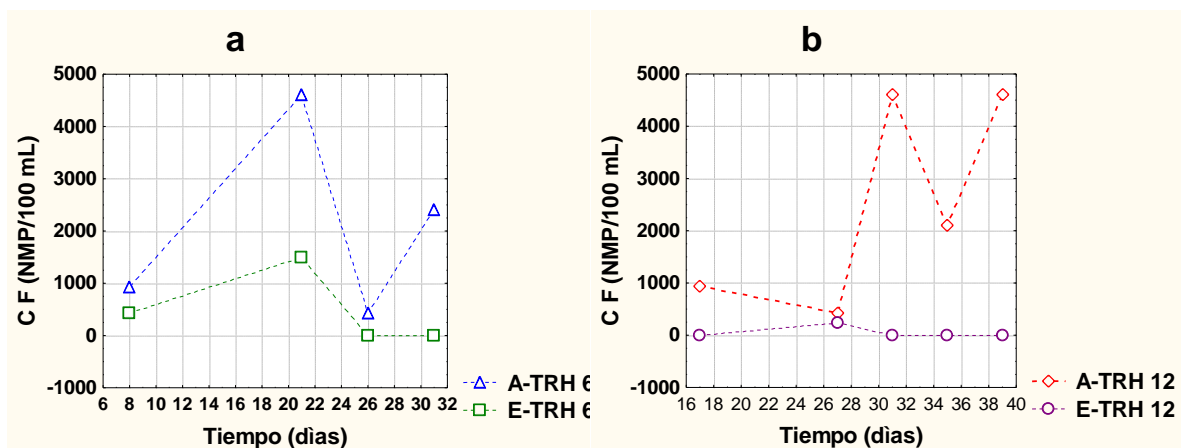


Figura 18. Comportamiento de los CF en el afluente y efluente en los dos tiempos de retención. a) TRH-6 – b) TRH-12.

Eficiencia de remoción de la materia orgánica

En la figura 19 se observa la comparación del porcentaje promedio de la eficiencia de remoción de la MO en términos de los parámetros analizados

respecto a los dos periodos de estudio. De acuerdo a las condiciones de diseño, construcción y operación del sistema, bajo los dos TRH y con base a los parámetros medidos se determinó que el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal tiene la capacidad de remover gran cantidad de MO, en el cual se encontró que el TRH-12 tiene mayor eficiencia al obtener mayor porcentaje de remoción, excepto para CT que fue más eficiente en el tiempo de retención de 6 días. El sistema tiene los porcentajes de remoción siguientes: DQO (90%), DBO₅ (40%), NT (83%), PT (97%), CT (88%) y CF (89%). Esto con un caudal en el efluente de 16.66 L/día. Estos resultados se encuentran en los rangos reportados por Moreno *et al.*, (2012), Ramírez *et al.*, (2009) y Orozco *et al.* (2005). Karathanasis *et al.*, (2003) demuestran que los humedales artificiales con vegetación muestran mayor eficiencia de remoción de la MO que los sistemas sin vegetación. Vymazal (2005a) menciona que los humedales con vegetación emergente presentan una alta remoción de coliformes totales y coliformes fecales, por lo general 95 – 99%, este alto porcentaje de remoción no significa la eliminación total de las bacterias, ya que los valores del efluente descrito anteriormente siguen siendo altos, estando fuera de la NOM que establece que el LMP es de 2 NMP/100mL. De acuerdo con los porcentajes obtenidos de coliformes totales y fecales (88 – 89% respectivamente) el uso de la caña de azúcar juega un papel importante en la reducción de estos parámetros y de los diferentes contaminantes presentes en el agua residual de despulpado del café.

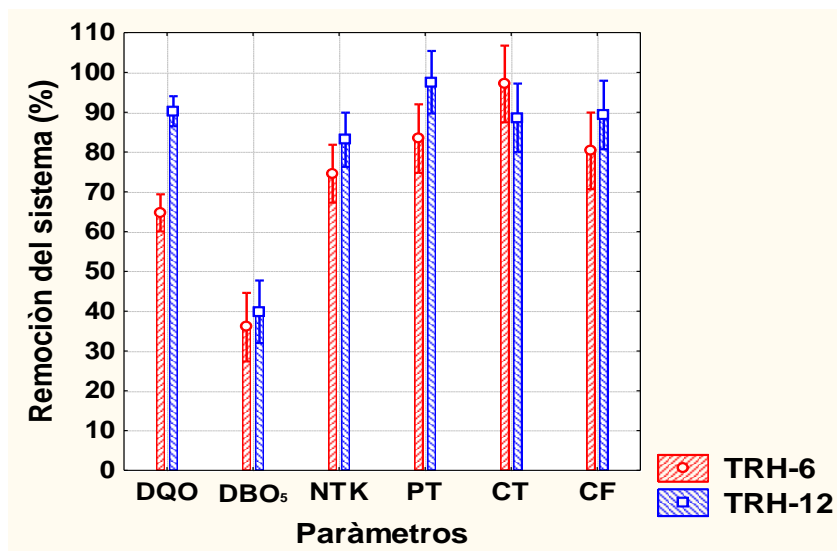


Figura 19. Porcentaje de remoción en términos de DQO, DBO₅, NT, PT, CT y CF promedio durante los dos tiempos de estudio.

Los mecanismos eficaces en la remoción de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) incluye la zona de raíces de oxidación y la absorción de la planta vegetal, por lo tanto, requieren de la interacción adecuada de agua residual con los medios de tratamiento (Dzakpasu *et al.*, 2011; Zemanová *et al.*, 2010; Kyambadde *et al.*, 2005). Además, el aumento del TRH se considera un factor primordial para obtener un pH óptimo para los procesos de eliminación de contaminantes (Vohla *et al.*, 2007), tal como pasó en este experimento donde el sistema obtuvo al final un pH entre 5.5 y 7.0. Así como también el soporte presente en el humedal es de gran importancia, debido a sus efectos sobre la eficiencia de remoción.

Luederitz *et al.*, (2001), muestran que los humedales de flujo horizontal subsuperficial, pueden eliminar más del 90% de la materia orgánica y del total de nitrógeno y fósforo, si hay un paso de pretratamiento eficaz, y si el área de tratamiento específico es suficientemente grande. Mencionan también que este

tipo de sistemas tienen una ventaja en la remoción a largo plazo del fósforo, ya que está relacionado al alto grado de sustancias orgánicas presentes en el medio.

El alto porcentaje de remoción del fósforo obtenido en el sistema (97%), el 90% del total de la remoción es debida a procesos de adsorción que ocurre en el medio de soporte y el 10% restante, se debe a las plantas y a los microorganismos como lo considera Luna y Ramírez (2004).

Los porcentajes de remoción obtenidos en la evaluación del sistema bajo el TRH-12 son mucho mayores a comparación de otros sistemas que se han empleado en el tratamiento de los desechos del café, sobre todo los sistemas de digestión anaerobia, por ejemplo: Calzada *et al.*, (1984), mediante reactores de espuma de poliuretano obtuvieron 57-71 % de remoción de materia orgánica con TRH de 2 días; Bello-Mendoza y Castillo (1988), con la aplicación de un reactor piloto UASB-Filtro, obtuvieron un porcentaje de remoción de carga orgánica del 77% y Chanakya *et al.*, (1998) empleando un reactor de lecho de biomasa inmovilizada obtuvieron un porcentaje de remoción del 85%.

En términos generales el agua de despulpado del beneficio húmedo del café que se descarga hacia el efluente del humedal es de mejor calidad, donde parámetros como pH, nitrógeno total y fósforo total están dentro de los LMP establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas residuales de descarga a ríos.

Con los resultados obtenidos en este proyecto, se tiene la perspectiva que la aplicación de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales de

despulpado de café, mediante un modelo en serie de humedales y con un TRH de 12 días podría resolver el problema de las descargas para pequeños productores de café de la región del Soconusco, Chiapas. Para grandes productores es muy difícil la aplicación de dicho sistema debido a que los desechos arrojados son mucho mayores ($>7,000$ L/d) que un pequeño productor ($< 2,000$ L/d) en el cual se requiere de un terreno extenso para su construcción, además, los terrenos de la región en la mayoría de los beneficios son accidentados lo que dificulta el establecimiento de los sistemas.

CONCLUSIONES

Se diseñó y se construyó satisfactoriamente el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas residuales de despulpado del beneficiado húmedo del café. El humedal experimental resultó ser altamente eficiente en la eliminación de los contaminantes presentes en este tipo de agua residual. Se evaluaron dos tiempos de retención hidráulica de 6 y 12 días, dando resultado que el tiempo de retención de 12 días fue el más eficiente en cuanto a la remoción de la carga orgánica en términos de DQO (90%), DBO (40%), NT (83%), PT (97%), CT (76%) y CF (89%).

La aplicación de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal influye sobre parámetros ambientales como pH y Temperatura amortiguando la calidad del efluente final. Siendo un sistema eficiente para la remoción de la materia orgánica, obteniendo un porcentaje de remoción arriba del 50%.

El agua de despulpado del café descargado en el efluente del humedal cumple con los LMP en cuanto a pH, NT y PT estipulados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas residuales de descarga a ríos.

La *Saccharum officinarum* (caña de azúcar) es una especie que se adapta fácilmente a las aguas residuales de despulpado del café, así como a las condiciones ambientales en las zonas cafetaleras. Además, está descrito que los humedales de flujo horizontal con macrófitas emergentes presentan una alta remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal son una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales de despulpado del

café, ya que son tecnologías simples de operar, con baja producción de lodos y sin consumo energético. No requieren de la adición de reactivos químicos y de energía para airear el agua o recircularla. La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple y asequible, su mantenimiento es relativamente fácil y económico.

RECOMENDACIONES

Con la presente investigación se pudo demostrar altas eficiencias de remoción con estos tipos de sistema, sin embargo, es necesario realizar estudios que permitan resolver dos aspectos principales:

Por una parte, es necesario hacer estudios relacionados sobre el comportamiento del pH de las aguas residuales de despulpado del café dentro del humedal artificial, ver que procesos intervienen en la alcalinidad de esta agua, ya que el sistema funciona como amortiguador en el medio que lleva al pH a la neutralidad sin la necesidad de agregar agentes neutralizantes. Por la otra parte, está en resolver las cuestiones técnicas, la optimización del sistema, implementar un modelo de humedales artificiales en serie o la combinación con algún otro tipo de tratamiento (sistema híbrido), además de estudiar las comunidades microbianas que participan en la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual del café.

Se recomienda aplicar este tipo de tecnologías en los beneficios de pequeños productores de café de la región del Soconusco, Chiapas, debido a que generan poca cantidad de aguas residuales, facilitando su construcción y operación.

Establecer una estrategia conjunta entre los diversos beneficios de café para estimular y motivar programas que faciliten la aplicación de los humedales artificiales para el tratamiento de sus desechos.

Se tiene la perspectiva que la implementación de los humedales artificiales (sobre todo los de tipo subsuperficial) con aguas residuales industriales, minerales, así como también lixiviados de los rellenos sanitarios pueden ser muy bien aplicados en la Comarca Lagunera como una buena alternativa de saneamiento, ya que está descrito que estos sistemas son diseñados para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, aportando grandes beneficios.

LITERATURA CITADA

Akratos, C., V. Tsihrintzis. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Vol. 02, No. 09: pp.173–191.

Albuquerque, A., M. Arendacz, M. Gajewska, H. Obarska-Pempkowiak, P. Randerson and P. Kowalik. 2009. Removal of organic matter and nitrogen in a horizontal subsurface flow (HSSF) constructed wetland under transient loads. *Water Science & Technology-WST*, Vol. 60, No. 07: pp. 1677-1682.

Álvarez, J., H. Smeltekop, C. Nicanor, M.L. Murguia. 2011. Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del prebeneficiado de café (*Coffea arabica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the SelvaAndina Research Society*, Vol. 2, No. 01: pp. 34-42.

Arias, C.A., H. Brix. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Vol. 13: pp. 17-24.

Arias, S., F. Betancur, G. Gómez, J. Salazar, M. Hernández. 2010. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico. Colombia*, Vol. 74: pp. 12 – 22.

Arroyave, A.G. 2010. Tesis Maestría. Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de

patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales.

Bello, R.M. 2002. Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café. Reflexiones y alternativas para los cafecultivos. Aachen, Shaker-Verlag. Alemania. pp. 312.

Bello, R.M., M.F. Castillo. 1998, Start-up of an anaerobic hybrid (USAB=filter) reactor treating wastewater from a coffee processing plant, *Anaerobe*, 4(5): 219–225.

Benhua, G., S. Zhiwen, L. Jie, H. Xiaoyuan. 2006. Effects of different substrates on phosphorus removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands. (Institute of Environment & Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033) *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 01.

Brix, H. 1994. Use of constructed wetland in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. *Water Sciences Technology*, Vol. 40, No. 03.

By Jan, C.E., C.C. Ken. 2002. Limit environmental damage by basic knowledge of coffee waste waters. "Improvement of coffee quality and sustainability of coffee production in Vietnam". GTZ – PPP Project, pp. 1-4.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2010. Statistics on Water in México. Edition 2010.
- Calzada, J.F., M.C. de Arriola, H.O. Castaneda, J.E. Godoy, C. Rolz. 1984. Methane from coffee pulp juice: Experiments using polyurethane foam reactors, *BiotechnolLett.* Vol. 6, No. 6: pp. 385–388.
- Caselles-Osorio, A., J. Garcia. 2007. Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 146: pp. 55-63
- Chanakya, H.N., A.K. Srivastava, A.K., A. Amita. 1998. High rate biomethanation using digested biomass as bacterial support, *CurrSci*, 74: 77–81.
- Chanakya, H.N., A.P. De Alwis. 2004. Environmental issues and management in primary coffee processing. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 82, No. 04: pp. 291–300.
- Chen, H. 2011. Surface-Flow Constructed Treatment Wetlands for Pollutant Removal: Applications and Perspectives. *Wetlands*. Vol. 31: pp. 805–814.
- Cheng, B., C.W. Hu, Y.J. Zhao. 2011. Effects of plants development and pollutant loading on performance of vertical subsurface flow

constructed wetlands. Int. J. Environ. Sci. Tech. Vol. 08, no. 01: pp. 177-186.

Coleman, J. K. Hench, K. Garbutt, A. Sexstone, G. Bissonnette, J. Skousen. 2001. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. Department of Biology, West Virginia University, Morgantown. 128: pp. 283-295.

Debing, J., S. Baoqing, Z. Hong, J. Hong. 2010. Chemical oxygen demand, nitrogen and phosphorus removal by subsurface wetlands with Phragmites vegetation in different models. Eng. LifeSci., Vol. 10, No. 02: pp. 177–183.

Delgadillo, O., A. Camacho, L.F. Pérez, M. Andrade. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba – Bolivia. ISBN: 978-99954-766-2-5.

Díaz, L.M., Montejo, E.R. Portocarrero. 2002. Tesis Licenciatura. Manual de Producción de Caña de Azúcar (*Saccharumofficinarum*L.). Universidad ZAMORANO, Honduras, pp. 5.

Dzakpasu, M., O. Hofmann, M. Scholz, R. Harrington, S. Jordan, V. McCarthy. 2011. Nitrogen removal in an integrated constructed wetland treating domestic wastewater. Journal of Environmental Science and Health. Vol. 46: pp. 742–750.

Fenoglio, F.E. 2003. Transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas,

mediciones redox y de oxígeno disuelto. Tesis de Maestría. Ciencias Químicas. UNAM. México, D.F. México.

Gaboutloeloe, G., S. Chen, M. Barber, C. Stöckle. 2009. Combinations of Horizontal and Vertical Flow Constructed Wetlands to Improve Nitrogen Removal. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 09: pp. 279–286.

Gathuo, B. 1995. Anaerobic treatment of coffee wastes in Kenya, PhDthesis, Helsinki University of Technology.

García, J., D. Rousseau, J. Morató, E. Lesage, V. Matamoros, J. Mayona. 2010. Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Environmental Science and Technology*. Vol 40: pp. 561–661

García, J.S., A.H. Corzo. 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Giácoman, G.V., T.G. Tapia, M.C. Ponce. 2010. Tecnología Experimental. Humedales Artificiales. *Revista de Divulgación y Difusión del fondo Mixto Conacy*. Vol.02, No. 05: pp. 6-11.

Guido-Zárate, A., C. Durán de Bezúa. 2008. Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 23, No. 01: pp. 15-22.

- Haddis, A., R. Devi. 2008. Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152: pp. 259–262.
- Hernández, J.G. Hidalgo. 2000. Evaluación de tres metodologías para reducir los niveles de contaminantes en efluentes de tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento del café en costa rica. Trabajo de Graduación. Universidad EARTH. Guácimo, Costa Rica, Vol. 85.
- Jin, G., T.R Kelley. 2007. Characterization of microbial communities in a pilot-scale constructed wetland using PLFA and PCR-DGGE analyses. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, Vol. 42: pp. 1639–1647.
- Kaasik, A. 2006. Tesis Maestría. Phosphorous removal mechanism in hydrated oil-shale ash. University of Tartu. Institute of Geology, pp. 3-36.
- Kadlec, R., K. Reddy. 2001. Temperature Effects in Treatment Wetlands. *Water Environment Research*. Vol. 73, No. 5: pp. 543-557.
- Kadlec, R., S. Wallace. 2009. *Treatment Wetlands. Second Edition*. Taylor and Francis Group, Boca Raton.
- Karathanasis, A.D., C.L. Potter, M.S. Coyne. 2003. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*. 20: pp. 157-169.

- Kröger, R., R.E. Lizotteb, F.D. Shieldsb, E. Usborne. 2012. Inundation Influences on Bioavailability of Phosphorus in Managed Wetland Sediments in Agricultural Landscapes. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 41, No. 2: pp. 604-614.
- Kusch, P., A. WieXner, U. Kappelmeyer, E. WeiXbrodt, M.K. astner, U. Stottmeister. 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*. 37: pp. 4236–4242.
- Kyambadde, J., F. Kansiime, G. Dalhammar. 2005. Nitrogen and phosphorus removal in substrate-free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in uganda. *Water, Air, and Soil pollution*. Vol. 165: pp. 37–59.
- Lara, G., J. Yeomans, O. Ulloa, K. Kojima. 2007. Efecto del nuevo sistema de tratamiento de residuos sépticos en el funcionamiento del humedal artificial del relleno sanitario de la Universidad Earth. *Tierra Tropical*, Vol. 03, No. 02: pp. 173-181.
- Li, J., Y. Wen, Q. Zhou, Z. Xingjie, X. Li, S. Yang, T. Lin. 2008. Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*. Vol. 99: pp. 4990–4996.
- Llagas, W.C., E.G. Gómez. 2006. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones. FIGMMG*, Vol. 15, No. 17, pp. 85-96.

- Londoño C, L.A, y V.C. Marín. 2009. Tesis Licenciatura. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Universidad tecnológica de Pereira - Facultad de Tecnología.
- López, G.P. 2000. Optimización de lechos de raíces para el tratamiento de aguas residuales municipales. En: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Luederitza, V., E. Eckert, M. Lange-Weber, A. Lange, R.M. Gersberg. 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Vol. 18, No. 2: pp. 157–171.
- Luna, P.V., C.H. Ramírez. 2004. Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 20, No. 1: pp. 31 – 38.
- Madigan, T.M., J.M. Martinko M., J. Parker. 2004. *Biología de los microorganismos*. Bueno del R. N. 10 ed. Person. i.e. 1096: pp: 104.
- Maheswaran, A. 1988. WHO Report on the treatment of coffee and oil palm wastes in PNG, Report to the Bureau of Water Resources, March.
- Maine, M.A., N. Suñe, H. Hadad, G. Sánchez, C. Bonetto. 2007. Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment

according to vegetation dominance. *Chemosphere*, 68: pp. 1105–1113.

Mejía, G.G. 2006. Tesis Maestría. Eficiencia de operación de un sistema piloto de tratamiento de aguas residuales de café en el Sureste de México. El Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas.

Mitchell, C., D. Mcnevin. 2001. Alternative analysis of bod removal in subsurface flow constructed wetlands employing monod kinetics. *Wat. Res.* Vol. 35, No. 5: pp. 1295-1303.

Mohanpuria, P., V. Kumar, S.Y. Kumar. 2010. Tea Caffeine: Metabolism, Functions, and Reduction Strategies. *FoodSci. Biotechnol*, Vol. 19, Nº 2: pp. 275-287.

Molleda, P., I. Blanco, G. Ansola, E. De Luis. 2008. Removal of wastewater pathogen indicators in a constructed wetland in Leon, Spain. *Ecological Engineering*. Vol. 33: pp. 252–257.

Morales, Y.L., J.M. Herrera. 2009. Suplementación nutricional de veranera (*cratyliaargentea*) y caña de azúcar (*saccharumofficinarum*) a vacas productoras de leche. *Ciencia e Interculturalidad*. Vol. 4, No. 2: pp. 136.

Moreno, O.H.I., L.D. Herrera, G.G. Mejía, B.R. Mendoza. 2012. Tesis Licenciatura. Eficiencia de humedales artificiales aplicado al tratamiento de aguas residuales del beneficiado del café: Caso de estudio con pequeños productores. Centro de Biociencias-UNACH campus IV.

Nicomrat, D., W.A. Dick, O. H. Tuovinen. 2006. Assessment of the Microbial Community in a Constructed Wetland that Receives Acid Coal Mine Drainage. *Ecology*, Vol.51: pp. 83–89.

Norma Mexicana (NMX-AA-42-1987). Calidad del agua. Establece el procedimiento para la determinación del Número Más Probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *EscherichiaColi* presuntiva.

Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996). Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en las aguas y bienes nacionales. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996.

Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA-1994). Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación.

Norma oficial mexicana (NOM-AA-026-SCFI-2010). Análisis de agua. Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.

Norma oficial mexicana (NOM-AA-028-SCFI-2001). Análisis de agua. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.

Norma oficial mexicana (NOM-AA-029-SCFI-2001). Análisis de agua. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.

Norma oficial mexicana (NOM-AA-030-SCFI-2001). Análisis de agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Diario Oficial de la Federación.

Orozco, C., A. M. Cruz, M. A. Rodríguez, A. J. Pohlan. 2006. Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado de café. Higiene y Sanidad Ambiental, Vol. 6: pp. 190-196.

Orozco, C., H. Barrientos, A. Lopezlena, J. Cruz, C. Selvas, El. Osorio, Ed, Osorio, R. chaves, J. Miranda, J. Arellano, B. Giesseman. 2005. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del café: características químicas. Higiene y Sanidad Ambiental, Vol. 5: pp. 123 – 132.

Pérez-Peláez, N., M. Peña-Varón, J. Sanabria. 2011. Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos. Ingeniería y Competitividad. Vol.11, No. 02: pp. 83 – 92.

Pohlan, J. 2002. México y la cafecultura Chiapaneca-reflexiones y alternativas para los cafetocultores, 65-74. VerlagShaker, Aachen, Alemania. pp. 383.

- Pujol, R., L. Zamora, M. Sanarrusi, F. Bonilla. 2001. Estudio de impacto ambiental del cultivo y procesamiento del café. Programa de desarrollo urbano sostenible. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Ramírez, C.H.F., P.V. Luna, F.J. Arredondo. 2009. Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 8, No. 01: pp. 93-99.
- Reed, S.C. 1995. *Natural Systems for waste management and treatment*. 2da edición.
- Reinoso, R., T.L. Alexandra, E. Bécares. 2008. Efficiency of natural systems for removal of bacteria and pathogenic parasites from wastewater. *Science of the total environment*, Vol.395: pp. 80-86.
- Reyes-Luz, M., A. Guido-Zárate, M. Bernal-González, L. Ramírez-Burgos, R. Padrón-López, I. Salgado-Bernal, J. Genescá-Llongueras, C. Durán-de-Bazúa. 2011. Remoción de fósforo de aguas residuales en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. Vol. 02, No. 01: pp. 76-93.
- Romero, M.A., A.C Colín, E.S. Sánchez, L.H. Ortiz. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol. 25, No. 03: pp. 157-167.

- Scholz, M., L.H. Byoung. 2005. Constructed wetlands: a review, *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 62, N° 4: pp. 421-447.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2003. <http://www.sagarpa.gob.mx/dlg/chiapas/agricultura/perennes/cafe.html>
- Seidel, K. 1966. Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen. *Naturwissenschaften*, Vol. 53: p. 289-297.
- Selvas, V.W.I. 2012. Tesis Licenciatura. Comunidades microbianas asociadas al ciclo del nitrógeno en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales del café. Centro de Biociencias-UNACH campus IV.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2010. <http://infosiap.siap.gob.mx/index.php?idCat=107#>
- Sleytr, K., A. Tietz, G. Langergraber, R. Haberl. 2007. Investigation of bacterial removal during the filtration process in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. Vol. 380: pp. 173–180.
- Sokolov, M. 2002. Contaminación ambiental por las aguas residuales del procesamiento húmedo del café: prevención y tratamiento. Reflexiones y alternativas para los cafecultivos. Aachen, Shaker-Verlag. Alemania. pp.332.

- Stenstrom, T. A., A. Carlander. 2001. Occurrence and die-off of indicator organisms in the sediment in two constructed wetlands. *Water Science and Technology*. Vol. 44, No. 11/12: pp. 223-230.
- Sun, G. Y. Zhao, S. Allen. 2005. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*. Vol. 115, No. 2: pp. 189-197.
- Sundaravadivel, M., S. Vigneswaran. 2001. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Critical Reviews in *Environmental Science and Technology*, Vol. 31, N° 4: pp. 351 - 409.
- Tang, X., M. Wu, W. Yang, W. Yin, F. Jin, M. Ye, N. Currie, M. Scholz. 2012. Ecological Strategy for Eutrophication Control. *Water Air Soil Pollut*, 223: pp. 723–737.
- Vera, A., C. Andrade, E. Flores, M. Núñez, C. Cárdenas, E. Morales. 2010. Removal of nutrients and organic matter in a constructed wetland, in function of the development of the macrophyte *Typhadominguensis* Pers. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 33, No. 02: pp. 145 – 152.
- Vohla, C., R. Alas, K. Nurk, S. Baatz, Ü. Mander. 2007. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Science of the Total Environment*. 380: pp. 66–74.

- Vohla, C., E. Poldvere, A. Noorvee, V. Kuusemets, U. Mander. 2005. Alternative Filter Media for Phosphorous Removal in a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *Journal of Environmental Science and Health*, 40: pp. 1251–1264.
- Vymazal, J. L. Kröpfelová. 2008. La concentration of dissolved oxygen a good Indicator of processes in filtration beds of horizontal-flow constructed wetlands? In: J. Vymazal (ed.) *Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands*. pp. 311-317.
- Vymazal, J. 2001. Types of constructed wetlands for wastewater treatment: their potential for nutrient removal. In: Vymazal J, editor. *Transformations of nutrients in natural and constructed wetlands*. Leiden. The Netherlands: Backhuys Publishers; pp. 1-93.
- Vymazal, J. 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Engin.* Vol. 18: pp. 633-646.
- Vymazal, J. 2005a. Removal of Enteric Bacteria in Constructed Treatment Wetlands with Emergent Macrophytes: A Review. *Journal of Environmental Science and Health*, 40: pp. 1355–1367.
- Vymazal, J. 2005b. Horizontal sub-surface flow and hybrids constructed wetland systems wastewater treatment. *Ecological Engineering*, Vol. 25, No. 5: pp. 478-490.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380: pp. 48–65.

- Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35: pp. 1–17.
- Vymazal, J. 2010. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*. Vol. 02: pp. 530-549.
- Vymazal, J. 2011. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674: pp. 133–156.
- Vymazal, J., L. Kröpfelová. 2009a. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total Environment*, 407: pp. 3911-3922.
- Vymazal, J., L. Kröpfelová. 2009b. Removal of nitrogen in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review. *Wetlands*, vol. 29, No. 4: pp. 1114–1124.
- Xuan, Z., N.B. Chang, A. Daranpob, M. Wanielista. 2009. Initial Test of a Subsurface Constructed Wetland with Green Sorption Media for Nutrient Removal in On-site Wastewater Treatment Systems. *Water Qual Expo Health*, 01: pp. 159–169.
- Yuan, D.H., L.J. Jing, S.X. Gao, D.Q. Yin, L.S. Wang. 2005. Análisis de la eficiencia de remoción de fósforo en algunos sustratos utilizados en los sistemas de humedales construidos. . *HuanJingKeXue*. Vol. 26, No. 1: pp. 5-51.

Zemanová, K., T. Píček, J. Dušek, K. Edwards, H. Šantrůčková. 2010. Carbon, nitrogen and phosphorus transformations are related to age of a constructed wetland. *Water Air Soil Pollut.* Vol. 207: pp. 39-48.

Zou, J., X. Guo, Y. Han, J. Liu, H. Liang. 2012. Study of a Novel Vertical Flow Constructed Wetland System with Drop Aeration for Rural Wastewater Treatment. *Water Air Soil Pollut.* 223: pp. 889–900.

APÉNDICE

Cuadro 4. Valores de los parámetros físicos medidos en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 6 días.

Fecha	Tiempo (días)	OD (mg/L)		Temperatura (°C)		pH (unidades)		CE (μS/cm)	
		A	E	A	E	A	E	A	E
18-Oct-11	0	0.34	5.33	25.7	25.4	3.6	4.8	367	1534
19-Oct-11	1	0.35	5.83	24.2	24.5	3.48	4.87	408	1585
20-Oct-11	2	0.55	4.98	28.6	27	3.6	4.94	381	1611
21-Oct-11	3	0.33	5.24	28.6	29	3.57	4.99	420	1650
24-Oct-11	6	0.45	5.45	31.4	32	3.45	5.27	468	1321
25-Oct-11	7	0.56	4.94	30.7	30.2	3.5	5.2	468	1407
26-Oct-11	8	0.33	3.86	28.6	29	4.1	5.32	410	1397
27-Oct-11	9	0.14	3.67	27	26.8	4	5.31	400	1353
28-Oct-11	10	0.5	4.39	28.9	27.6	4.5	5.23	418	1310
31-Oct-11	13	0.42	4.49	30.5	28.5	3.4	5.4	370	1303
01-Nov-11	14	0.18	3.98	29.7	28.7	3.37	5.35	702	1295
02-Nov-11	15	0.3	4.23	30.1	28.6	3.38	5.37	536	1299
03-Nov-11	16	0.2	4.1	30.9	31	3.4	5.36	720	1297
04-Nov-11	17	0.32	4.55	29.8	33.5	3.35	5.38	660	1239
07-Nov-11	20	0.55	5.35	32.5	31.3	3.45	5.73	483	1134
08-Nov-11	21	0.55	4.83	33.1	32.4	3.33	5.72	467	1092
09-Nov-11	22	0.44	4.46	27.9	26.2	3.66	5.8	578	1086
10-Nov-11	23	0.6	4.29	30.6	30.5	3.4	5.95	429	1077
11-Nov-11	24	0.44	4.76	29.8	30.2	3.45	5.95	623	1066
14-Nov-11	27	0.15	3.31	32.6	29.6	3.44	5.88	574	1089
15-Nov-11	28	0.29	4.03	31.2	29.9	3.52	6.2	598	1077
16-Nov-11	29	0.22	3.67	31.9	29.7	3.67	5.95	586	1083
17-Nov-11	30	0.89	3.85	30.4	35.8	3.55	6.16	623	1016
18-Nov-11	31	0.15	4.22	29.4	33	3.6	6.42	730	1012
	MIN	0.14	3.31	24.2	24.5	3.33	4.8	367	1012
	MAX	0.89	5.83	33.1	35.8	4.5	6.42	730	1650
	PROM	0.3854	4.49208	29.75417	29.6	3.57375	5.52292	517.458	1263.88
	DESVEST	0.1796	0.65003	2.120496	2.66083	0.27155	0.44384	117.475	195.37

Cuadro 5. Valores de los parámetros físicos medidos en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 12 días.

Fecha	Tiempo (días)	OD (mg/L)		Temperatura (°C)		pH (unidades)		CE (µS/cm)	
		A	E	A	E	A	E	A	E
11-Dic-11	0								
12-Dic-11	1	0.28	4.1	27.8	32	3.25	6.55	782	932
13-Dic-11	2	0.17	4.12	28.7	30	3.28	6.63	769	879
14-Dic-11	3	0.21	4.12	29.9	31	3.34	6.59	749	877
15-Dic-11	4	0.18	4.4	31.9	29.9	3.5	6.44	574	908
16-Dic-11	5	0.48	3.5	31.5	30.4	3.28	6.65	835	917
19-Dic-11	8	0.59	3.98	34.4	32	3.35	6.41	890	907
20-Dic-11	9	0.22	4.81	28.6	30	3.24	6.43	775	924
21-Dic-11	10	0.27	4.06	31.6	30.7	3.37	6.45	816	948
22-Dic-11	11	0.28	4.74	33.2	32.4	3.2	6.32	836	1072
26-Dic-11	15	0.18	5.34	28	30.2	3.22	6.52	1096	1146
27-Dic-11	16	0.21	3.99	29.1	32.5	3.13	6.3	1107	1285
28-Dic-11	17	0.14	3.98	29.6	33.7	3.24	6.23	1352	1528
29-Dic-11	18	0.74	3.46	28.9	32.8	3.28	6.28	1354	1445
03-Ene-12	23	0.16	3.94	29.1	34	3.27	6.33	1400	1507
04-Ene-12	24	0.15	4.08	27.7	32.3	3.14	6.4	873	1421
05-Ene-12	25	0.22	4.5	28.5	33	3.23	6.5	980	1462
09-Ene-12	29	0.53	4.77	27.3	30.5	3.3	6.57	894	1372
10-Ene-12	30	0.7	4.53	26.9	30.3	3.34	6.55	868	1356
11-Ene-12	31	0.21	5.75	28.8	30	3.14	7.1	879	1230
12-Ene-12	32	0.86	5.72	27.4	31.5	3.18	6.58	857	1110
13-Ene-12	33	0.21	5.55	28.1	34	3.2	7	818	1185
17-Ene-12	37	1.09	5.65	29.4	34.5	3.3	8.1	881	1106
	MIN	0.14	3.46	26.9	29.9	3.13	6.23	574	877
	MAX	1.09	5.75	34.4	34.5	3.5	8.1	1400	1528
	PROM	0.3672727	4.504091	29.38182	31.713636	3.2627273	6.5877273	926.59091	1159.8636
	DESVEST	0.2691642	0.704865	1.972583	1.5081668	0.08664	0.3974075	211.00184	230.16398

Cuadro 6. Valores de OD y Temperatura medidos en los diferente puertos de muestreo del humedal artificial en el TRH de 6 días.

Fecha	Tiempo (días)	OD (mg/L)			Temperatura (°C)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
18-Oct-11	0						
24-Oct-11	6	0.13	0.14	0.17	27.5	27.6	27.7
25-Oct-11	7	0.23	0.38	0.4	27.3	27.3	28.1
26-Oct-11	8	0.21	0.25	0.34	26.3	26.7	26.6
27-Oct-11	9	0.2	0.25	0.3	26.1	26.1	25.8
28-Oct-11	10	0.19	0.16	0.18	26.8	26.8	26.2
31-Oct-11	13	0.2	0.39	0.23	26.9	27.4	27.3
01-Nov-11	14	0.19	0.22	0.14	28.4	28.9	29.5
02-Nov-11	15	0.16	0.37	0.26	27.6	28.1	28.4
03-Nov-11	16	0.13	0.52	0.38	27.4	27.2	27.1
04-Nov-11	17	0.11	0.13	0.45	29.2	29	29.4
07-Nov-11	20	0.42	0.2	0.12	28.6	29.2	29.8
08-Nov-11	21	0.39	0.15	0.19	29.8	30	30.2
09-Nov-11	22	0.25	0.2	0.16	27.1	27.4	27.1
10-Nov-11	23	0.22	0.81	0.82	28.4	28.7	28.9
11-Nov-11	24	0.39	0.72	0.44	28.5	28.8	29.4
14-Nov-11	27	0.35	0.36	0.67	27.9	28.2	28.6
15-Nov-11	28	0.37	0.54	0.55	28.2	28.5	29.8
16-Nov-11	29	0.36	0.45	0.61	28	28.3	28.7
17-Nov-11	30	0.72	1.11	0.38	29.1	29.1	28.8
18-Nov-11	31	0.46	0.18	0.63	27.8	28.5	28.7
	PROM	0.284	0.3765	0.371	27.845	28.09	28.305

Cuadro 7. Valores de OD y Temperatura medidos en los diferente puertos de muestreo del humedal artificial en el TRH de 12 días.

Fecha	Tiempo (días)	OD (mg/L)			Temperatura (°C)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
11-Dic-11	0						
12-Dic-11	1	1.18	0.69	0.36	27.5	26.7	26.9
13-Dic-11	2	0.5	0.72	0.2	28.5	28.4	28.3
14-Dic-11	3	1.05	1.4	0.41	27.8	27	27.1
15-Dic-11	4	0.29	0.92	0.25	30.2	29	29.4
16-Dic-11	5	1.27	1.79	0.7	29.1	27.9	27.9
19-Dic-11	8	0.74	1.16	0.11	28	28.4	29
20-Dic-11	9	1.41	0.25	1.65	28.9	28.9	29.8
21-Dic-11	10	1.26	1.05	0.83	27	26.9	27
22-Dic-11	11	1.4	0.97	0.86	27.3	27.2	27.4
26-Dic-11	15	0.32	1	0.45	28	28.1	29.8
27-Dic-11	16	0.21	0.9	1.31	28.1	27.6	27.5
28-Dic-11	17	0.32	0.71	1.52	28.8	27.9	28.7
29-Dic-11	18	0.63	0.77	0.97	28.7	28.3	28.1
03-Ene-12	23	0.2	0.85	0.45	28.4	27.9	27.8
04-Ene-12	24	0.04	0.65	0.44	29.8	27.4	27.1
05-Ene-12	25	0.23	0.72	1.12	27.7	27	28
09-Ene-12	29	0.35	0.93	0.55	26.4	25.1	25.3
10-Ene-12	30	0.61	0.99	0.18	26.9	26.2	26.2
11-Ene-12	31	0.29	0.53	0.93	28.8	27.5	27.3
12-Ene-12	32	0.52	0.96	0.38	27.2	27.1	27.2
13-Ene-12	33	1.04	0.3	0.72	27.1	27.1	27.1
17-Ene-12	37	1.73	0.28	0.61	27.2	27.2	27.2
	PROM	0.708636364	0.84272727	0.68181818	28.0636364	27.4909091	27.7318182

Cuadro 8. Concentración de parámetros químicos evaluados en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 6 días.

Fecha	Tiempo (días)	DQO (mg/L)		DBO5 (mg/L)		NTK (mg/L)		PT (mg/L)	
		A	E	A	E	A	E	A	E
18-Oct-11	0								
23-Oct-11	5					28.4	5.2		
25-Oct-11	7	2238.3	922						
26-Oct-11	8	2271.7	868.667						
27-Oct-11	9	2138.3	788.667			32.5	3		
28-Oct-11	10	2315.6	728.667						
29-Oct-11	11			1298.72	803.97				
31-Oct-11	13	2316.1	799.778						
01-Nov-11	14	2110.6	910.889			30.6	5.1		
02-Nov-11	15								
03-Nov-11	16	2227.2	826.444	1298.72	927.65				
04-Nov-11	17	2477.2	759.778					61.6	10.4
05-Nov-11	18					37.3	9.7		
07-Nov-11	20	2499.4	839.778	1205.8	711.2			63.6	5.4
08-Nov-11	21	2255	866.444						
09-Nov-11	22	2427.2	890.889			27.3	10.8		
10-Nov-11	23	2293.9	975.333						
11-Nov-11	24	2588.3	984.222					69.4	13.2
12-Nov-11	25			1267.8	742.12				
14-Nov-11	27	2707.2	755.333			32.85	11.94	69.8	12.4
15-Nov-11	28	2190.6	797.556						
16-Nov-11	29	3947.8	893.111						
17-Nov-11	30	2986.7	917.556	1205.95	834.89	29.49	9.33	61	12.8
	MIN	2110.6	728.667	1205.8	711.2	27.3	3	61	5.4
	MAX	3947.8	984.222	1298.72	927.65	37.3	11.94	69.8	13.2
	PROM	2470.1	854.418	1255.398	803.966	31.2057	7.86714	65.08	10.84
	DESVEST	441.43	76.0404	46.93737	84.6825	3.36542	3.39482	4.23934	3.22614

Cuadro 9. Concentración de parámetros químicos evaluados en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 12 días.

Fecha	Tiempo (días)	DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		NTK (mg/L)		PT (mg P/L)	
		A	E	A	E	A	E	A	E
11-Dic-11	0	5975.55	555.11			68.32	9.7		
12-Dic-11	1	5764.44	704						
13-Dic-11	2	6031.11	586.22						
14-Dic-11	3	5953.33	686.22						
15-Dic-11	4	7364.44	641.77			38.45	7.09		
16-Dic-11	5	5453.33	557.33						
17-Dic-11	6	6064.44	564						
18-Dic-11	7	6831.11	661.77						
19-Dic-11	8	6364.44	532.88						
20-Dic-11	9	6364.44	512.88			28	5.22		
21-Dic-11	10	6920	446.22						
22-Dic-11	11	6920	419.55						
26-Dic-11	15	6253.33	744			37.33	3.36		
27-Dic-11	16	6064.44	739.55						
28-Dic-11	17	6386.66	730.66						
29-Dic-11	18	6886.66	741.77						
03-Ene-12	23	6686.66	719.55			67.94	6.72		
04-Ene-12	24	7397.77	690.66					155.8	4.8
05-Ene-12	25	6920	732.88	1316.31	921.41				
07-Ene-12	27							174.2	4.6
08-Ene-12	28			1053.04	855.6	46.66	7.46		
09-Ene-12	29	6075.55	719.55						
10-Ene-12	30	7575.55	744						
11-Ene-12	31	6920	746.22					174.6	4.4
12-Ene-12	32	7242.22	690.66	1184.68	658.15				
13-Ene-12	33	6975.55	439.55			21.28	7.09	159	2.6
16-Ene-12	36	7164.44	675.11	1053.04	658.15				
17-Ene-12	37	7897.77	726.22			28.37	4.48		
18-Ene-12	38			1184.68	526.52			174.4	5.8
21-Ene-12	41			1118.86	526.52			174.4	2.8
	MIN	5453.33	419.55	1053.04	526.52	21.28	3.36	155.8	2.6
	MAX	7897.77	746.22	1316.31	921.41	68.32	9.7	174.6	5.8
	PROM	6632.8165	642.6281	1151.768	691.0583	42.04375	6.39	168.733	4.16667
	DESVEST	617.20723	105.7707	99.81768	165.1953	17.8599	1.978015	8.8378	1.23558

Cuadro 10. Valores de los parámetros microbiológicos evaluados en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 6 días.

Fecha	Tiempo (días)	CT (NMP/100 mL)		CF(NMP/100 mL)	
		A	E	A	E
18-Oct-11	0				
23-Oct-11	5				
24-Oct-11	6	1.10E+05	4.60E+03		
25-Oct-11	7				
26-Oct-11	8			9.30E+02	4.30E+02
27-Oct-11	9				
07-Nov-11	20	1.10E+05	4.60E+03		
08-Nov-11	21			4.60E+03	1.50E+03
09-Nov-11	22				
11-Nov-11	24	2.40E+03	7.00E+01		
12-Nov-11	25			4.30E+02	0.00E+00
14-Nov-11	27				
16-Nov-11	29	2.40E+05	7.50E+02		
17-Nov-11	30				
18-Nov-11	31			2.40E+03	0.00E+00
	MIN	2.40E+03	7.00E+01	4.30E+02	0.00E+00
	MAX	2.40E+05	4.60E+03	4.60E+03	1.50E+03
	PROM	1.16E+05	2.51E+03	2.09E+03	4.83E+02
	DESVEST	9.72E+04	2.43E+03	1.87E+03	7.08E+02

Cuadro 11. Valores de los parámetros microbiológicos evaluados en el afluente y efluente del humedal artificial en el TRH de 12 días.

Fecha	Tiempo (días)	CT (NMP/100 mL)		CF(NMP/100 mL)	
		A	E	A	E
11-Dic-11	0				
26-Dic-11	15	1.10E+04	4.60E+03		
27-Dic-11	16				
28-Dic-11	17			9.30E+02	0.00E+00
05-Ene-12	25	2.40E+04	2.40E+03		
07-Ene-12	27			4.30E+02	2.30E+02
08-Ene-12	28				
09-Ene-12	29	4.60E+05	4.30E+02		
10-Ene-12	30				
11-Ene-12	31			4.60E+03	0.00E+00
12-Ene-12	32				
13-Ene-12	33	2.40E+05	2.40E+03		
16-Ene-12	36			2.10E+03	0.00E+00
17-Ene-12	37	1.10E+05	4.60E+03		
19-Ene-12	39			4.60E+03	0.00E+00
	MIN	1.10E+04	4.30E+02	4.30E+02	0.00E+00
	MAX	4.60E+05	4.60E+03	4.60E+03	2.30E+02
	PROM	1.69E+05	2.89E+03	2.53E+03	4.60E+01
	DESVEST	1.87E+05	1.76E+03	1.98E+03	1.03E+02

Cuadro 12. Porcentaje de remoción del sistema en cuanto a los parámetros evaluados en los dos TRH.

	DQO (%)		DBO5 (%)		NTK (%)		PT (%)		CT (%)		CF (%)	
	TRH-6	TRH-12	TRH-6	TRH-12	TRH-6	TRH-12	TRH-6	TRH-12	TRH-6	TRH-12	TRH-6	TRH-12
	58.80864	90.777	38.0952	30.001	81.579	85.802	83.117	96.9191	95.82	58.182	53.76344	100
	61.76082	87.787	28.572	18.75	90.805	81.56	91.509	97.3594	95.82	90	67.3913	46.51
	63.11769	90.28	41.0257	44.445	83.206	81.357	80.98	97.48	97.08	99.907	100	100
	68.53167	88.473	41.464	37.5	74	90.999	82.235	98.3648	99.69	99	100	100
	65.46894	91.286	30.7691	55.556	60.274	90.109	79.016	96.6743		95.818		100
	56.84127	89.78		52.941	63.653	84.012		98.3945				
	62.89349	90.7			68.362	66.682						
	69.32945	90.312				84.209						
	66.40142	91.627										
	61.57674	91.941										
	63.29595	93.552										
	57.48123	93.937										
	61.97467	88.102										
	72.09932	87.805										
	63.59117	88.56										
	77.37686	89.229										
	69.27827	89.239										
		90.664										
		89.409										
		88.157										
		90.179										
		89.216										
		90.463										
		93.699										
		90.577										
		90.805										
PROM	64.69574	90.252	35.9852	39.865	74.554	83.091	83.371	97.532	97.1	88.581	80.28869	89.3