



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**“DEPURACIÓN DEL EFLUENTE DE UN RAFA EN HUMEDALES  
ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL  
UTILIZANDO DOS MEDIOS POROSOS”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA:**

**I.S.A. MONSERRAT ORTIZ AVILA**

**TUTORA ACADÉMICA:**

**DRA. MERCEDES LUCERO CHÁVEZ**

**TUTORES ADJUNTOS:**

**DRA. MARÍA DEL CARMEN JIMÉNEZ MOLEÓN**

**DR. MARIO ESPARZA SOTO**

**TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO**

**ENERO 2018**

## DEDICATORIA

A mi hijo **Máximo** por ser el motor principal de esta búsqueda por un futuro prometedor, por tu paciencia y tiempo prestado para la realización de mis estudios de posgrado. Te amo mi niño.

A mi esposo **Julio César** por su apoyo y comprensión, gracias por estar a mi lado.

A mi mamá **Josefina Ávila** por ser una mujer ejemplar, una madre amorosa, y siempre apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi papá **Jorge Ortiz** por su apoyo incondicional y su preocupación por la continuación de mi preparación como profesionista.

A mi hermanita **Itzetl** por todo el amor, apoyo y cariño brindado a pesar de la distancia.

Ustedes merecen esto y mucho más, gracias infinitas por su amor incondicional, son mi motivación y fuerza.

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutora la Dra. Mercedes Lucero Chávez, por sus enseñanzas, apoyo, paciencia y por permitirme realizar este proyecto de tesis.

A mi tutora adjunta la Dra. María del Carmen Jiménez Moleón, por su exigencia y enseñanzas a lo largo de la maestría.

A el Dr. Mario Esparza Soto por sus enseñanzas y recomendaciones para la realización de este trabajo de investigación.

A la Dra. Saraí Velázquez Peña por su tiempo, consejos y disposición, como profesora externa del comité evaluador.

A Brandon por su compromiso y constancia a lo largo de todo este proyecto, muchas gracias.

A mis compañeros y amigos, Sergio Ríos, César Anchante, Edgardo Medina, Francisco Lara, por su ayuda con el trabajo duro, por sus consejos y compañía en el laboratorio.

A Oscar y Elizabeth por su apoyo constante en el laboratorio de Calidad del Agua.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado para mis estudios de posgrado.

A los miembros del sínodo, por sus aportaciones, orientación y consejos para la culminación de esta tesis.

## NOTAS DE AUTOR

Los resultados de los análisis fisicoquímicos mostrados en esta tesis forman parte del proyecto **Humedales construidos utilizados como tratamiento secundario de un efluente de un RAFA (Industria chocolatera)** con la clave **4436/2017SF**. De este proyecto se derivan dos tesis, una de licenciatura y otra de maestría. En la primera se discuten los resultados obtenidos del humedal construido con sustrato simple (grava) y en la segunda se utilizan los resultados del sustrato simple (grava) y se incluyen los resultados del sustrato mixto (grava y vermiculita).

## RESUMEN

En México, sólo el 57 % de las aguas residuales generadas reciben algún tipo de tratamiento (CONAGUA, 2015), debido principalmente a los altos costos de infraestructura y mantenimiento.

El municipio de Toluca, Estado de México, tiene una importante actividad industrial, esta genera una gran cantidad de aguas residuales industriales, el tratamiento de estas aguas es insuficiente. En consecuencia, es necesaria la aplicación de sistemas de tratamiento que sean eficientes y económicamente viables.

Los humedales artificiales (HA) son una alternativa de tratamiento debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación, operación y mantenimiento. En el presente trabajo se evalúa el porcentaje de remoción de la materia orgánica y de los nutrientes de un tipo de agua residual industrial proveniente de una fábrica de chocolates de la región, esta agua residual ha sido previamente tratada en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).

Se diseñaron y construyeron dos Humedales Artificiales de flujo Horizontal Subsuperficial (HA-FHSS) para tratar el efluente de un RAFA, y así darle un tratamiento complementario al agua residual industrial. Además, se evaluó el medio poroso utilizado en cada humedal; en uno se usó grava y en otro una mezcla de grava con vermiculita. La vegetación utilizada en ambos humedales fue *Chlorophytum comosum* (10 especímenes en cada humedal).

Se analizaron los siguientes parámetros en el influente y efluente de los HA-FHSS: temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fosfatos, fósforo total, sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST).

Los resultados demostraron que los HA-FHSS son una opción factible y económica para la remoción de la materia orgánica residual, en términos de DQO total, el porcentaje de remoción para el HA-FHSS con el medio poroso simple (grava) fue de  $72.37 \pm 20.73\%$ , mientras que para el HA-FHSS con el medio poroso mixto (grava y vermiculita) fue de  $78.29 \pm 16.7\%$ , además de obtenerse eficiencias altas de remoción para nitratos  $68.95 \pm 23.6\%$  y

73.94  $\pm$ 16.04% para el HA-FHSS con sustrato simple y el HA-FHSS con medio poroso mixto, respectivamente. Respecto a la remoción de nitrógeno total HA-FHSS con el medio poroso mixto alcanzo una mayor eficiencia de remoción 39.2  $\pm$ 37.11%. Por el contrario, para el caso del fósforo total el HA-FHSS con el medio poroso simple fue el sistema que obtuvo la mayor eficiencia de remoción 26.9  $\pm$ 26.27%.

Aunque el medio poroso mixto (grava y vermiculita) presentó mejores eficiencias de remoción en la mayoría de los parámetros analizados, el análisis estadístico ANOVA, no arroja una diferencia significativa entre los medios porosos utilizados en los HA-FHSS.

La vegetación utilizada *Chlorophytum comosum* no es una planta comúnmente usada en los HA, pero demostró ser una especie capaz de resistir las condiciones adversas de crecimiento a la que fue sometida (agua residual industrial y medios porosos), por lo que se recomienda continuar investigando y aplicando esta especie como opción de vegetación para los humedales artificiales.

## ABSTRACT

In Mexico, only 57% of the wastewater generated receives some type of treatment (CONAGUA, 2015), mainly due to the excessive costs of infrastructure and maintenance.

The municipality of Toluca, State of Mexico, has an important industrial activity, this generates a large amount of industrial wastewater, and the treatment of these waters is insufficient. Consequently, it is necessary to apply treatment systems that are efficient and economically viable.

Artificial wetlands (HA) are an alternative treatment due to their high removal efficiency and their low cost of installation, operation and maintenance. In the present work the percentage of removal of organic matter and nutrients from a type of industrial wastewater from a chocolate factory in the region is evaluated, this wastewater has been previously treated in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB).

Two Horizontal Subsurface Flow Artificial Wetlands (HA-FHSS) were designed and constructed to treat the effluent of an UASB, and thus give a complementary treatment to industrial wastewater. In addition, the porous medium used in each wetland was evaluated; gravel was used in one and a mixture of gravel and vermiculite in another. The vegetation used in both wetlands was *Chlorophytum comosum* (10 specimens in each wetland).

The following parameters were analyzed in the influent and effluent of HA-FHSS: temperature, pH, alkalinity, electrical conductivity, turbidity, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand, nitrates, nitrogen ammonia, total nitrogen, phosphates, total phosphorus, total solids (TS) and total suspended solids (TSS).

The results showed that the HA-FHSS are a feasible and economical option for the removal of residual organic matter, in terms of total COD, the percentage of removal for it HA-FHSS with simple porous medium (gravel) was  $72.37 \pm 20.73\%$ , while for HA-FHSS with the mixed porous medium (gravel and vermiculite) was  $78.29 \pm 16.7\%$ , in addition to obtaining high removal efficiencies for nitrates  $68.95 \pm 23.6\%$  and  $73.94 \pm 16.04\%$  for HA-FHSS with simple substrate and HA-FHSS with mixed porous medium, respectively. Regarding the total nitrogen removal, HA-FHSS with the mixed porous medium achieved a higher removal

efficiency of  $39.2 \pm 37.11\%$ . On the contrary, for the case of total phosphorus, HA-FHSS with the simple porous medium was the system that obtained the highest removal efficiency  $26.9 \pm 26.27\%$ .

Although the mixed porous medium (gravel and vermiculite) showed better removal efficiencies in most of the parameters analyzed, the ANOVA statistical analysis does not show a significant difference between the porous media used in HA-FHSS.

The vegetation used *Chlorophytum comosum* is not a plant commonly used in HA, but it proved to be a species capable of resisting the adverse growth conditions to which it was subjected (industrial wastewater and porous media), so it is recommended to continue investigating and applying this species as a vegetation option for artificial wetlands.

## Índice

1.	Introducción.....	1
2.	Antecedentes .....	3
2.1	Tipos de humedales artificiales .....	3
2.2	Humedales Artificiales de flujo horizontal subsuperficial (HA-FHSS).....	4
2.3	Diseño y operación de humedales artificiales .....	7
2.3.1	Selección de vegetación .....	8
2.3.2	Selección del medio poroso .....	10
2.4	Sistemas combinados RAFA-HA.....	12
3.	Justificación contextual y científica.....	13
4.	Hipótesis .....	15
5.	Objetivo general y específicos.....	15
5.1.	Objetivo general.....	15
5.2.	Objetivos específicos .....	15
6.	Metodología .....	16
6.1	Caracterización fisicoquímica del efluente del RAFA .....	17
6.2	Diseño, construcción y montaje de los HA-FHSS.....	17
6.2.1	Diseño de los HA-FHSS .....	17
6.2.2	Construcción de los HA-FHSS .....	21
6.2.3	Montaje de los HA-FHSS .....	22
6.3	Monitoreo del influente y efluente de los HA-FHSS.....	27
6.4	Análisis químico elemental de los medios porosos al inicio y final de la etapa experimental .....	28
7	Resultados y discusiones.....	29
7.1	Caracterización fisicoquímica del efluente del RAFA .....	29
7.2	Resultados del monitoreo del influente y efluente de los HA-FHSS .....	30
7.2.1	Temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica y turbidez en el influente y los efluentes de los HA-FHSS .....	30
7.2.2	Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los HA-FHSS .....	37
7.2.3	Remoción de nutrientes .....	39
7.2.4	Análisis estadístico ANOVA .....	45
7.2.5	Comparación de los resultados obtenidos con las normas oficiales mexicanas vigentes .....	47
7.2.6	Análisis químico elemental de los medios porosos .....	49
8.	Conclusiones.....	59
9.	Recomendaciones a trabajos futuros .....	61



10. Referencias bibliográficas .....	62
11. Anexo.....	67

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial (HA-FHSS). Fuente: Estrada (2010).....	4
Figura 2. Vegetación utilizada en los HA-FHSS: <i>Chlorophytum comosum</i> .....	10
Figura 3. Medios porosos utilizados en el presente estudio. a) medio poroso simple: grava, b) medio poroso mixto: grava y vermiculita.....	11
Figura 4. Diagrama de bloques de la metodología del proyecto. ....	16
Figura 5. Humedales artificiales con los medios porosos. a) HA-FHSS con medio poroso simple: grava, b) HA-FHSS con medio poroso mixto: grava y vermiculita.....	21
Figura 6. Dispositivo de control de nivel de agua y válvula para vaciado del sistema.....	21
Figura 7. Ubicación geográfica de los HA-FHSS. Fuente: Google Earth.....	22
Figura 8. a) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) y sedimentador de lamelas. b) Efluente del sedimentador de lamelas, efluente utilizado en los HA-FHSS.....	22
Figura 9. Esquema general del proceso de tratamiento del agua residual de la industria chocolatera.....	23
Figura 10. Tamices utilizados para la selección de la grava.....	24
Figura 11. Vista superior y frontal de los HA-FHSS. ....	25
Figura 12. Fotografía de la ubicación de los componentes del sistema de tratamiento. 1) Tanque de almacenamiento, 2) Bomba peristáltica, 3) HA-FHSS, 4) Carpa protectora.....	26
Figura 13. Temperatura de operación para los HA-FHSS durante la etapa de investigación. .....	31
Figura 14. Variación del pH en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.....	32
Figura 15. Alcalinidad en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	33
Figura 16. Conductividad eléctrica en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	34
Figura 18. De izquierda a derecha: Influyente de los HA-FHSS, efluente del HA-FHSS con medio poroso simple: grava, efluente del HA-FHSS con medio poroso mixto: grava y vermiculita, a) Día de operación: 72, b) Día de operación: 135, c) Día de operación: 222. ....	36
Figura 19. Demanda química de oxígeno (DQO) en el influente y los efluentes de los HA- FHSS. ....	38
Figura 20. Porcentajes de remoción para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los HA-FHSS.....	39

Figura 21. Nitratos en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	40
Figura 22. Eficiencias de remoción para Nitratos en los HA-FHSS. ....	41
Figura 23. Amonio en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	42
Figura 24. Nitrógeno total (mg/L) del influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	43
Figura 25. Fosfatos en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. ....	44
Figura 26. Fósforo total en el influente y efluentes de los HA-FHSS. ....	45
Figura 27. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 3/4 de pulgada al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	50
Figura 28. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	51
Figura 29. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la vermiculita al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	52
Figura 30. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal simple al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	53
Figura 31. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada a 8 cm de profundidad del humedal simple al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	54
Figura 32. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada a 15 cm de profundidad al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	55
Figura 33. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal mixto al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	56

Figura 34. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la vermiculita al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	57
Figura 35. Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 3/4 de pulgada del humedal mixto al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado. ....	58

### **Índice de Tablas**

Tabla 1. Resultados obtenidos de diversos estudios utilizando HA-FHSS y diversos tipos de aguas residuales (AR). ....	7
Tabla 2. Recomendaciones generales de diseño y operación para humedales artificiales. .	8
Tabla 3. Características típicas de los medios para humedales de flujo subsuperficial.....	19
Tabla 4. Parámetros a analizar en el monitorio del influente y los efluentes .....	27
Tabla 5. Caracterización del efluente del RAFA. ....	29
Tabla 6. Resumen de la varianza entre los efluentes de los HA-FHSS .....	45
Tabla 7. Análisis de varianza de los efluentes de los HA-FHSS .....	46
Tabla 8. Resultados obtenidos y su comparación con las normas oficiales mexicanas .....	48

## Nomenclatura

Ac	Área transversal del humedal construido
ADS	Espectroscopia de rayos X de energía dispersa
As	Área superficial del humedal construido
CE	Conductividad eléctrica
CO	Carga orgánica
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DQO <sub>s</sub>	Demanda Química de Oxígeno soluble
DOF	Diario Oficial de la Federación
HA	Humedal Artificial
HA-FHSS	Humedal Artificial de Flujo Horizontal Subsuperficial
K <sub>T</sub>	Constante de Temperatura
L	Longitud del Humedal Construido
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nitrógeno Amónico
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitratos
NMP	Número más probable
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
mS	miliSiemens
NT	Nitrógeno Total
NMX	Normas mexicanas
P-T	Fósforo Total
Q	Caudal
RAFA	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
T	Temperatura
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
Ulog	Unidades logarítmicas
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
W	Ancho del Humedal Construido

## 1. Introducción

El tratamiento de las aguas residuales generadas por la actividad antropogénica, se ha convertido en un problema frecuente e importante a nivel mundial, debido principalmente a los altos costos en infraestructura, mantenimiento y energía requeridos por ciertas tecnologías para la depuración del agua. Debido a esto, se ha buscado aplicar alternativas de tratamiento que sean eficientes, sustentables y económicamente viables.

En México se generan alrededor de 212 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, de las cuales reciben tratamiento sólo el 57 %. La CONAGUA (2015) reporta 2477 plantas tratadoras de aguas residuales en operación en todo el país, los humedales artificiales (HA) representan sólo el 3 %, y la combinación del uso de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) y humedales artificiales el 1 %.

La utilización de el HA como sistemas de descontaminación, tiene su origen en la investigación de Seidel (1976). A partir de estas investigaciones, el desarrollo y aplicación de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales ha sido acelerado y efectivo. Lo anterior ha derivado en la construcción de HA en diversas partes del mundo, principalmente en Norte América y Europa (Arias y Brix, 2003).

Los HA de manera general se definen como sistemas que simulan una zona de transición entre el ambiente terrestre y acuático, pero que son específicamente construidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento.

Dentro de las grandes ventajas que presentan estas tecnologías se encuentran los bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, en comparación con los requeridos por otros procesos de tratamiento, además de no generar lodos que después necesiten ser estabilizados, se obtienen efluentes de muy buena calidad, y son una alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas e industriales (Vymazal, 2011).

En climas tropicales y subtropicales los HA son una opción de tratamiento más viable y económica, pues los rangos de temperatura en estas regiones propician una mayor

actividad biológica, dando como resultado una mayor eficiencia en el tratamiento. México cuenta con una variedad de climas que son favorables para un buen manejo de HA.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de dos humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (HA-FHSS) a escala piloto con medios porosos diferentes: simple (grava) y mixto (grava-vermiculita) que tratarán el efluente de un RAFA. Para cumplir con el objetivo se diseñaron y construyeron dos HA-FHSS y se implementaron como proceso final de un tren de tratamiento que utiliza un RAFA como proceso principal de depuración, este tren da tratamiento a un agua residual industrial de una empresa chocolatera de la región.

La vegetación utilizada en ambos humedales fue *Chlorophytum comosum*, una especie que presenta gran potencial para el uso en el HA pero de la cual se tienen muy pocas referencias, lo que permite una oportunidad de aporte en la investigación de la diversidad de especies vegetales que se pueden utilizar en los HA. En el presente estudio el medio poroso fue la variante. En un humedal se utilizó exclusivamente grava y en el otro una mezcla de grava con vermiculita.

## **2. Antecedentes**

La mayor parte del agua residual generada en nuestro país es tratada mediante procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales proceso de lodos activados principalmente (CONAGUA, 2015). Estos procesos son efectivos, pero consumen mucha energía y requieren una gran infraestructura, además de necesitar un mantenimiento continuo, representando un gasto considerable para las industrias.

La selección de tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales que sean eficientes y de bajo costo, se ha convertido en un área de estudio en los últimos 50 años (Arias y Brix, 2003). Los HA son una opción razonable que está siendo mayormente estudiada para el control de la contaminación del agua, han sido utilizados ampliamente en las últimas décadas para tratar varios tipos de descargas de agua residual: doméstica, industrial, drenaje de minas, agua pluvial, agua de río contaminada (Saeed y Sun, 2012; Badhe et al., 2014), aguas residuales agrícolas (Harrington y Scholz, 2010), lixiviados de vertederos (Yalcuk y Ugurlu, 2009).

Se ha comprobado que los HA pueden ser eficientes para la eliminación de diversos contaminantes presentes en el agua residual: materia orgánica, nutrientes, elementos traza, contaminantes farmacéuticos, patógenos, entre otros (Cui et al., 2010; Saeed y Sun, 2012).

Los HA son sistemas ingenieriles que han sido diseñados y construidos para el tratamiento de aguas residuales. En donde se utilizan los procesos naturales que involucran la vegetación, suelos o medios porosos, y agrupaciones microbianas asociadas.

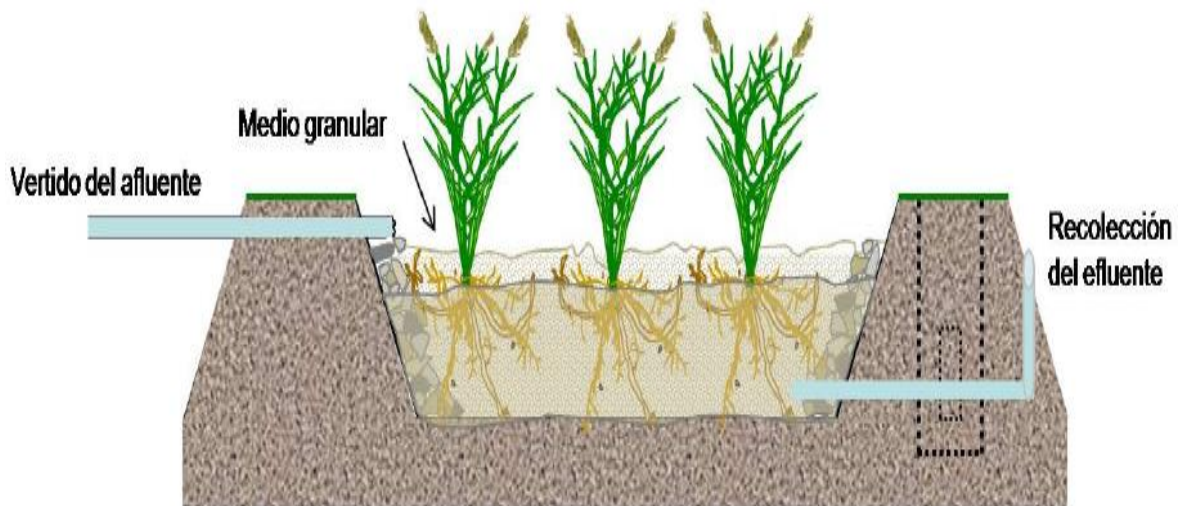
### **2.1 Tipos de humedales artificiales**

Los HA se pueden clasificar de acuerdo con distintos parámetros de diseño, sin embargo, los criterios más importantes son la hidrología: flujo superficial y subsuperficial. A su vez los HA de flujo subsuperficial se dividen en horizontal y vertical. Se pueden combinar diferentes tipos de HA para utilizar las ventajas específicas de cada sistema y, de esta manera incrementar su eficiencia. A estos humedales se les denomina sistemas híbridos o combinados (Vymazal, 2014).



## 2.2 Humedales Artificiales de flujo horizontal subsuperficial (HA-FHSS)

En los humedales artificiales con HA-FHSS, el agua residual se alimenta en la entrada y fluye lentamente a través del medio poroso bajo la superficie, marcando una trayectoria horizontal, hasta que llega a la zona de salida, donde se recoge antes de salir a través de un dispositivo de control de nivel. Durante su curso el agua residual entra en contacto con una red de zonas aerobias, anóxicas y anaerobias (Figura 1) (Cooper et al., 1996).



**Figura 1. Diagrama de un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial (HA-FHSS).**

**Fuente: Estrada (2010).**

La materia orgánica se descompone en los HA-FHSS por procesos microbianos aerobios y anaerobios, así como por sedimentación y filtración de partículas. Debido a la carga pesada y la saturación continua del lecho de filtración, los procesos anaerobios prevalecen mientras que los procesos aeróbicos se limitan a pequeñas zonas adyacentes a las raíces y los rizomas, y a la capa superficial delgada, donde se puede producir difusión de oxígeno desde la atmósfera.

Uno de los mecanismos primarios de eliminación y retención para sólidos suspendidos en el HA-FHSS, es la floculación y sedimentación de las partículas coloidales. Otros mecanismos de eliminación eficaz de los sistemas de flujo horizontal son la sedimentación por gravedad, y adsorción en la película de biomasa asociados a los sistemas del medio poroso y raíces (Vyzamal y Kröpfelová, 2008).

El nitrógeno en los HA se remueve principalmente por procesos de nitrificación, desnitrificación, amonificación, reducción asimilativa de  $\text{NO}_3^-$ . El primer paso para la remoción de N Total es la transformación del N-orgánico a  $\text{N-NH}_4^+$  (amonificación) mediante microorganismos aerobios o anaerobios, aunque las reacciones son más lentas en condiciones anaerobias (Mitsch y Gosselink, 2007).

El  $\text{N-NH}_4^+$  formado o presente en el influente, puede seguir diversas rutas, ser asimilado por las raíces de las plantas o por microorganismos anaerobios y transformarse de nuevo a N-orgánico. Si el pH es superior a 8, el amonio se transformará a amoniaco y una parte se volatilizará del sistema, también puede ser inmovilizado mediante intercambio iónico con el medio poroso (Mitsch y Gosselink, 2007). Sin embargo, la conversión a  $\text{NO}_3^-$  bajo condiciones aerobias por las *Nitrosomas* y *Nitrobacter*, es el mecanismo principal que reduce la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  en los HA (Vymazal y Kröpfelová, 2008).

El último paso es la remoción del  $\text{NO}_3^-$  del sistema, el cual se lleva a cabo por dos vías, la primera es la asimilación por las plantas, mediante el ingreso del  $\text{NO}_3^-$  a las raíces por difusión o con el flujo de agua. La segunda vía es la desnitrificación, que se favorece en condiciones anóxicas/anaerobias. A través de ella, el  $\text{NO}_3^-$  se transforma a óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y finalmente a nitrógeno gas ( $\text{N}_2$ ) (Kadlec y Knigh, 1996; Vymazal, 2007).

También se ha encontrado que el  $\text{NO}_3^-$  puede sufrir una reconversión a  $\text{N-NH}_4^+$  (reducción desasimilatoria) en ambientes donde existe un exceso de materia orgánica en relación con el  $\text{NO}_3^-$  y puede ser realizada por bacterias anaerobias, aerobias o facultativas (Mitsch y Gosselink, 2007).

Las transformaciones del nitrógeno que predominan dependen sobre todo del tipo de humedal, en los HA-FHSS predominan las condiciones anóxicas/anaerobias debido a la saturación permanente del medio, por lo que proporcionan condiciones propicias para la desnitrificación si hay presencia de materia orgánica (Vymazal, 2007).

El fósforo se elimina por sorción y precipitación, además de la asimilación por plantas (Arias y Brix, 2003). Sin embargo, los materiales de filtración usados comúnmente, como grava o roca triturada no proporcionan una alta capacidad de sorción para el fósforo. Con el fin de

mejorar la eliminación de fósforo es necesario seleccionar los materiales con alta capacidad de adsorción, que dependerán de las propiedades químicas y físicas del material (Yu et al., 2015).

Zhang et al. (2014) en su resumen para eficiencias de tratamiento de el HA-FHSS en regiones tropicales y subtropicales con diferentes tipos de agua, reporta las siguientes eficiencias de remoción 70.64% para DQO, 78.32% para DBO, 82.58% de SST, 42.46% para  $\text{N-NO}_3^-$ , 62.57 % para  $\text{N-NH}_4^+$ , 50.03 % para NT.

Zurita et al. (2009) investigaron el uso de cuatro especies ornamentales comerciadas en dos tipos de humedales de flujo subsuperficial utilizando agua residual doméstica en Jalisco, México, los resultados obtenidos para el HA-FHSS fueron las siguientes 77.9% para DBO, 76.3% para DQO, 42.4% para N-orgánico, 47.2% para  $\text{NH}_4^+$ .

En HA-FSS la remoción de fósforo se encuentra en rangos más variables que para la remoción del nitrógeno y diferentes autores han reportado eficiencias de remoción para fósforo total que se encuentran entre 26% - 70% (Rousseau et al., 2004).

En la Tabla 1, se muestra un resumen de eficiencias de remoción alcanzadas por diversos autores, en diferentes partes del mundo y diversas aguas residuales utilizando específicamente el HA-FHSS, se aprecian remociones altas para materia orgánica y sólidos principalmente, mientras que las remociones para nutrientes se mantienen dentro de un rango de 21-75 %.

**Tabla 1. Resultados obtenidos de diversos estudios utilizando HA-FHSS y diversos tipos de aguas residuales (AR).**

AR	Ubicación	Eficiencias de tratamiento (%)							Referencia
		DQO	DBO	SST	NT	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PT	
Curtidora	Portugal	65	73	65	75	73	-	-	Calheiros et al., 2012
Acuicultura	Alemania	64-74	-	97	21-42	-	-	46-69	Schulz et al., 2003
Producción de vinos	Italia	88	92	-	58	54	-	-	Masi et al., 2002
Varias	Regiones tropicales	70.64	78.3	85.5	50	62.57	42.46	69.75	Zhang et al., 2014
Aguas grises	Egipto	65.9	70.3	82.2	36	-	-	32.4	Abdel-Shafy et al., 2009
Aguas negras	Egipto	83.5	86.4	89	69.3	-	-	56.2	Abdel-Shafi et al., 2009
Doméstica	Jalisco, México	76.3	77.9	-	42.4	47.2	-	-	Zurita et al., 2009
Efluente RAFA	Tanzania	33-60	-	-	-	11-23	32-44	-	Kaseva, 2003

- No indicado.

### 2.3 Diseño y operación de humedales artificiales

El criterio para el diseño y operación de un HA incluye la selección de los siguientes parámetros: sitio, vegetación, medio poroso, profundidad del agua, carga hidráulica, tiempo de retención hidráulico y modo de operación (Akratos et al., 2009; Kadlec y Wallace, 2009). Todos estos factores son cruciales para establecer la viabilidad del sistema, asegurar un buen funcionamiento y así procurar eficiencia en el tratamiento del agua.

Se seleccionó un HA-FHSS para el presente estudio, por sus ventajas frente a los dos tipos de HA, en la Tabla 2 se resumen algunas diferencias específicas según el tipo de HA, se observa que un HA-FHSS, debido a que soporta cargas orgánicas más elevadas y requiere un tiempo de retención hidráulica y un área de tratamiento menores.

**Tabla 2. Recomendaciones generales de diseño y operación para humedales artificiales.**

Parámetro	Criterio de diseño	
	Flujo superficial del agua	Flujo subsuperficial del agua (HA-FHSS)
Área específica (m <sup>2</sup> )	<2500	<2500
Carga orgánica afluyente	<112 DBO <sub>5</sub> kg/ha*d	<150 DBO <sub>5</sub> kg/ha*d
Carga hidráulica (m/día)	<0.1	<0.5
Relación largo:ancho	3:1 – 5:1	≤3:1
Tiempo de retención hidráulico (días)	5 - 30	2 - 5
Profundidad (m)	0.3 – 0.5	0.4 – 1.6
Pendiente hidráulica (%)	<0.5	0.5 – 1
Medio poroso	Medios naturales (arenas, gravas), subproductos industriales, porosidad 0.3-0.5, tamaño de partícula <20 mm (50-200 mm para la entrada y salida)	
Vegetación	Especies nativas preferentemente, densidad de plantas 80 % de cobertura.	

Fuente: Wu et al., 2015.

### 2.3.1 Selección de vegetación

Se ha comprobado que uno de los principales factores que influyen en la calidad del agua de los HA es la vegetación utilizada. Es el componente biológico principal, la vegetación actúa como intermediario para las reacciones de purificación mediante la mejora de una variedad de procesos de eliminación y la utilización directa de nitrógeno y fósforo (Liu et al., 2011). Además, estas pueden acumular elementos tóxicos, como metales pesados y antibióticos de las aguas residuales.

Las macrófitas emergentes son la principal vegetación seleccionada para los HA de flujo tanto superficial como subsuperficial. Una revisión de plantas utilizadas en el HA-FHSS realizada por Vyzamal (2011) mostró que la planta más utilizada alrededor del mundo es *Phragmites australis*, esta ha sido particularmente utilizada en Europa, Canadá, Australia y la mayor parte de Asia y África, *Typha spp* (*latifolia*, *domingensis*, *orientalis* y *glauca*) y *Scirpus spp* (*lacustris*, *validus*, *californicus* y *acutus*), son otras especies de plantas comúnmente utilizadas.

En la actualidad algunas especies ornamentales como *Iris pseudacorus*, *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), *Strelitzia reginae* y *Canna indica*, son utilizadas para HA en países tropicales y subtropicales (Yan y Xu, 2014, Torres et al., 2017).

Para el presente estudio se seleccionó la especie *Chlorophytum comosum* (Figura 2), llamada coloquialmente cinta o lazo, es una planta ornamental muy popular debido a su fácil plantación y rápido crecimiento, es nativa de las regiones tropicales y meridionales de África.

La especie *Chlorophytum comosum* es una planta perene con formación de matorrales, sus hojas verdes tienen rayas marrones crema, crece hasta unos 25 cm de largo y 25 mm de ancho, sus flores blancas son pequeñas y llevadas sobre tallos florecientes en racimos arqueados, sus raíces tienen rizomas que almacenan nutrientes y agua para la planta. Produce tallos arqueados con plántulas en sus extremos. Su temperatura de crecimiento oscila entre 18 – 32 °C, aunque tolera temperatura de hasta 2 °C, además la capacidad de sus raíces a condiciones de inmersión hace de esta especie una candidata apta para el cultivo hidropónico (Kong et al., 2009).

Los estudios sobre *Chlorophytum comosum* han mostrado su capacidad para absorber una variedad de gases tóxicos y nocivos (Wo et al., 2012; Kaur, 2015). Zhao et al. (2014) realizaron una investigación usando *Chlorophytum comosum* para absorber formaldehído y encontraron que hubo una reducción promedio del 21.95 % para una habitación de 15 metros cuadrados. Por otra parte, Wang et al. (2011) encontraron que esta especie puede ser usada para restaurar un suelo contaminado con cobre.

En lo referente al uso de esta planta en el tratamiento de aguas residuales encontramos a Qianqian et al. (2012) que usó *Chlorophytum comosum* además de *Cyperus alternifolius*, *Papyrus*, *Calamus* y *Chrysopogon zizanioides* para tratar agua residual industrial. Ortiz y Cuevas (2014) construyen un humedal con *Chlorophytum Comosum* para una vivienda aún no se muestran resultados. A pesar de esto, se tienen pocas referencias científicas de la utilización de *Chlorophytum comosum* en HA, por lo que la utilización de esta especie en el presente estudio representa una contribución a la creciente investigación de estos sistemas como procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.



**Figura 2. Vegetación utilizada en los HA-FHSS: *Chlorophytum comosum*.**

La contribución de las plantas en términos de absorción de nitrógeno y fósforo se encuentra entre 15-80% para NT y 24-80% PT (Greenway y Woolley, 2001). Sin embargo, varios autores encontraron que era más bajo y dentro del rango de 14.29 - 51.89 % de la eliminación de NT y 10.76 - 34.1 % de la remoción PT (Wu et al., 2013). Estos rangos pueden variar dependiendo de las configuraciones del sistema, los tiempos de retención, tipos de aguas residuales, la vegetación utilizada y las condiciones climáticas.

Los HA como sistemas de tratamiento de aguas residuales, pueden presentar composiciones muy variadas en sus componentes principales (tipos de suelos o medios filtrantes, vegetación, tiempos de retención, hidrología, etc.) lo que repercute en un rango amplio en términos de eficiencias de remoción alcanzadas según las configuraciones de construcción de cada sistema, pues las interacciones de los diversos componentes que forman un humedal van a ser específicas y únicas para cada caso de estudio.

### **2.3.2 Selección del medio poroso**

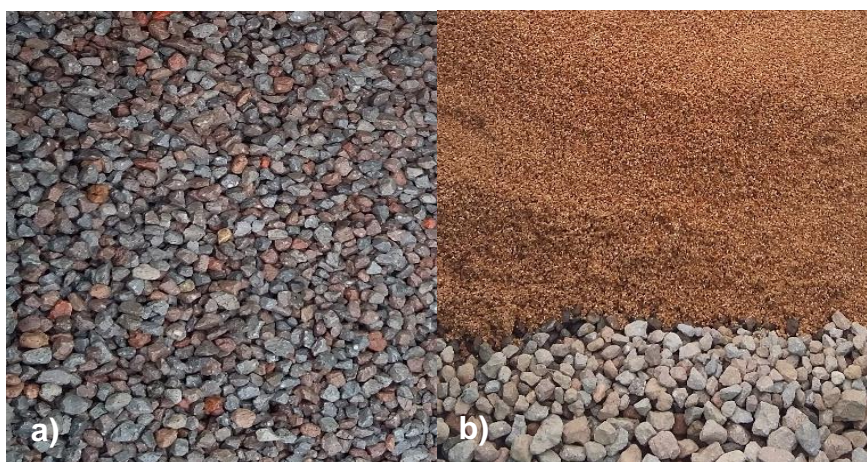
El medio poroso es el parámetro de diseño crítico para los HA-FHSS, ya que puede proporcionar un medio adecuado de cultivo para la planta y también permitir el movimiento exitoso de las aguas residuales. La selección del medio poroso se determina en función de la permeabilidad hidráulica y de la capacidad de adsorber ciertos contaminantes. Una pobre conductividad hidráulica daría lugar a la obstrucción del sistema, reduciendo severamente la eficiencia del HA, afectando la capacidad de eliminación a largo plazo. Varios estudios



se han realizado sobre la selección de diversos medios porosos para HA especialmente para la eliminación de fósforo de las aguas residuales, los utilizados con frecuencia incluyen principalmente materiales naturales, artificiales y subproductos industriales, tales como grava, arena, arcilla, calcita, mármol, vermiculita, escorias, cenizas, bentonita, dolomita, piedra caliza, zeolita, carbón activado, entre otros (Albuquerque et al., 2009; Saeed y Sun, 2012; Chong et al., 2013; Yan y Xu, 2014).

Con el fin de optimizar la eliminación de nitrógeno y compuestos orgánicos, se utilizaron medios porosos tales como lodos de alumbre, turba, composta y cascarilla de arroz. Además, se han utilizado medios porosos mixtos, estos proporcionan una mayor conductividad hidráulica evitando cortocircuitos en los HA, además de contar con superficies más reactivas para la fijación microbiana. Ejemplos de estas mezclas de medios porosos son: arena y dolomita que se aplicó en HA para la eliminación de fosfatos, y el mezclado (grava, vermiculita, silicato de calcio hidratado y ceramsite) que se utilizó en HA para el tratamiento de agua con bajas concentraciones de nutrientes. (Wu et al., 2015).

Debido a lo anterior se decidió utilizar en un HA-FHSS sólo grava y en el otro un medio poroso mixto ocupando una mezcla de grava con vermiculita (Figura 3). Se seleccionaron estos materiales principalmente por su bajo costo y fácil manejo.



**Figura 3. Medios porosos utilizados en el presente estudio. a) medio poroso simple: grava, b) medio poroso mixto: grava y vermiculita.**

La vermiculita es un conjunto de silicatos de estructura laminar cuya constitución y propiedades asemejan las de las micas, pertenecen al grupo de silicatos que forman redes



de tres capas, contienen una alta proporción de magnesio en coordinación octaédrica. Es usada frecuentemente como soporte en cultivos hidropónicos, pues es insoluble en agua y disolventes orgánicos, es ligera e inerte y debido a su estructura en capas se utiliza como medio poroso en humedales artificiales o como material de empaque en filtros para el tratamiento de aguas residuales.

## **2.4 Sistemas combinados RAFA-HA**

La digestión anaerobia es el proceso fermentativo en el que la materia orgánica es degradada y donde se produce biogás (metano y dióxido de carbono principalmente), en este proceso tiene lugar la conversión biológica de macromoléculas orgánicas complejas a través de la actividad secuencial y coordinada de varios grupos tróficos microbianos que catalizan las cuatro etapas del proceso: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Santianes et al., 2008). Este proceso se ha incorporado y comprobado con muy buenos resultados en el tratamiento de aguas residuales industriales.

El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) es el reactor de lecho de lodos mayormente utilizado para el tratamiento de aguas residuales con eficiencias de eliminación para DQO entre 50 -94 % (Alcaraz, 2015). Sin embargo, estos reactores son ineficientes en la eliminación de nutrientes (Cheng et al., 2010). Por lo que, un sistema posterior es requerido para eliminar la materia orgánica residual y la mayoría de los nutrientes a la salida del RAFA (Lettinga et al., 1980, Álvarez et al., 2008).

Por lo que la utilización de HA como post-tratamiento de efluentes de un RAFA se presenta como una tecnología viable y económica para la eliminación de nutrientes y remanentes de materia orgánica, encontrándose eficiencias de remoción superiores a un 90 % para materia orgánica, sólidos, nitrógeno y remociones superiores a un 85 % para fósforo, de acuerdo a estudios realizados por Cheng (2010), Harrington y Scholz (2010) en sistemas combinados (RAFA-HA).

### **3. Justificación contextual y científica**

Desde hace más de treinta años los humedales artificiales se comenzaron a utilizar para el tratamiento de las aguas residuales generadas por pequeñas comunidades. En la actualidad estos sistemas se están aplicando de forma creciente en todo el mundo, tratando aguas residuales de diversos tipos.

Los HA constituyen una alternativa viable para abordar el problema de la descontaminación del agua. Sin duda alguna, el cambio de mentalidad progresivo de las sociedades humanas hacia el desarrollo sostenible es algo que debe ir a la par con una buena gestión del tratamiento de las aguas residuales. El éxito en este tipo de emprendimientos radica en generar sistemas de tratamiento sustentables, que permitan resolver problemas sin generar otros.

En México, la opción comúnmente utilizada para tratar las aguas residuales corresponde al empleo del sistema de lodos activados, este, aunque es eficiente requiere energía y produce mucho lodo, el cual debe ser estabilizado después, aumentando los costos de tratamiento.

En consecuencia, se han comenzado a explorar opciones de tratamiento que sean eficientes y con un consumo menor de energía. Especialmente para zonas rurales y aisladas en donde los humedales son tecnologías de tratamiento simples de operar, con baja producción de lodos residuales y sin consumo energético (limitado al bombeo solo si este es necesario). No requieren de la adición de reactivos químicos y de energía para airear el agua o recircularla. La infraestructura necesaria para su construcción es simple y su mantenimiento es relativamente fácil y económico.

En México el porcentaje de las aguas residuales que se tratan mediante HA es muy bajo 3 % y 1 % en sistemas combinados RAFA-HA, debido a esto se requiere de una mayor investigación e incorporación de este tipo de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales de tipo municipal e industrial en todo el país.

En el presente estudio se diseñaron y operaron dos HA-FHSS para la depuración del efluente de un RAFA que ha trabajado con un agua residual proveniente de una industria

chocolatera regional, la DQO total del efluente en el RAFA es de  $771.15 \pm 292.2$  mg/L, la temperatura de operación fue la ambiental que osciló entre los 10 – 20 °C, dependiendo la temporada del año, el caudal de diseño utilizado fue de 120 L/d en cada humedal debido a que se obtenía un promedio de 250 a 300 L/d de agua tratada en el RAFA y se utilizaba también para operar dos reactores piloto de lodos activados.

La utilización de humedales artificiales como post-tratamiento de efluentes de un RAFA se presenta como una opción viable y económica para la eliminación de nutrientes y remanentes de materia orgánica, debido a que los RAFA son ineficientes en la eliminación de nutrientes (Chent et al., 2010) y se requiere un sistema posterior para eliminar la materia orgánica que aún tienen estos efluentes (Lettinga et al., 1980; Álvarez et al., 2008).

En los HA-FHSS diseñados se utilizó como vegetación *Chlorophytum comosum*, se ha comprobado la capacidad de sus raíces a condiciones de inmersión (Kong et al., 2009) y es capaz de absorber una variedad de gases tóxicos y nocivos (Wo et al., 2012). Su aplicación como vegetación en HA se ha estudiado muy poco, pero debido a que en las últimas décadas se ha optado por estudiar también especies ornamentales en los HA y así darles un aporte estético y comercial a estos sistemas, esta especie representa una nueva opción en la diversidad de plantas ornamentales que podría ser utilizada en este tipo de tecnologías.

Un componente crítico en los HA-FHSS es el medio poroso, también llamado medio filtrante o sustrato, pues proporciona un medio de soporte y de cultivo para la planta y también permite el movimiento exitoso de las aguas residuales. Se han utilizado medios porosos mixtos, debido a que estos pueden proporcionar una mayor conductividad hidráulica evitando cortocircuitos en los HA, además de contar con superficies más reactivas para la fijación microbiana (Wu et al., 2015). Debido a lo anterior y para evaluar la diferencia entre un medio poroso simple y un mixto, en un HA-FHSS se utilizó únicamente grava y en el otro HA-FHSS una mezcla de grava con vermiculita.

#### **4. Hipótesis**

El agua tratada en un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial con un medio poroso mixto (grava y vermiculita) alcanzará eficiencias de remoción mayores, que las que se obtengan del humedal con un medio poroso simple (grava).

#### **5. Objetivo general y específicos**

##### **5.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de dos humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial a escala piloto con medios porosos diferentes: simple (grava) y mixto (grava-vermiculita) que tratarán el efluente de un RAFA.

##### **5.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir dos humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial que depurarán el efluente de un RAFA, para su posterior operación y monitoreo.
- Demostrar cuál de los dos humedales artificiales presentan mejor eficiencia de remoción de un efluente RAFA.
- Corroborar que el agua tratada mediante los humedales artificiales cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana vigente en todos los parámetros analizados.
- Caracterización química elemental mediante microscopía electrónica de barrido de los medios porosos al inicio y final de la etapa experimental.

## 6. Metodología

El siguiente diagrama de bloques muestra las actividades realizadas durante la presente investigación (Figura 4).

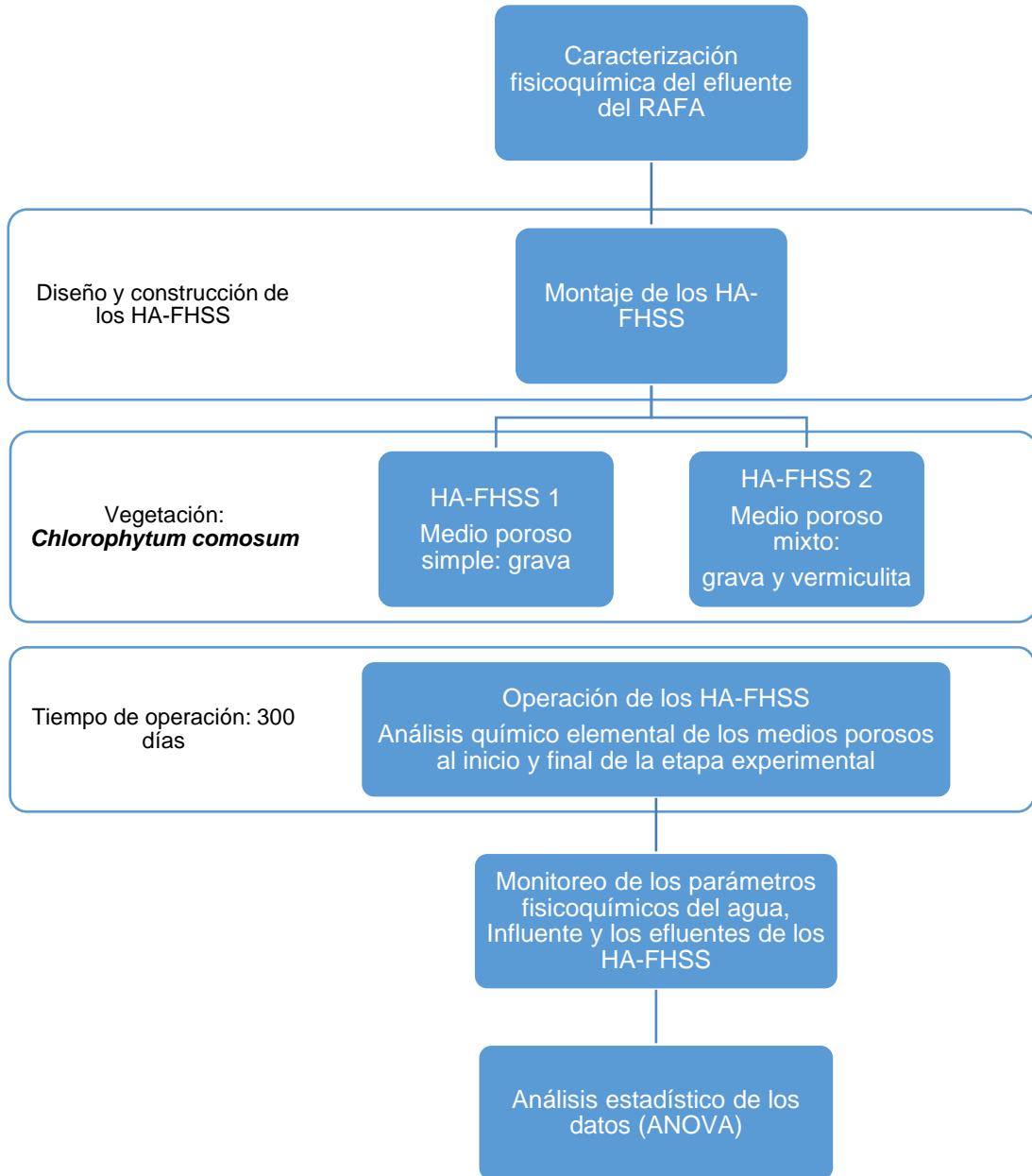


Figura 4. Diagrama de bloques de la metodología del proyecto.

## **6.1 Caracterización fisicoquímica del efluente del RAFA**

El agua utilizada en los HA-FHSS, provenía de un pequeño tren de tratamiento constituido por un RAFA (244.6 L) seguido de un sedimentador de lamelas que trata el agua residual de una industria chocolatera. El RAFA trabajó a cargas orgánicas volumétricas (COV) de entre 5.73 a 8 kg Demanda química de oxígeno soluble ( $DQO_5$ )/ $m^3/d$ , se mantiene a un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, la temperatura de operación es psicrófila (12.5 a 17.3 °C) y el biogás producido se utiliza en invierno para incrementar la temperatura del RAFA. El efluente del sedimentador de lamelas se nombrará en el texto como efluente del RAFA.

Aunque las eficiencias de remoción alcanzadas (70 - 80%) en el RAFA son buenas en términos de  $DQO_5$  removida, y se mantiene una producción de biogás alta, lo que comprueba el buen funcionamiento del reactor; en el efluente queda materia orgánica remanente, además este tratamiento no remueve los nutrientes que esta agua contiene, encontrándose valor de nitratos, amonio, nitrógeno total, fósforo total y fosfatos. Por todo lo anterior se determinó incorporar como proceso final del tratamiento a los HA-FHSS.

La caracterización fisicoquímica inicial del efluente del RAFA permitió determinar la calidad del agua tratada, aunque por estudios anteriores en este reactor se ha mostrado una variabilidad alta de la calidad de esta agua, se debieron tomar algunos valores promedio para realizar el dimensionamiento de los humedales artificiales. Se midió del efluente del RAFA los siguientes parámetros: temperatura, pH, conductividad eléctrica,  $DQO_5$ , alcalinidad, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fosfatos y fósforo total.

## **6.2 Diseño, construcción y montaje de los HA-FHSS**

Los siguientes apartados muestran una descripción del proceso de diseño, la construcción y montaje de nuestros sistemas de estudio.

### **6.2.1 Diseño de los HA-FHSS**

Los HA pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón para la remoción de la DBO.

El modelo de diseño presentado es el sugerido por Reed en su libro Natural Systems for Waste Management and Treatment (1990) y Lara (1999), por considerarse uno de los más completos y acorde a los objetivos del presente trabajo experimental.

El área superficial del humedal se determina por la ecuación (Ecuación 1):

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln \left[ \frac{C_o}{C_e} \right]}{K_T \cdot y \cdot n} \quad (1)$$

Dónde:  $K_T$ : constante de temperatura,  $d^{-1}$  (Ecuación 2)

$y$ : profundidad de diseño, m

$n$ : porosidad del medio poroso

$Q$ : caudal en  $m^3/d$

$C_o$  y  $C_e$ : Concentración de  $DBO_5$  a la entrada y salida del sistema

(2)

$$K_T = K_{20} \cdot (1.06)^{(T-20)}$$

$$K_{20} = 1.104 \text{ d}^{-1}$$

El ancho del humedal se calcula mediante la siguiente ecuación (Ecuación 3):

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{Q \cdot A_s}{m \cdot K_s} \right]^{0.5} \quad (3)$$

Dónde:  $m$ : es la pendiente del fondo del lecho, expresada en decimal.

$A_s$ : área superficial del humedal previamente calculada, m

$K_s$ : conductividad hidráulica,  $m^3/m^2 \cdot d$

La conductividad hidráulica ( $K_s$ ) varía dependiendo de los espacios vacíos en el medio poroso utilizado. El tipo de material, así como los rangos de tamaño efectivo, porosidad y conductividad hidráulica se muestran en la Tabla 3. La conductividad hidráulica estará en función del tamaño efectivo y la porosidad.

**Tabla 3. Características típicas de los medios para humedales de flujo subsuperficial.**

<b>Tipo de material</b>	<b>Tamaño efectivo D<sub>10</sub> (mm)</b>	<b>Porosidad, n (%)</b>	<b>Conductividad hidráulica, k<sub>s</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d)</b>
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10000-50000
Roca gruesa	128	38-45	50000-250000

Fuente: Lara, 1999.

La longitud del humedal se calcula, mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{As}{W} \quad (4)$$

Para una concentración inicial de DBO<sub>5</sub> = 250 mg/L y una concentración final de 50 mg/L, porosidad de 37 %, profundidad de diseño 0.4 m y K<sub>18 °C</sub> = 0.9826 d<sup>-1</sup>, K<sub>s</sub> = 3000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, m = 1 % = 0.01 y un caudal de diseño = 0.12 m<sup>3</sup>/d. Se obtienen los siguientes parámetros de diseño:

<b>Área superficial (m<sup>2</sup>)</b>	1.18
<b>W= Ancho (m)</b>	0.182
<b>L = largo (m)</b>	7.3
<b>Relación L:W</b>	40:1

La relación L:W obtenida 40:1 no se considera aceptable, por lo tanto, se recalcula el ancho y largo del humedal con la siguiente relación de diseño recomendada. En donde el largo del humedal debe ser tres veces el ancho (L:3W).

Ocupando la fórmula para el Área superficial, y sustituyendo el largo del humedal, obtenemos una nueva ecuación para el ancho del humedal (Ecuación 5).

$$As = LW$$



$$L : 3W$$

$$As = (3W)*W$$

$$As = 3W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{As}{3}} \quad (5)$$

Las nuevas dimensiones son:

$$\mathbf{W = Ancho (m) \quad 0.67}$$

$$\mathbf{L = largo (m) \quad 1.99}$$

Se seleccionó para el diseño de los humedales 2 m de largo y 0.7 m de ancho y una profundidad de 0.4 m.

$$\text{El área transversal de los humedales es: } Ac = W*y \quad (6)$$

$$Ac = 0.26 \text{ m}^2$$

El tiempo de residencia hidráulica teórico calculado fue de 1.73 d, determinado con la siguiente ecuación.

$$TRH = \frac{L * w * y * n}{Q} \quad (7)$$

## 6.2.2 Construcción de los HA-FHSS

Una vez realizado el dimensionado, se construyeron dos HA-FHSS con las mismas dimensiones (Figura 5), y se colocó el dispositivo del efluente que permitió mantener una altura del agua de 40 cm (Figura 6).



Figura 5. Humedales artificiales con los medios porosos. a) HA-FHSS con medio poroso simple: grava, b) HA-FHSS con medio poroso mixto: grava y vermiculita.



Figura 6. Dispositivo de control de nivel de agua y válvula para vaciado del sistema.

### 6.2.3 Montaje de los HA-FHSS

Los HA-FHSS se ubicaron detrás del laboratorio de Modelos Hidráulicos en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEM) con las coordenadas: latitud  $19^{\circ}23'59.01''\text{N}$  y longitud  $99^{\circ}42'53.48''\text{O}$ . A una altitud de 2615 msnm (Figura 7).



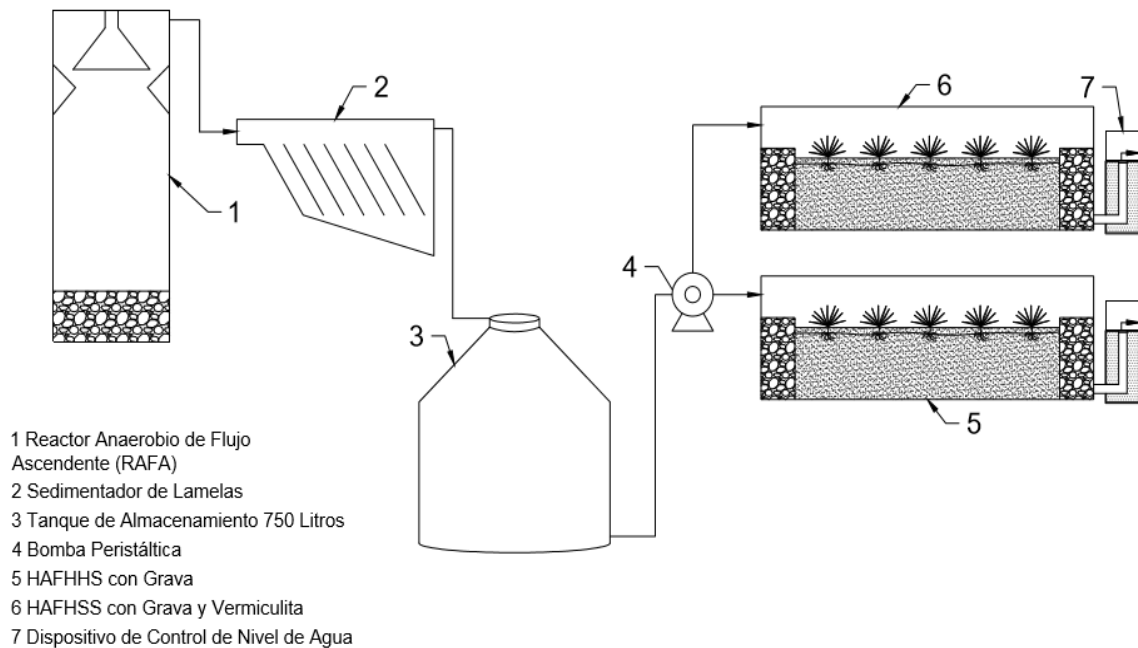
Figura 7. Ubicación geográfica de los HA-FHSS. Fuente: Google Earth.

Dentro del Laboratorio de Modelos Hidráulicos se encontraba el reactor piloto tipo RAFA (Figura 8), del cual se obtuvo el efluente para los HA-FHSS y con esto complementar el proceso de tratamiento del agua residual industrial chocolatera.



Figura 8. a) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) y sedimentador de lamelas. b) Efluente del sedimentador de lamelas, efluente utilizado en los HA-FHSS.

El diagrama general del sistema de tratamiento se observa en la Figura 9. El agua residual cruda de la industria chocolatera es tratada mediante un RAFA a escala piloto (244.6 L), después pasa por un pequeño sedimentador de lamelas. El agua que sale del sedimentador se capta por gravedad a un tinaco de 750 L (tanque de alimentación), el cual abastece a los dos HA-FHSS con la ayuda de una bomba peristáltica.



**Figura 9. Esquema general del proceso de tratamiento del agua residual de la industria chocolatera.**

A continuación, se describen los materiales y equipos utilizados en la construcción de los HA-FHSS

- El material utilizado para la estructura de los HA fue fibra de vidrio, se construyeron dos cascarones de este material con forma rectangular y las siguientes dimensiones: largo: 2 metros, ancho: 0.70 metros, altura: 0.70 metros, se colocaron en una base realizada con tarimas de madera con una pendiente del 1 %.
- Se ocupó un tanque Rotoplas de 750 litros para captar por gravedad el agua del sedimentador de lamelas (efluente del RAFA), con la ayuda de una bomba peristáltica marca Masterflex L/S, Modelo 77202-60, se alimentó a los dos humedales.



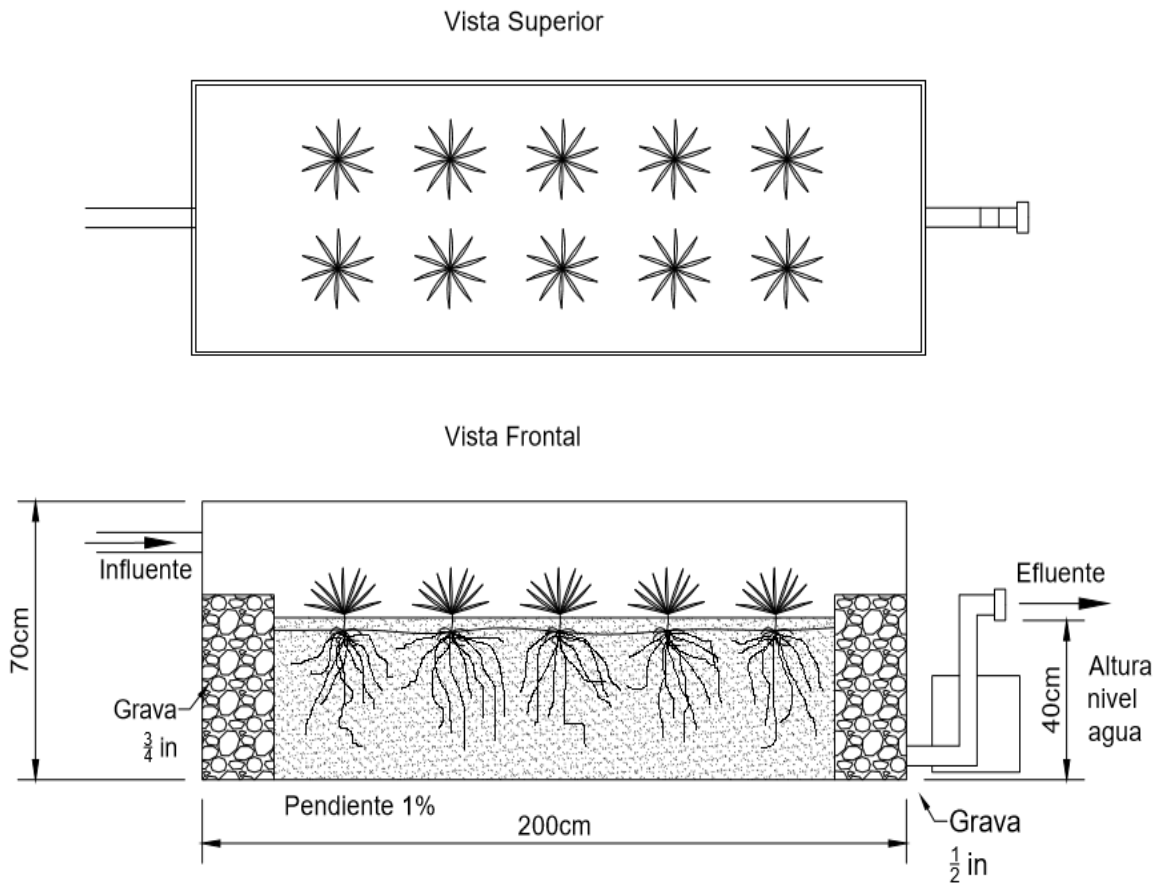
- Se utilizó tubería de PVC de ½ pulgada, perforada en la parte inferior con una broca de 1/16' formando una línea recta. Con la finalidad de distribuir el caudal de entrada uniformemente a lo largo de todo el ancho del humedal.
- HA-FHSS con sustrato simple: se tamizaron dos tamaños diferentes de grava (Figura 10), con un tamiz de ¾ pulgada para los extremos del humedal, formando una pared con un grosor de 30 cm para la entrada y salida del agua residual. Grava con un diámetro de ½ pulgada, relleno de toda la parte central del humedal. Ambas hasta alcanzar una altura de 43 cm.



Figura 10. Tamices utilizados para la selección de la grava.

- HA-FHSS con sustrato mixto, se colocó una pared de 30 cm de grosor en ambos extremos del humedal, con la grava de ¾ de pulgada de diámetro, en la parte central se colocaron tres diferentes capas, la primera con grava de un diámetro de ½ pulgada hasta alcanzar una altura de 20 cm, seguida de una cama de vermiculita con una altura de 15 cm, para finalizar una capa de 8 cm de grava con un diámetro de ½ pulgada, en conjunto las tres capas alcanzaban los 43 cm de altura en el sistema.
- En cada humedal se plantaron 10 especímenes de *Chlorophytum comosum* jóvenes (Figura 11). Se cortaron las raíces gruesas, con la finalidad de que las pequeñas y más delgadas crecieran por los espacios entre la grava y vermiculita y extenderse lo mejor posible.

- Se colocó tubería de PVC de 2 pulgadas en la parte final y baja del humedal, con múltiples perforaciones sobre toda la superficie del tubo con una broca de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, para captar toda el agua tratada en el sistema. Esta tubería se conectada con el dispositivo de control de nivel, utilizando una tubería de PVC de 2 pulgadas con una altura de 40 cm (Figura 11) de esta tubería se tomaron las muestras de agua para el análisis del efluente.



**Figura 11. Vista superior y frontal de los HA-FHSS.**

- Los humedales se construyeron dentro de una carpa (Figura 12), principalmente para evitar la dilución por las intensas precipitaciones en la región, además de evitar la evapotranspiración y proteger la vegetación de la radiación excesiva.



**Figura 12. Fotografía de la ubicación de los componentes del sistema de tratamiento. 1) Tanque de almacenamiento, 2) Bomba peristáltica, 3) HA-FHSS, 4) Carpa protectora.**

### 6.3 Monitoreo del influente y efluente de los HA-FHSS

El agua de alimentación (efluente del sedimentador de lamelas, previamente tratado en el RAFA) y los efluentes de los HA-FHSS se monitorearon y midieron mediante los parámetros descritos en la Tabla 4.

**Tabla 4. Parámetros a analizar en el monitoreo del influente y los efluentes de los HA-FHSS.**

Parámetro	Técnica analítica	Equipo	Frecuencia de medición
<b>pH y temperatura</b>	NMX-AA-008-SCFI-2001 (DOF, 2011)	Medidor de pH marca Thermoscientific, modelo Orion Star A211	Cada tercer día
<b>Conductividad eléctrica</b>	NMX-AA-093-SCFI-2000, (DOF, 2000)	Medidor, marca Hanna, modelo HI 991300	Cada tercer día
<b>Alcalinidad</b>	NMX-AA-036-SCFI-2001 (DOF, 1980)	Reactivos y material del Laboratorio de Calidad del Agua.	Cada quince días
<b>Turbidez</b>	NMX-AA-038-SCFI-2001 (DOF, 2001)	Medidor de turbidez, Marca Scientific, Inc, Modelo: Micro 100 Turbidimeter	Cada tercer día
<b>DQO</b>	NMX-AA-030/2-SCFI-2011 (DOF, 2013)	Digestor marca HACH, modelo DRB200, Espectrofotómetro marca HACH, modelo DR 6000	Cada tercer día
<b>Fósforo total</b>	NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001).	Espectrofotómetro, modelo DR 6000	Semanal a partir del día 160
<b>Fosfatos</b>	NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001)	Espectrofotómetro, modelo DR 6000	Semanal a partir del día 160
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	Kit HACH, TNT 832	Espectrofotómetro, modelo DR 6000	Se medían según la disponibilidad de reactivos en el laboratorio
<b>Nitratos</b>	Kit HACH, TNT 835	Espectrofotómetro marca HACH, modelo DR 6000	
<b>Nitrógeno total</b>	HACH, Set 2714045	Espectrofotómetro, modelo DR 6000	
<b>Sólidos totales y sólidos suspendidos totales</b>	NMX-AA-034-SCFI-2015 (DOF, 2015)	Estufa y mufla del Laboratorio de Calidad del Agua, CIRA.	Mensual

El fósforo total y fosfatos se analizaron después de la estabilización del HA-FHSS.

Para el análisis estadístico de los datos se realizó una prueba de varianza ANOVA, para determinar si las diferencias entre los medios porosos utilizados en la investigación fueron significativas.



#### **6.4 Análisis químico elemental de los medios porosos al inicio y final de la etapa experimental**

El análisis de los medios porosos: grava de 3/4 de pulgada, grava de 1/2 de pulgada y vermiculita se realizó con un microscopio electrónico de barrido, marca Jeol, modelo JSM 5900LV (micrografías) y espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS, por sus siglas en inglés).

Se analizaron 9 muestras por duplicado de los medios porosos al inicio y final de la experimentación, a continuación, se indica la identificación de las mismas.

##### *Inicio de la etapa experimental:*

1. Grava de 3/4 de pulgada.
2. Grava de 1/2 de pulgada.
3. Vermiculita.

##### *Final de la etapa experimental:*

4. Grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal simple.
5. Grava de 1/2 de pulgada a 8 cm de profundidad del humedal simple.
6. Grava de 1/2 de pulgada a 15 cm de profundidad del humedal simple.
7. Grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal mixto.
8. Vermiculita del humedal mixto.
9. Grava de 3/4 de pulgada del humedal mixto.

## 7 Resultados y discusiones

### 7.1 Caracterización fisicoquímica del efluente del RAFA

Los resultados obtenidos en la caracterización del efluente del RAFA se muestran en la Tabla 5. Esta caracterización se hizo primeramente para analizar las condiciones bajo las que estarían los humedales artificiales y se utilizó como base para realizar los cálculos de dimensionamiento.

**Tabla 5. Caracterización del efluente del RAFA.**

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	21.8 ±1.5 [5]
pH	7.9 ± 0.6 [5]
Conductividad eléctrica (mS/cm)	3.1 ± 0.7 [5]
DQO (mg/L)	771.15±292.2 [6]
Alcalinidad (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	1764.8±202.5 [3]
SST (mg/L)*	268
SSV (mg/L)*	136
Nitratos (mg/L N-NO <sub>3</sub> )*	0.587
Nitrógeno amoniacal (mg/L N-NH <sub>3</sub> )*	37
Nitrógeno total (mg/L NT)*	58
Fosfatos (mg/L)*	3.21
Fósforo total (mg/L)*	4.49

El número de muestras [n] se muestra entre corchetes

\*Determinación única del parámetro

El pH del efluente se considera óptimo para los HA-FHSS pues se mantiene dentro de un rango cercano al neutro, con ligeras variaciones producidas por la adición de hidróxido de sodio y bicarbonato de sodio para el control del pH y la alcalinidad en el RAFA. La alcalinidad del agua que entró a los HA-FHSS se mantendrá alta debido a los requerimientos de los sistemas anaerobios (2,000 a 4,000 mg/L de CaCO<sub>3</sub>) (Metcalf y Eddy, 2004).

En términos de DQO se tienen valores altos a pesar de la buena eficiencia del RAFA, debido a que la carga de materia orgánica del agua residual cruda de la chocolatera es muy alta, alrededor de 2000 - 4000 mg/L de DQO.

En cuanto a la determinación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) se realizó en una sola muestra (Tabla 5). Metcalf y Eddy (2004) recomiendan una proporción de DQO, nitrógeno y fósforo de 250:5:1 (DQO:N:P) presentes en el agua para promover el crecimiento bacteriano, tomado los resultados obtenidos de la caracterización (Tabla 5), las cantidades de nitrógeno y fósforo total en el agua estarían excediendo esta relación.

El efluente del RAFA se continuó monitoreando a lo largo de todo el desarrollo experimental (Influyente de los HA-FHSS), debido a que anteriormente se ha observado una gran variabilidad del agua residual cruda recibida de la industria chocolatera, lo que afecta directamente las eficiencias de remoción del RAFA y por consiguiente la calidad de su efluente.

## **7.2 Resultados del monitoreo del influente y efluente de los HA-FHSS**

A continuación, se muestran las figuras que contienen los datos obtenidos del monitoreo de los HA-FHSS durante 300 días de operación y la discusión de los resultados.

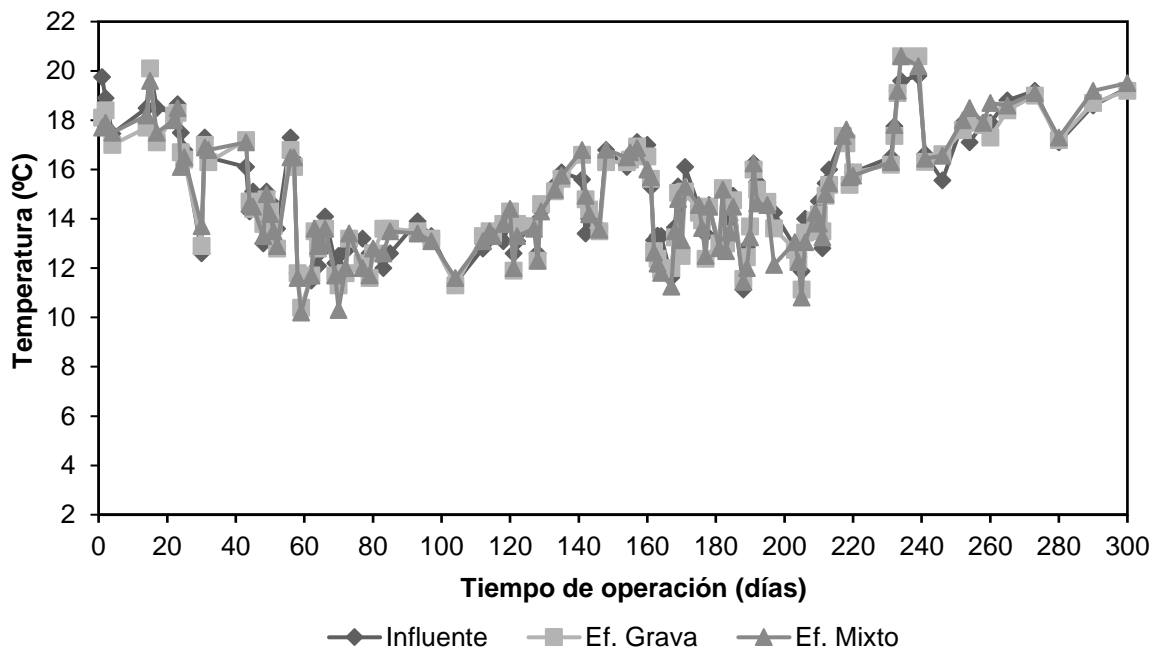
### **7.2.1 Temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica y turbidez en el influente y los efluentes de los HA-FHSS**

En la Figura 13 se observa que la temperatura del influente y los efluentes de los HA-FHSS se mantuvo dentro de un rango de 11 - 20 °C (temperatura mayormente psicrófila), las variaciones en la temperatura se atribuyen a las condiciones atmosféricas del día y las estaciones del año, observándose la temperatura más baja a partir del día 45, coincidiendo con el inicio del periodo invernal.

Temperatura baja puede generar efectos negativos sobre el rendimiento del tratamiento, principalmente en la inhibición de la eliminación de nitrógeno, flujos picos debido al lavado de sólidos y la obstrucción del medio filtrante (Dong et al., 2015). Se ha comprobado que la temperatura tiene un fuerte efecto sobre la eficiencia de remoción del nitrógeno total y el amonio. Las eficiencias de remoción del nitrógeno a una temperatura de agua superior a los 15 °C son significativamente mayores que las observadas a temperatura más baja (García, 2015).

Truu et al. (2009) indica que los microorganismos que viven normalmente en los HA tienen una actividad óptima en temperatura cálida (15 – 25 °C).

Los sistemas trabajaron dentro de un rango de temperatura de 10 – 20 °C, a lo largo de la etapa experimental, a pesar de que fue una temperatura más baja que la recomendada, de ambos humedales se obtuvieron buenas eficiencias de remoción de materia orgánica, SST y SSV.



Temperatura (° C)	Influente	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	14.98	14.84	14.82
Desviación estándar	±2.29	±2.29	±2.41

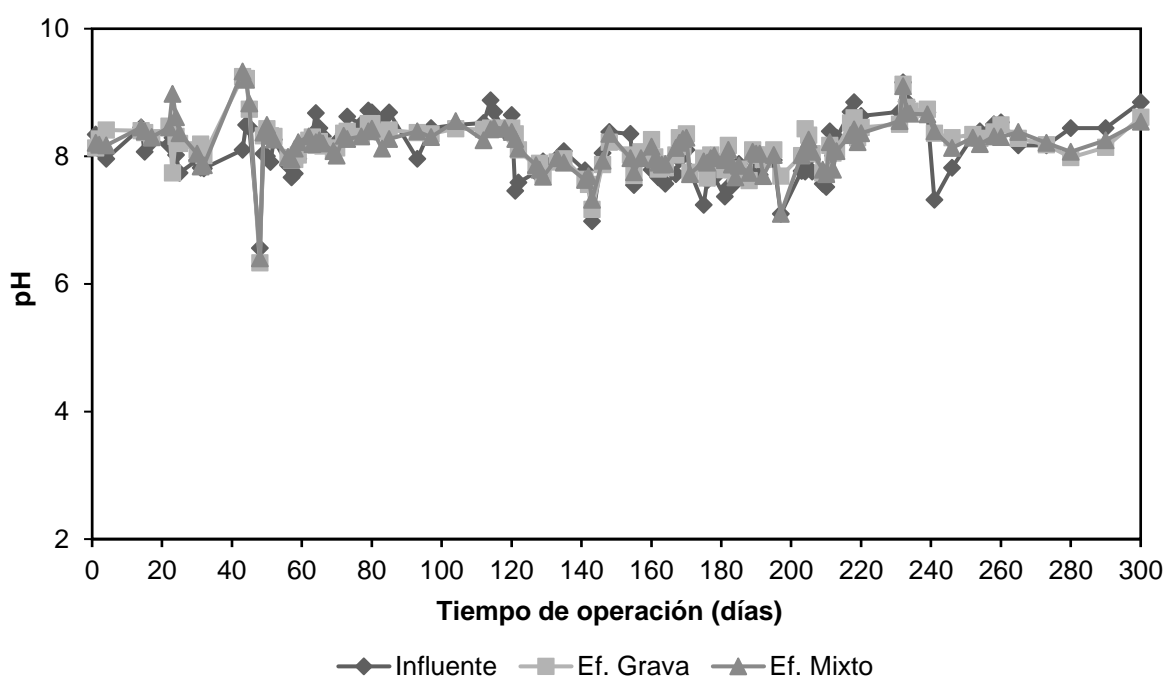
Figura 13. Temperatura de operación para los HA-FHSS durante la etapa de investigación.

Los valores de pH en el influente y los efluentes de los HA-FHSS presentaron variaciones muy pequeñas (Figura 14), el pH se mantuvo entre 7 y 8.5, con algunas excepciones, donde se registró un pH ácido cercano a 6 (día 48) y algunos días con pH alcalinos cercano a 9 (días 40 - 43).

Este parámetro es importante debido a que una de las consecuencias de un bajo pH es la inhibición en el crecimiento de las plantas, elevadas concentraciones de iones H<sup>+</sup> representan una amenaza tóxica directa para las especies vegetales y pueden interferir con los mecanismos de absorción de nutrientes. Por otro lado, un pH mayor a 8 también se

considera un ambiente limitante para el crecimiento de las plantas, principalmente debido a la disponibilidad limitada de fósforo (Wu et al., 2015).

La mayoría de los efluentes industriales no tienen un pH neutro, el agua cruda que llega de la industria chocolatera no es la excepción, tiene un pH ácido (4 - 5), debido a esto se le adiciona hidróxido de sodio y bicarbonato de sodio para subir el pH y aumentar alcalinidad. El lodo anaerobio en el RAFA requiere de una alcalinidad específica y un pH cercano al neutro, al adicionar los reactivos no se afecta al lodo anaerobio y el pH de salida del RAFA (influyente de los HA-FHSS) se mantiene dentro de un rango de 7 – 8 (Figura 14).

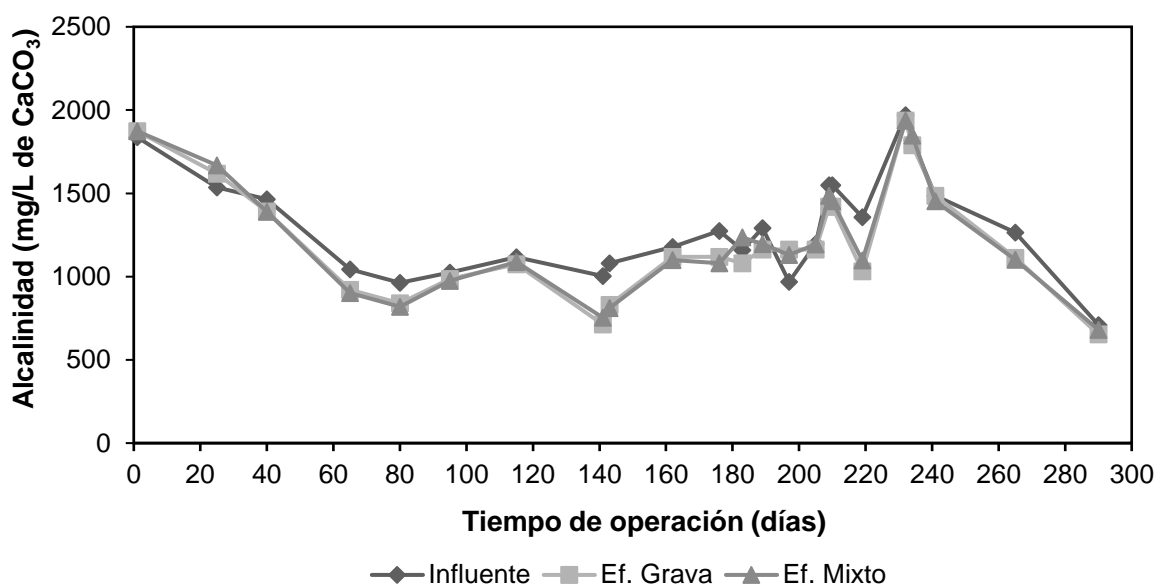


pH	Influyente	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	8.08	8.17	8.16
Desviación estándar	±0.45	±0.37	±0.37

Figura 14. Variación del pH en el influyente y los efluentes de los HA-FHSS.

Los especímenes de *Chlorophytum comosum* plantados en los HA-FHSS presentaron un crecimiento lento y menor, comparado con especímenes de la misma planta que fueron regadas con agua de la llave con un pH neutro. El enfoque de este estudio no fue el crecimiento de la vegetación en sí, y las observaciones son empíricas, pero se determina que el pH es un factor importante para el óptimo crecimiento de la vegetación.

En la Figura 15 se observa los resultados obtenidos para la alcalinidad en el influente y los efluentes de los HA-FHSS. Se mantienen valores altos de alcalinidad (700 a 2000 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), debido a la adición de bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio en el RAFA, en general se aprecia una ligera disminución de los valores de alcalinidad para los efluentes de los HA-FHSS, con un promedio de 1314.12 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  para el influente y de 1228.51 y 1248.11 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  para los efluentes del HA-FHSS con grava y el HA-FHSS con medio poroso mixto, respectivamente. Esta pequeña disminución puede asociarse principalmente a interacciones entre los medios porosos y los iones de carbonato, bicarbonato e hidróxidos presentes en el agua.



Alcalinidad (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	Influente	Efluente Grava	Efluente Mixto
<b>Promedio</b>	1314.12	1228.51	1248.11
<b>Desviación estándar</b>	±336.76	±381.6	±386.98

Figura 15. Alcalinidad en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.

La conductividad eléctrica no presenta disminución a través del paso de los humedales artificiales. Los valores medidos para el influente y los efluentes de los HA-FHSS se mantienen dentro de un rango de 0.8 - 3.6 mS/cm, con un promedio de 1.91 mS/cm para el influente y de 1.89 mS/cm para ambos efluentes (Figura 16).

La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución, principalmente iones cloruro, nitrato, sulfato, fosfatos, sodio, magnesio y calcio. El agua proveniente del RAFA mantiene altas concentraciones de diversos iones. Estos iones principalmente de sodio se encuentran en el influente de los HA-FSS, debido a la adición de bicarbonato e hidróxido de sodio para el control del pH y la alcalinidad en el agua residual cruda de la chocolatera. Al observar la Figura 15 y 16 la tendencia en los datos es similar, observándose una relación directamente proporcional entre la alcalinidad y la conductividad eléctrica.

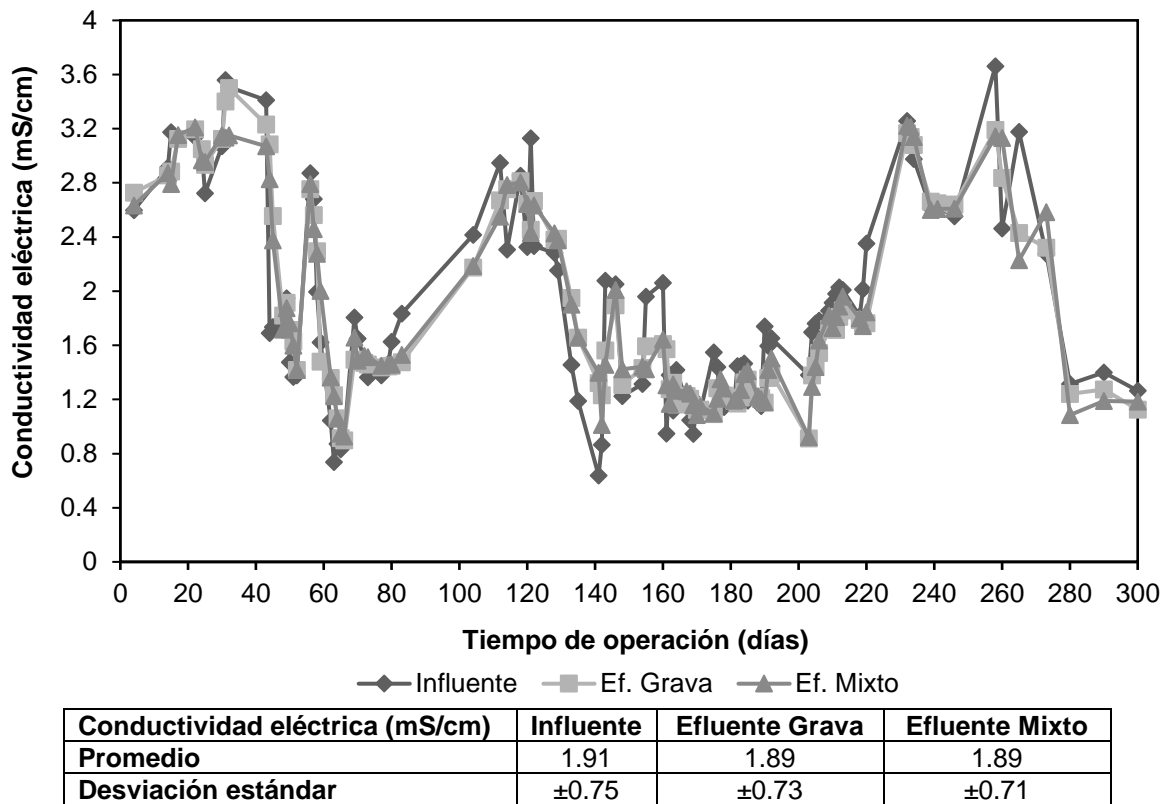
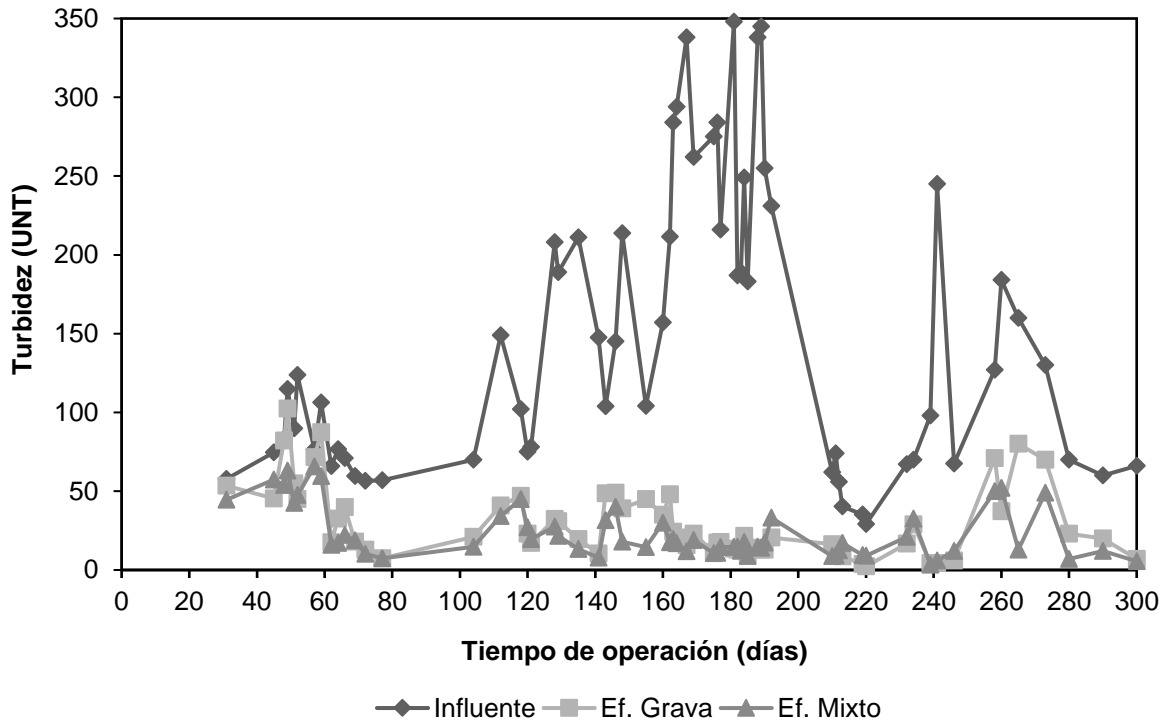


Figura 16. Conductividad eléctrica en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.

En la Figura 17 se observan los datos correspondientes a la turbidez en el influente y los efluentes de los HA-FHSS, se aprecia una importante remoción de este parámetro, con un valor promedio de 145.98 UNT en el influente, 29.52 UNT en el efluente del humedal con grava y de 23.30 UNT en el HA-FHSS con grava y vermiculita, de este último se obtiene un agua más clarificada, aunque las tendencias son similares en ambos, debido a que no se llegó a un estado de saturación de los medios porosos.

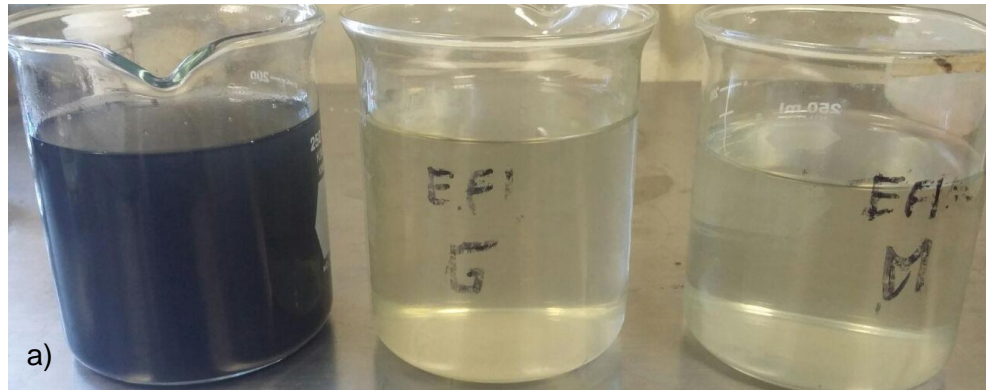
La turbidez en el agua del influente presento fluctuaciones a lo largo de todo el tiempo de operación y no mantiene una tendencia definida, este parámetro se veía afectado directamente por la fuga de lodos en el RAFA y a la poca retención de estos en el sedimentador de lamelas, todos estos sólidos (lodo anaerobio principalmente) le proporcionaban al agua del influente una alta turbidez (Figura 18). A pesar de esto los medios porosos utilizados, presentaron una buena capacidad de retención y adsorción de partículas.



Turbidez (UNT)	Influente	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	145.98	29.52	23.30
Desviación estándar	±89.92	±23.09	±16.37

Figura 17. Turbidez en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.





**Figura 17.** De izquierda a derecha: Influyente de los HA-FHSS, efluente del HA-FHSS con medio poroso simple: grava, efluente del HA-FHSS con medio poroso mixto: grava y vermiculita, a) Día de operación: 72, b) Día de operación: 135, c) Día de operación: 222.

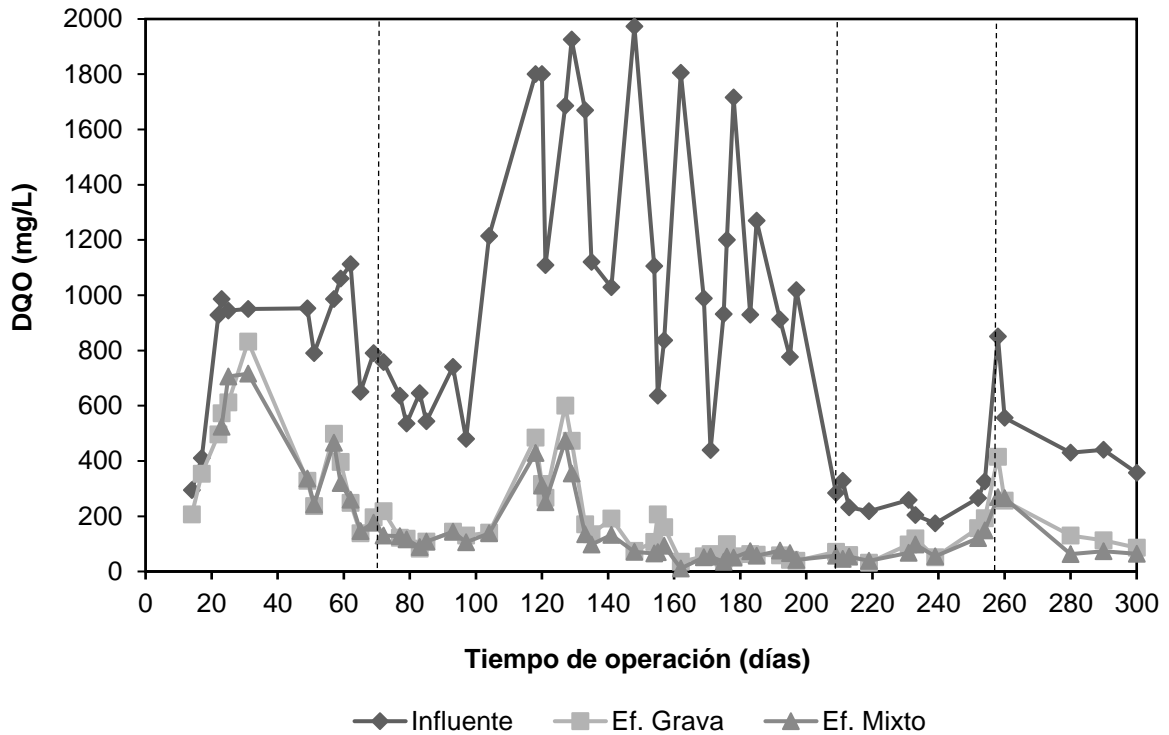
## 7.2.2 Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La variación de la DQO en el influente y los efluentes de los HA-FHSS se observa en la Figura 19. Las concentraciones de materia orgánica (MO) en el influente fueron muy variadas a lo largo de toda la etapa experimental, esto fue desfavorable para los sistemas; provocando que la etapa de estabilización para los HA-FHSS se observara a los 70 días de operación, este tiempo es largo ya que 60 días de operación es lo recomendado para HA a gran escala.

A pesar de que no se logró mantener una concentración constante de DQO en el influente, ambos HA-FHSS lograron remociones altas para este parámetro a partir del día 70 (estabilización de los HA-FHSS) y se mantuvieron hasta el día 118 donde las concentraciones de DQO en el efluente del RAFA aumentaron considerablemente alcanzando valores de hasta 2000 mg/L, provocando una caída en la eficiencia de remoción de la DQO en los humedales (Figura 19).

A partir del día 210 el agua que entro al RAFA fue proveniente de fosas sépticas, pues se dejó de recibir agua residual industrial de la chocolatera, esto provoco una disminución repentina de MO que entraba a los HA-FHSS, provocando fluctuaciones en las eficiencias de remoción y aunque la cantidad de MO que entraba a los sistemas era menor las eficiencias de remoción bajaron, estas variaciones permanecieron hasta el día 258 donde se volvió a ocupar agua de la chocolatera en el RAFA y las eficiencias de remoción comenzaron a aumentar hasta alcanzar el 75 % en el humedal con el medio poroso simple y 82 % en humedal con medio poroso mixto (Figura 20).

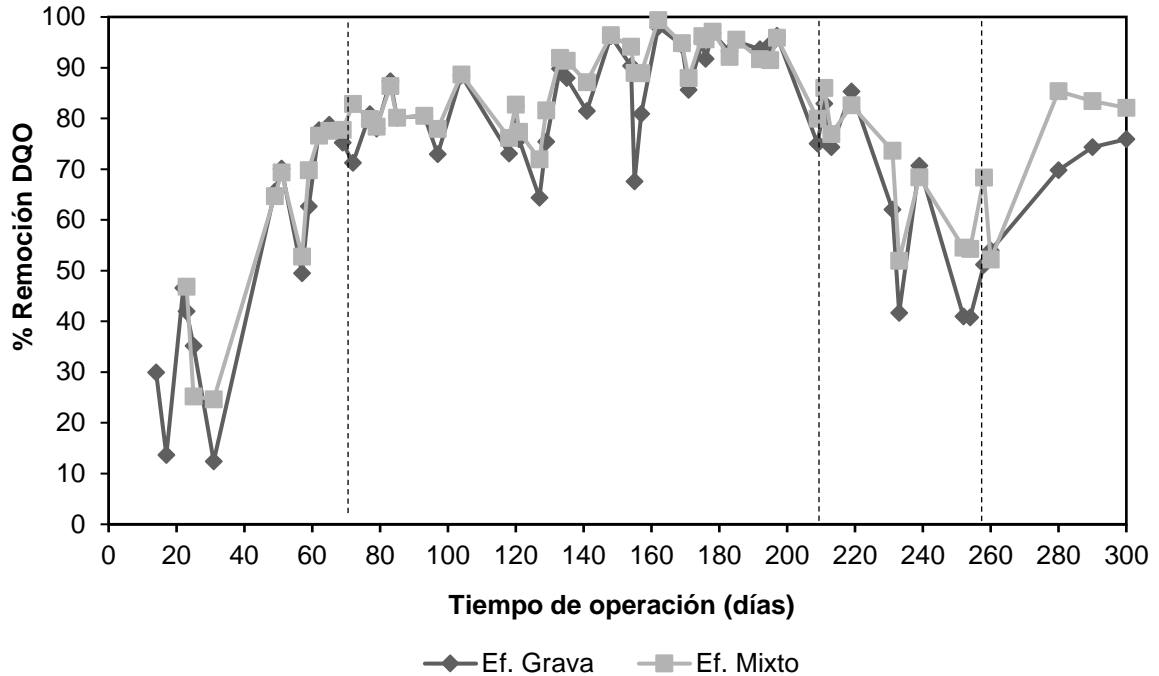
Aun con todos los contratiempos y afectaciones sufridas por el desempeño del RAFA, las remociones en términos de DQO fueron altas, con un promedio en el influente de 865.14 mg/L  $\pm$ 482.3 mg/L, en el efluente del HA-FHSS con grava de 203.64  $\pm$ 178.4 mg/L, y la mayor remoción fue en el HA-FHSS con grava y vermiculita donde el promedio fue de 169.45  $\pm$ 163.8 mg/L.



DQO (mg/L)	Influyente	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	862.14	203.64	169.45
Desviación estándar	±482.3	±178.44	±163.8

**Figura 18. Demanda química de oxígeno (DQO) en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.**

En la Figura 20 se presentan los datos para el porcentaje de remoción de la DQO. Las eficiencias de remoción de la DQO se relacionaron con la estabilización de los HA-FHSS, a partir del día 60, ambos sistemas alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 60 %. Durante el periodo de investigación las eficiencias de remoción en ambos humedales se mantuvieron con valores muy cercanos entre ellos, aunque fue el HA-FHSS con el medio poroso mixto el que logro alcanzar eficiencias de hasta el 97 %.



Eficiencia de Remoción (%)	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	72.3724	78.2858
Desviación estándar	±20.7331	±16.6907

Figura 19. Porcentajes de remoción para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los HA-FHSS.

### 7.2.3 Remoción de nutrientes

La determinación de los siguientes parámetros se realizó después de la etapa de estabilización (día 70) de los HA-FHSS.

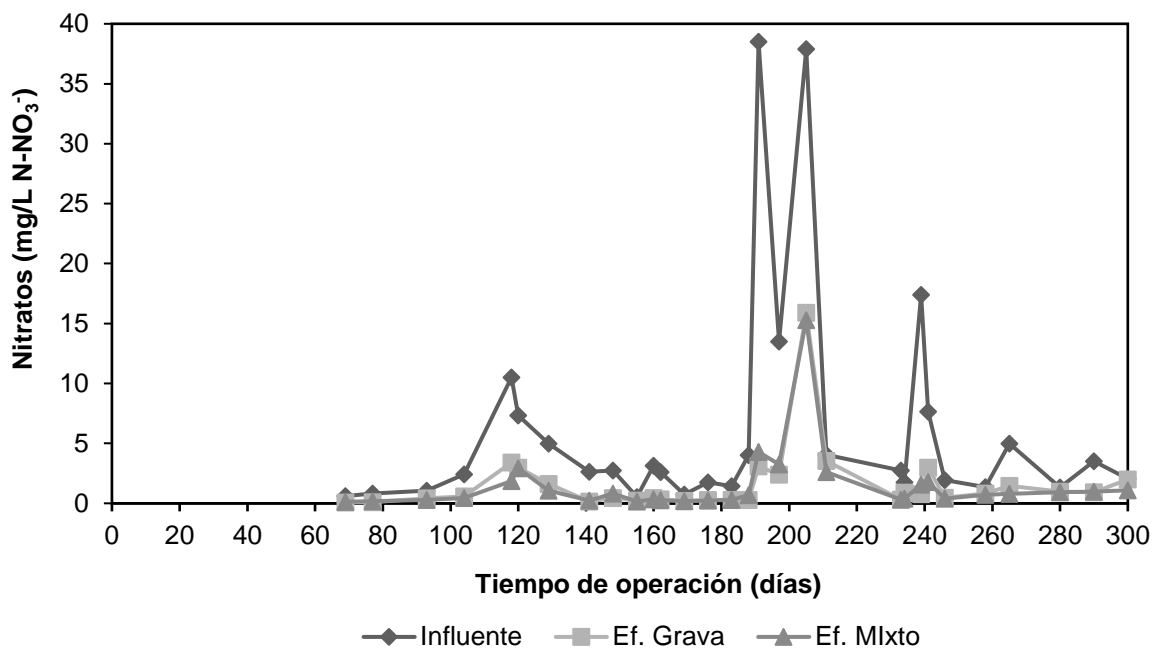
Los procesos de remoción de nitrógeno en HA, incluyen diferentes mecanismos como: asimilación por los organismos del sistema (vegetación y microorganismos), amonificación, nitrificación/desnitrificación y adsorción en la matriz del medio poroso. Numerosos estudios han demostrado que el mecanismo más importante de remoción es el proceso de nitrificación/desnitrificación (Vymazal et al., 2002).

Los compuestos nitrogenados constituyen nutrimentos clave para el crecimiento de los seres vivos, de esta manera el nitrógeno puede ser eliminado del agua siempre que sea asimilado por microorganismos. Para las plantas, el nitrógeno es un nutrimento vital que

utilizan en la síntesis de proteínas para su crecimiento, especialmente en forma de nitrato (Cervantes-Carrillo et al., 2000).

En la Figura 21 se presentan los datos para las concentraciones encontradas de nitratos en el influente y los efluentes. Esta forma de nitrógeno es la que asimilan las plantas como nutriente.

La variación en las concentraciones de nitratos encontradas en el influente de los HA-FHSS fue alta, desde 1 mg/L hasta 37 mg/L, a pesar de esto los HA-FHSS removieron exitosamente los nitratos contenidos en el agua. La concentración promedio en el influente fue de  $6.2 \pm 9.5$  mg/L  $N-NO_3^-$ , mientras que en los efluentes fue de  $1.61 \pm 2.91$  mg/L  $N-NO_3^-$  para el efluente del HA-FHSS con grava y de  $1.48 \pm 2.81$  mg/L  $N-NO_3^-$  para el efluente del HA-FHSS con grava y vermiculita.



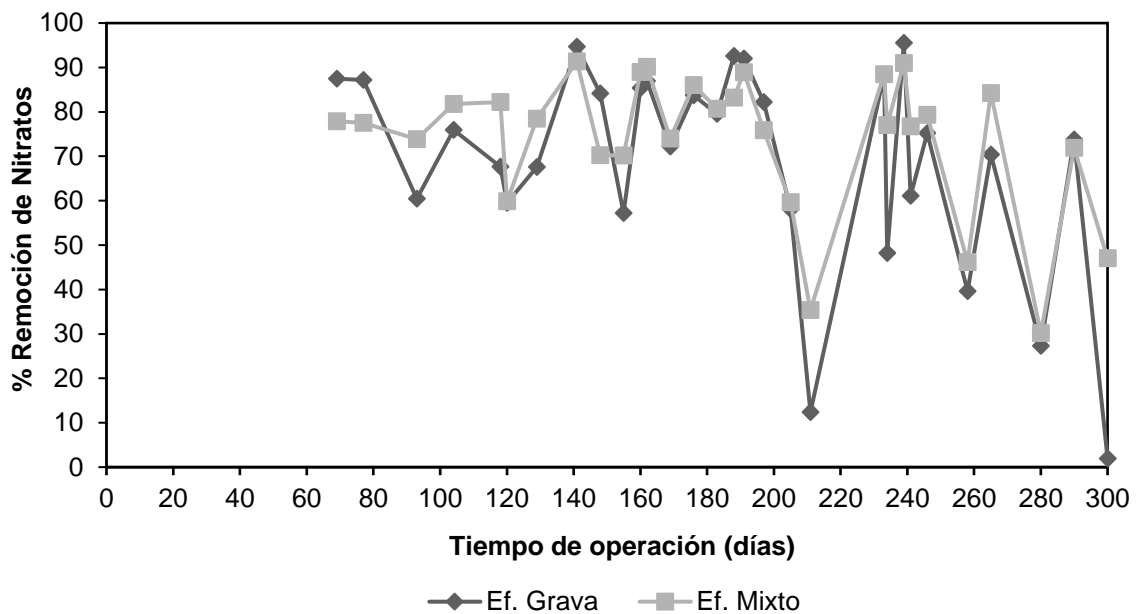
Nitratos (mg/L N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Influente	Efluente Grava	Efluente Mixto
Promedio	6.2	1.61	1.48
Desviación estándar	±9.53	±2.91	±2.81

Figura 20. Nitratos en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.

Los porcentajes de remoción para nitratos se mantuvieron mayores al 60 % y llegaron hasta el 94 % (Figura 22). A partir del día 210 que el agua residual se modificó en el RAFA (agua de fosas) las eficiencias bajaron y a partir de este punto se mantienen inestables.

Estas remociones altas encontradas para nitratos son similares a las reportadas por Torres y Zurita (2017) 58 – 72 % para humedales artificiales horizontales subsuperficiales específicamente.

La reducción de nitratos se puede alcanzar en los HA-FHSS mediante diversas rutas, la primera, es la asimilación de esta forma de nitrógeno por la vegetación del humedal y la segunda es la desnitrificación. Las condiciones predominantes en este tipo de humedales (presencia de materia orgánica en el agua residual y bajas concentraciones de oxígeno) favorecen la desnitrificación.



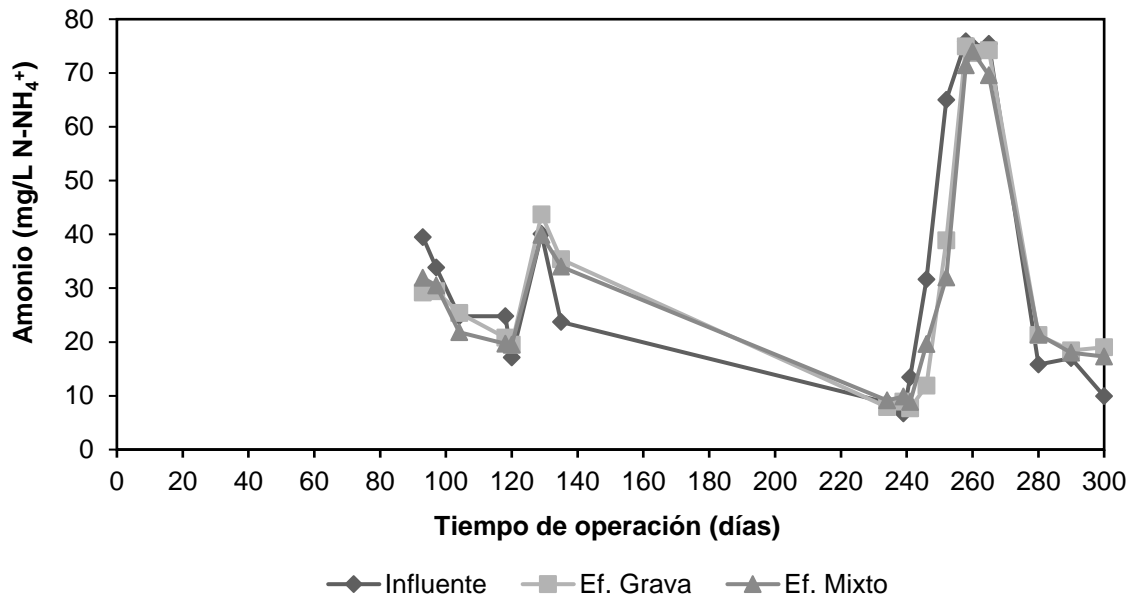
% Remoción de Nitratos	Efluente Grava	Efluente Mixto
<b>Promedio</b>	68.95	73.94
<b>Desviación estándar</b>	±23.61	±16.04

**Figura 21. Eficiencias de remoción para Nitratos en los HA-FHSS.**

En la Figura 23 se presentan los valores para amonio en el influente y los efluentes, se observa muy poca reducción de esta forma de nitrógeno al paso por los humedales, los valores para el amonio se mantienen casi constantes en el influente y los efluentes.

Las eficiencias de remoción fueron bajas (11 %) y en ocasiones nulas, ya que en algunas determinaciones aumento la concentración de amonio a la salida de los HA-FHSS. Lo anterior puede deberse a que los nitratos pueden sufrir una reconversión a  $N-NH_4^+$

(reducción desasimilatoria a amoníaco), en ambientes donde existe un exceso de materia orgánica en relación con los nitratos y este proceso puede ser realizado por bacterias anaerobias. Aunado a esto el déficit de zonas aerobias en este tipo de humedales limita la nitrificación y por consiguiente la remoción del amonio.



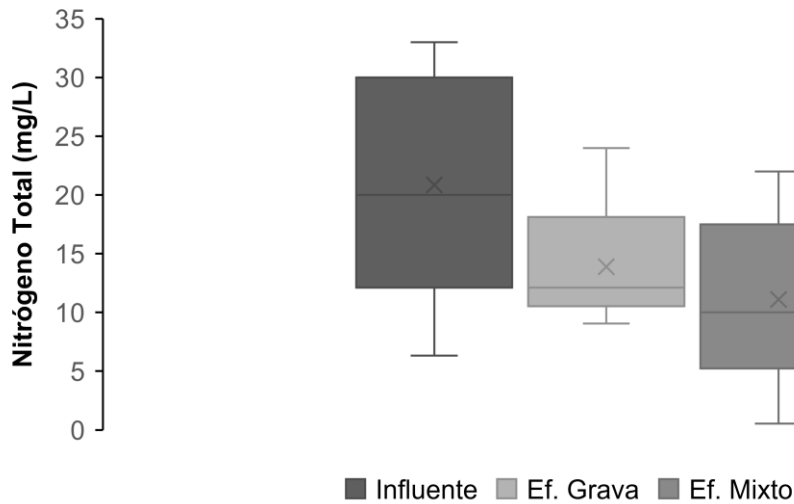
Amonio (mg/L N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Influente	Efluente Grava	Efluente Mixto	% Remoción EG	% Remoción EM
Promedio	33.23	31.12	30.47	11.91	11.11
Desviación estándar	±23.93	±22.31	±20.86	±18.75	±15.53

Figura 22. Amonio en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.

En la Figura 24 se observa una gráfica de cajas para el nitrógeno total contenido en el influente y los efluentes, de este parámetro se analizaron 7 muestras por duplicado durante la etapa experimental.

Se alcanzaron mejores eficiencias de remoción en el HA-FHSS con el medio poroso mixto 39.2 %, mientras que con el medio poroso simple se removió un promedio de 29.27 % del nitrógeno total presente en el agua residual. De acuerdo a estos resultados obtenidos la reducción del nitrógeno total fue ligeramente más baja a la esperada, el valor promedio es de 42 % de 137 humedales alrededor del mundo reportado por Vymazal (2008).

Es probable que estos resultados más bajos, puedan deberse a la profundidad de los humedales (0.40 m), en comparación con las profundidades generalmente reportadas en la literatura (0.6 -0.8 m) (Vymazal, 2014).



Nitrógeno Total (mg/L)	Influyente	Efluente Grava	Efluente Mixto	% Remoción EG	% Remoción EM
Promedio	20.85	13.88	11.1	29.27	39.2
Desviación estándar	±10.07	±5.81	±7.69	±24.71	±37.11

**Figura 23. Nitrógeno total (mg/L) del influente y los efluentes de los HA-FHSS.**

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante de la productividad primaria. Pero en concentraciones elevadas estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutrofización.

Las concentraciones de fosfatos en los HA-FHSS no presentaron remoción y en ocasiones aumentaron las concentraciones en los efluentes (Figura 25) obteniendo un promedio de 2.24 mg/L en el influente, 2.43 mg/L en el humedal con grava y 2.39 mg/L para el humedal con medio poroso mixto, este comportamiento podría deberse a que el fosfato no puede ser asimilado por las plantas en pH >8, pH en el que se operó durante toda la etapa experimental.



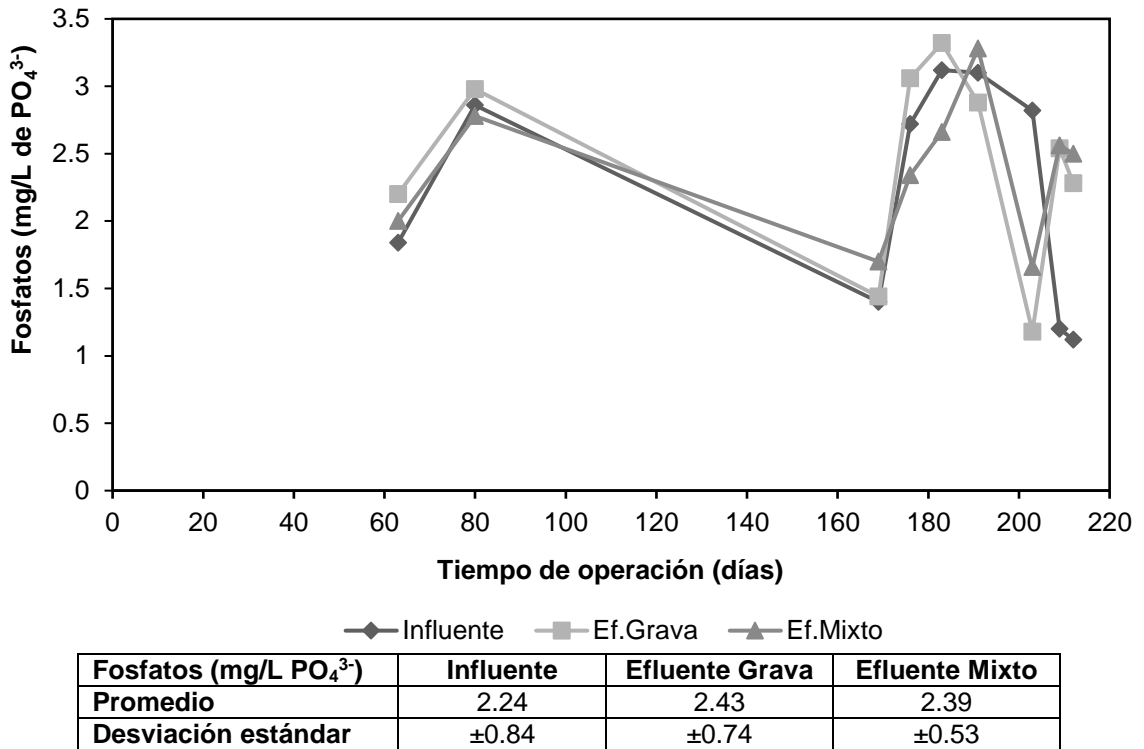
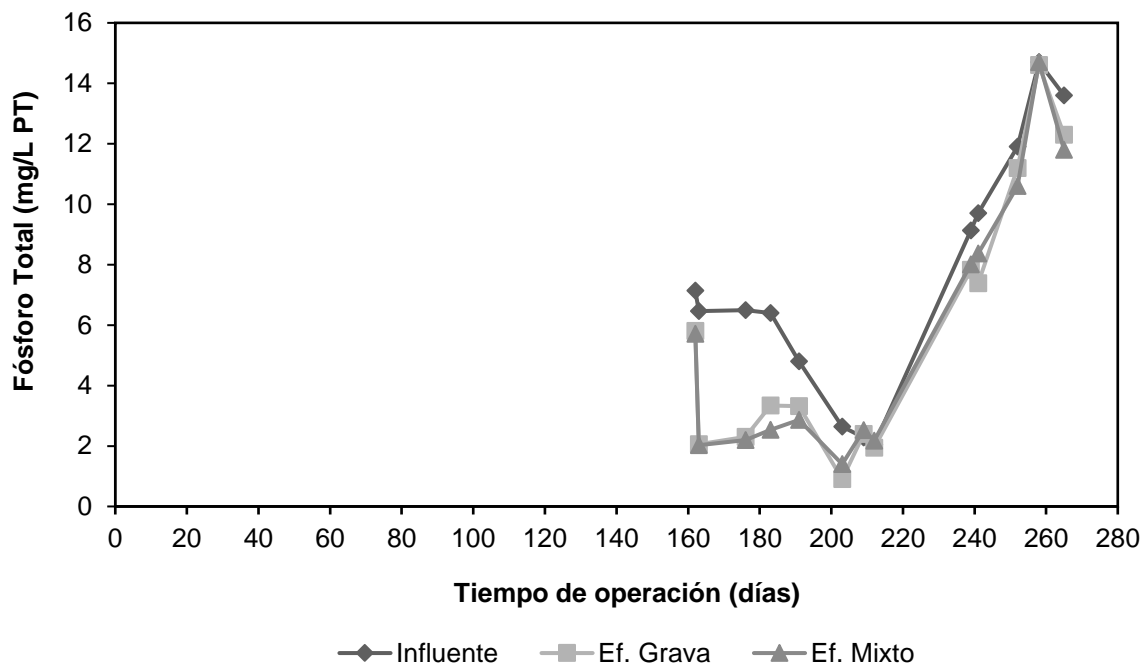


Figura 24. Fosfatos en el influente y los efluentes de los HA-FHSS.

El fósforo total presentó eficiencias de remoción (Figura 26), con un promedio de 26.9 % para el HA-FHSS con grava y 25.79 % para el humedal con grava y vermiculita. Estas eficiencias son bajas según lo reportado por Yalcuk (2009) en donde se reportan rangos de remoción del 26 – 61 % en promedio para humedales de tipo horizontal subsuperficial.

Los principales mecanismos de remoción de fósforo en HA son: absorción en la biomasa vegetal y microbiana, precipitación de compuestos insolubles y adsorción en el medio poroso (Calijuri et al., 2009). Brix et al. (1994) sugieren que la adsorción sea el mecanismo predominante, pero este es susceptible de saturación. Con base en esto, se puede mencionar que para este parámetro en particular la grava presenta una mejor capacidad de adsorción de fósforo.



Fósforo Total (mg/L PT)	Influyente	Efluente Grava	Efluente Mixto	% Remoción EG	% Remoción EM
Promedio	7.48	5.8	5.76	26.90	25.79
Desviación estándar	±4.16	±4.51	±4.47	±26.27	±27.55

Figura 25. Fósforo total en el influente y efluentes de los HA-FHSS.

#### 7.2.4 Análisis estadístico ANOVA

Se realizó un análisis de la varianza ANOVA, para determinar si existió diferencia significativa entre los medios porosos utilizados.

Con los valores promedios obtenidos para los parámetros analizados (temperatura, pH, conductividad eléctrica, turbidez, alcalinidad, DQO, nitratos, amonio y fosforo total) de cada humedal, se realizó la ANOVA, en donde la hipótesis nula fue que las medias de los resultados obtenidos por ambos HA-FHSS serían iguales.

Tabla 6. Resumen de la varianza entre los efluentes de los HA-FHSS

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Medio poroso simple	10	1527.53	152.753	146615.983
Medio poroso mixto	10	1505.83	150.583	151282.406

**Tabla 7. Análisis de Varianza de los efluentes de los HA-FHSS con diferente medio poroso.**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	23.5445	1	23.5445	0.00015807	0.9901070	4.41387341
Dentro de los grupos	2681085.505	18	148949.1947			
Total	2681109.049	19				

El análisis estadístico dio un valor para F calculada de 0.00015807, este valor es menor al valor crítico de 4.41387341 (Tabla 7), por lo tanto, la hipótesis nula es aceptada, no existe diferencia significativa entre los promedios de los resultados obtenidos para cada humedal, los medios porosos utilizados presentan un comportamiento similar.

### **7.2.5 Comparación de los resultados obtenidos con las normas oficiales mexicanas vigentes**

Los resultados obtenidos se compararon con las normas oficiales mexicanas vigentes NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, con la finalidad de corroborar que el agua tratada mediante los humedales artificiales cumple con los límites máximos permisibles.

Puede observarse que el pH y temperatura cumple lo propuesto en las normas, debido a que en el RAFA se ajustaba el pH manteniéndolo cercano a la neutralidad, se trabajó a temperatura ambiental en un rango de temperaturas psicrófilas (10 – 20 °C).

Algunos parámetros como turbiedad, conductividad eléctrica y alcalinidad no son considerados en las normas oficiales mexicanas.

La DQO cumplió con el límite máximo permitido para descarga en drenaje y alcantarillado.

Las formas nitrogenadas se analizaron para valorar la eficiencia de remoción del humedal construido aun cuando la normatividad en México no es muy estricta en estos parámetros.

La concentración de Nitrógeno total y fosforo total cumple con los limites permisible para descarga en bienes nacionales, drenaje y alcantarillado.

**Tabla 8. Resultados obtenidos y su comparación con las normas oficiales mexicanas**

Parámetro	Unidades	Límites máximos permisibles				
		Efluente con medio poroso simple	Efluente con medio poroso mixto	Bienes nacionales (DOF, 1997)	Drenaje y/o alcantarillado (DOF, 1998a)	Reúso al público (DOF, 1998b)
pH		8.17 ±0.37	8.16 ±0.37	5 – 10	5.5 – 10	N/A
Temperatura	(°C)	14.84 ±2.29	14.82 ±2.41	40	40	40
Conductividad eléctrica	(mS/cm)	1.89 ±0.73	1.89 ±0.71	N/A	N/A	N/A
Turbiedad	(UNT)	29.52 ±23.09	23.30 ±16.37	N/A	N/A	N/A
SST	(mg/L)	11.08 ±11.47	11.08 ±11.47	<40-200 (R) <75-125 (S)	40 (P.M); 60 (P.D)	20 (C.D) 30 (C.I)
SSV	(mg/L)	9.48 ±8.89	9.48 ±8.89	N/A	N/A	N/A
Alcalinidad	(mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	1228.51 ±381.6	1248.11 ±387	N/A	N/A	N/A
DQO	(mg/L)	203.64 ±178	169.45 ±164	N/A	500	N/A
DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	33.82 ±44.55	32.27 ±47.1	<30-200 (R) <75-150 (S)	<75 (PM); <150 (P.D)	20 (C.D) 30 (C.I)
Nitrógeno Total <sup>1</sup>	(mg/L)	13.88 ±6	11.1 ±8	< 40 (P.M) (R) < 60 (P.D) (S)	N/A	N/A
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(mg/L)	1.61 ±2.91	1.48 ±2.81	N/A	N/A	N/A
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(mg/L)	31.12 ±22	30.47 ±21	N/A	N/A	N/A
Fósforo total	(mg/L)	2.43 ±0.74	2.39 ±0.53	<5-30 (R) N/A (S)	30 (P.D)	N/A

P.D= Promedio Diario, P.M = Promedio Mensual.

<sup>1</sup> La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece que el nitrógeno total es la suma de NTK + Nitrato + Nitrito

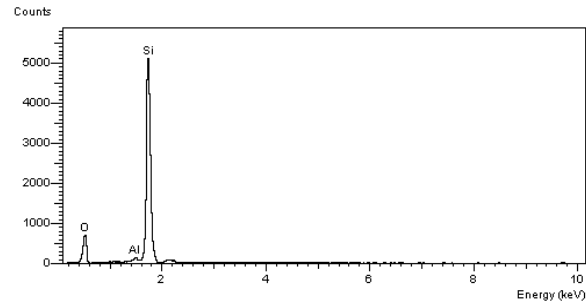
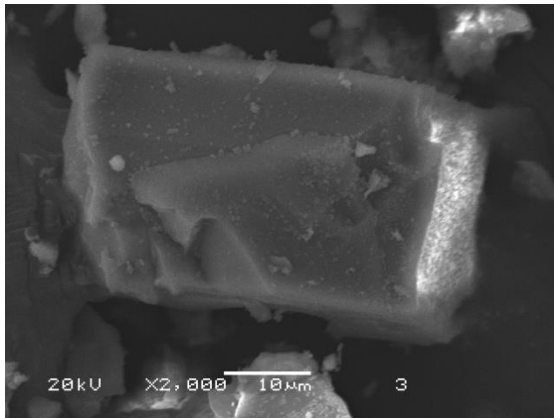
SST= Sólidos Suspendidos Totales, SSV= Sólidos Suspendidos Volátiles, N/A= No aplica, R= Ríos, S= Suelos, C.D= Contacto Directo, C.I= Contacto Indirecto, DQO= Demanda química de oxígeno, DBO<sub>5</sub>= Demanda bioquímica de oxígeno, NTK= Nitrógeno Total Kjeldahl, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = Nitrógeno de Nitratos; N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = Nitrógeno amoniacal; N/A= No aplica, R= Ríos, S= Suelos, C.D= Contacto Directo, C.I= Contacto Indirecto, P.D= Promedio Diario, P.M = Promedio Mensual.

### **7.2.6 Análisis químico elemental de los medios porosos**

Los resultados de las muestras iniciales de la grava indican la presencia de elementos mayoritarios como: oxígeno, silicio y aluminio. Los resultados de la muestra inicial de vermiculita indican que los elementos mayoritarios fueron: oxígeno, silicio, magnesio, aluminio y hierro. Se encontraron elementos como el titanio y el cromo en niveles trazas, lo que indica que la vermiculita contenía impurezas.

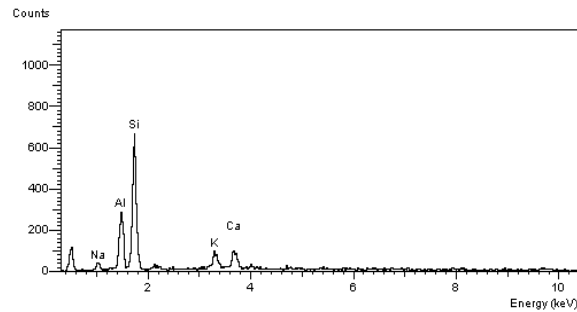
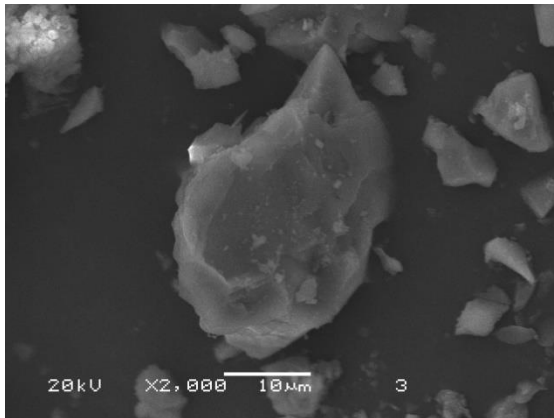
Los resultados obtenidos del análisis por microscopía y espectrometría muestran que hubo un intercambio iónico entre los medios porosos y el agua residual tratada. Lo anterior, se atribuye a la presencia de los elementos de sodio y de hierro en las muestras de los medios porosos al final de la etapa experimental (Figuras de la 26 a la 34).

Los medios porosos no se vieron afectados en su composición química, al mantenerse los iones mayoritarios en porcentajes similares al inicio y final de la etapa experimental (300 días). Lo anterior constata el uso de la grava y la vermiculita como medios porosos en este tipo de sistemas (Wu et al., 2015, Soon-An, 2010).



Elemento	%	Sigma (%)
O	41.5	0.5
Si	57.6	0.5
Al	0.8	0.1

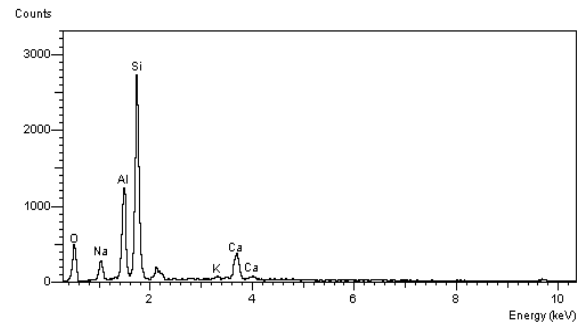
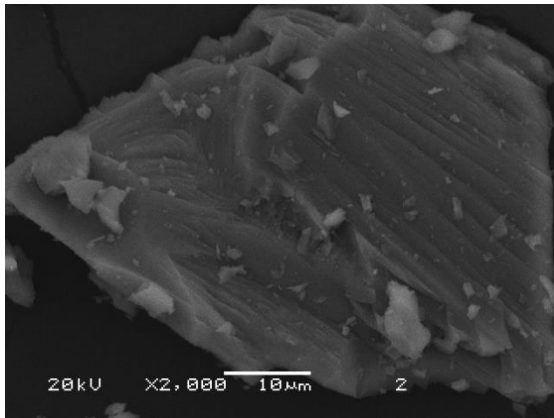
1a) Grava de 3/4 de pulgada.



Elemento	%	Sigma (%)
O	36.6	1.3
Si	35.1	0.9
Al	12.5	0.5
Ca	7.8	0.6
K	5.4	0.5
Na	2.7	0.3

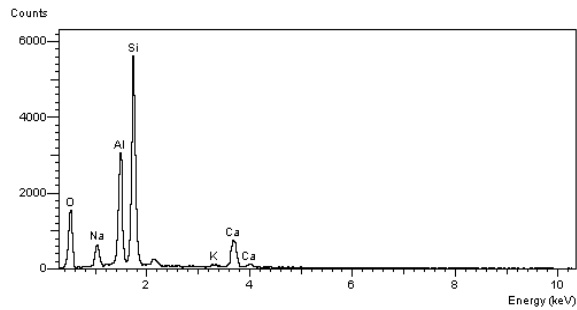
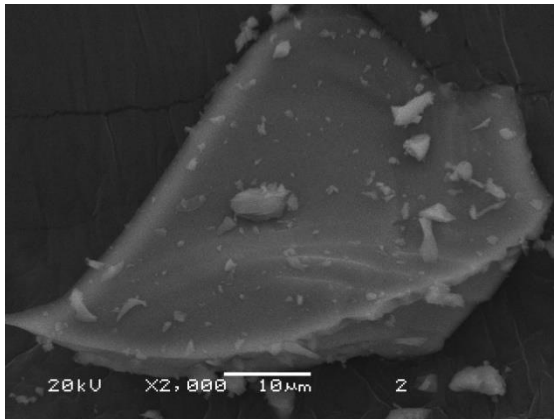
1b) Grava de 3/4 de pulgada.

**Figura 26.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 3/4 de pulgada al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	37.2	0.6
Si	39.9	0.5
Al	14.5	0.3
Ca	7.8	0.3
K	0.5	0.2

2a) Grava de 1/2 pulgada.

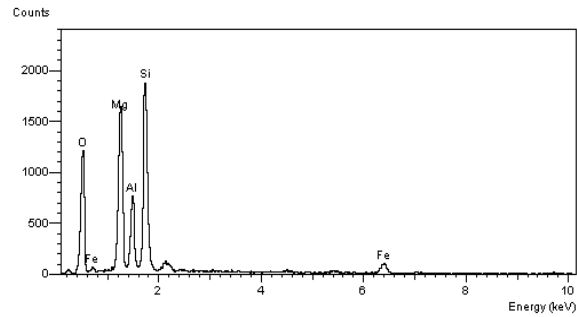
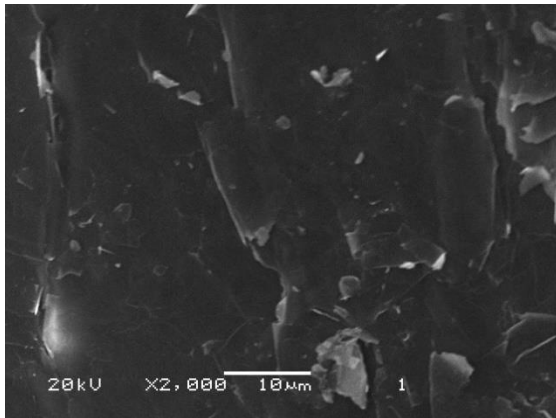


Elemento	%	Sigma (%)
O	44.2	0.4
Si	33.2	0.3
Al	15.2	0.2
Ca	6.9	0.2
K	0.5	0.1

2b) Grava de 1/2 pulgada.

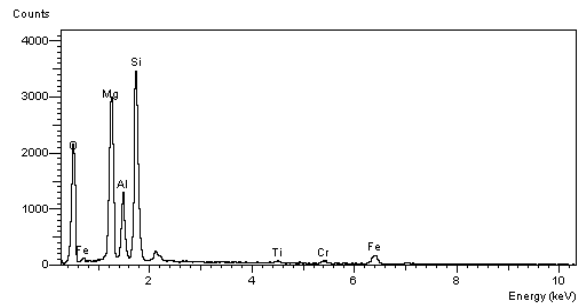
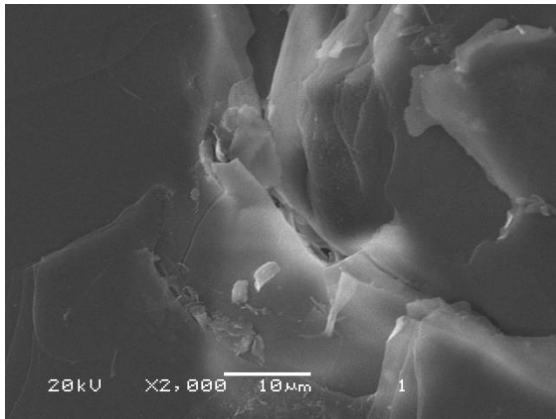
**Figura 27.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.





Elemento	%	Sigma (%)
O	44.9	0.5
Si	23.9	0.3
Al	8.8	0.2
Mg	18.2	0.3
Fe	4.3	0.3

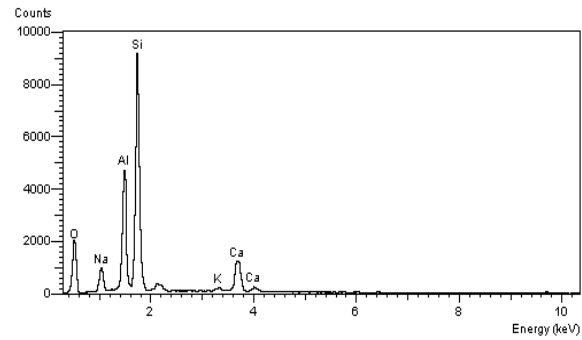
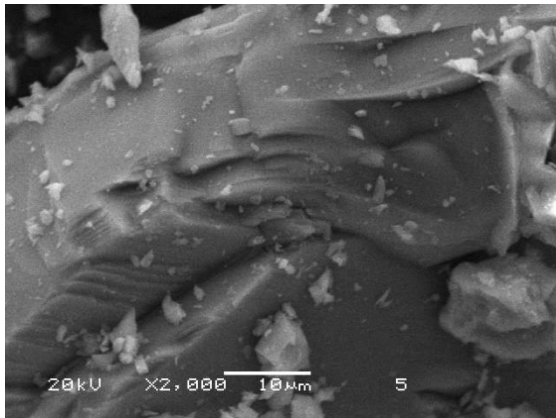
3a) Vermiculita.



Elemento	%	Sigma (%)
O	46.8	0.7
Al	8.0	0.2
Si	22.6	0.3
Mg	17.8	0.3
Fe	3.7	0.2
Cr	0.7	0.1
Ti	0.4	0.1

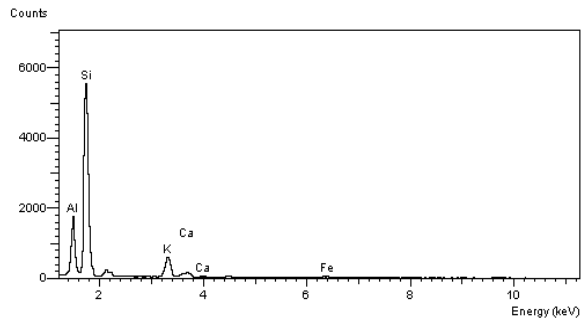
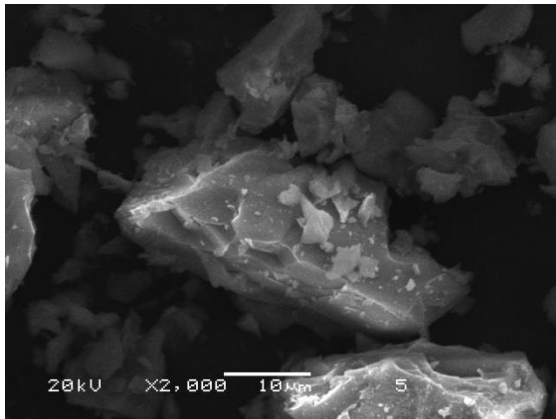
3b) Vermiculita.

**Figura 28.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la vermiculita al inicio de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	38.0	0.3
Si	34.6	0.2
Al	14.8	0.1
Ca	7.4	0.1
K	0.6	0.1
Na	4.6	0.1

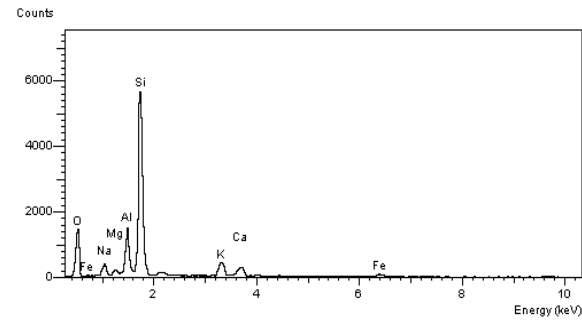
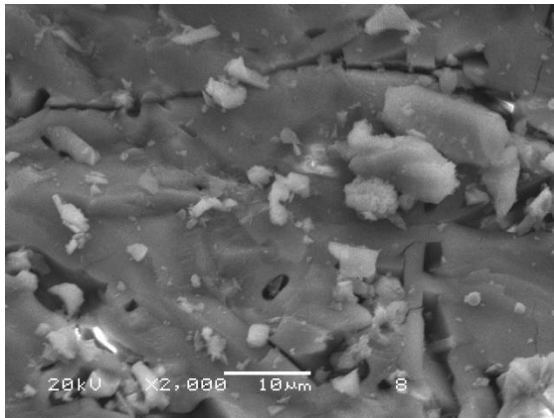
4a) Grava de 1/2 pulgada de la superficie del humedal simple.



Elemento	%	Sigma (%)
O	41.5	0.4
Si	36.7	0.3
Al	9.9	0.2
Ca	1.3	0.1
K	5.8	0.2
Na	3.8	0.1
Fe	1.0	0.2

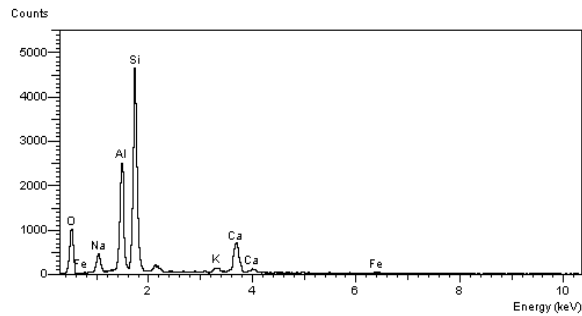
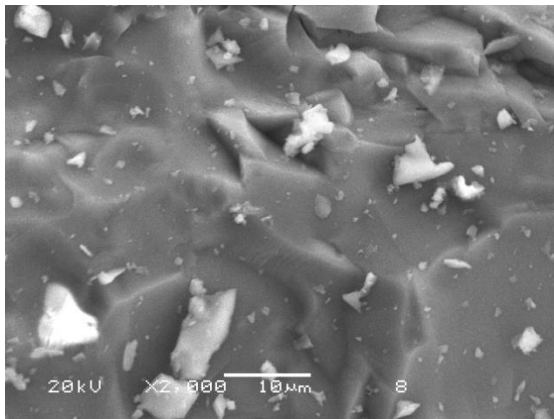
4b) Grava de 1/2 pulgada de la superficie del humedal simple.

**Figura 29.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal simple al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	43.0	0.4
Si	35.7	0.3
Al	8.2	0.2
Ca	2.9	0.1
K	4.1	0.1
Na	3.2	0.1
Fe	1.8	0.2
Mg	1.1	0.1

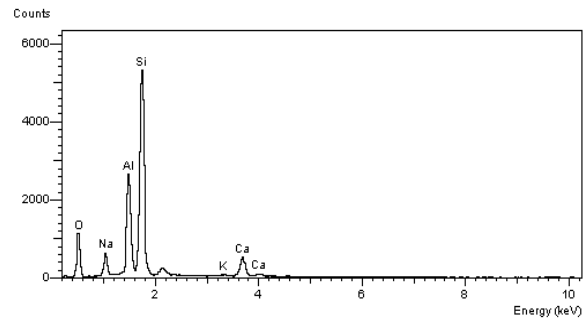
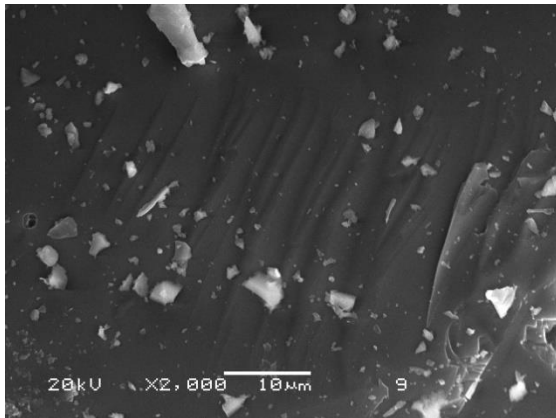
5a) Grava de 1/2 pulgada a 8 cm de profundidad del humedal simple.



Elemento	%	Sigma (%)
O	37.7	0.5
Si	33.9	0.3
Al	15.1	0.2
Ca	7.5	0.2
K	1.1	0.1
Na	4.1	0.1
Fe	0.6	0.2

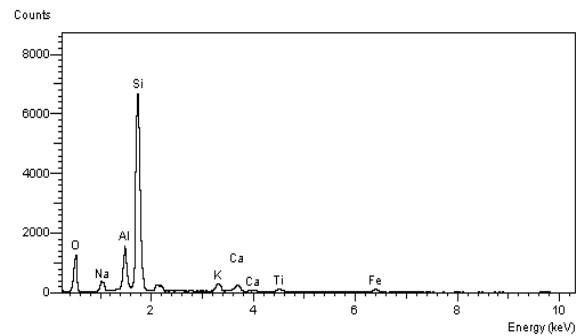
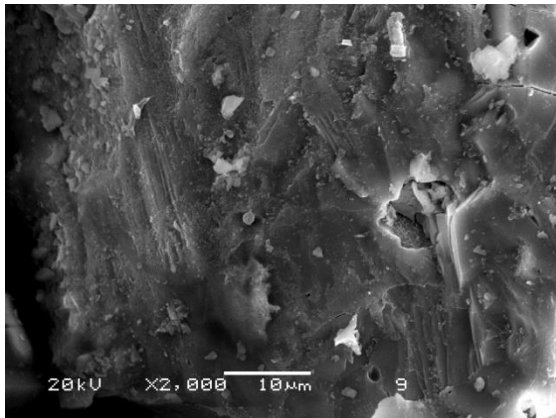
5b) Grava de 1/2 pulgada a 8 cm de profundidad del humedal simple.

**Figura 30.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada a 8 cm de profundidad del humedal simple al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	37.1	0.4
Si	36.8	0.3
Al	14.9	0.2
Ca	5.4	0.2
K	0.4	0.1
Na	5.4	0.1

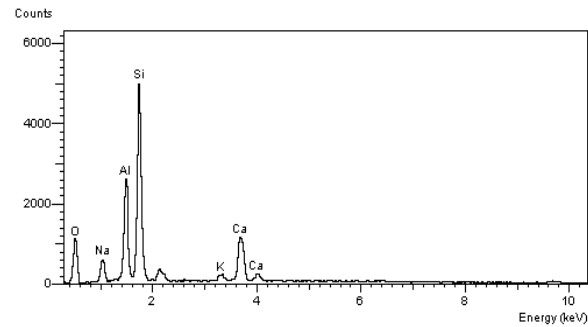
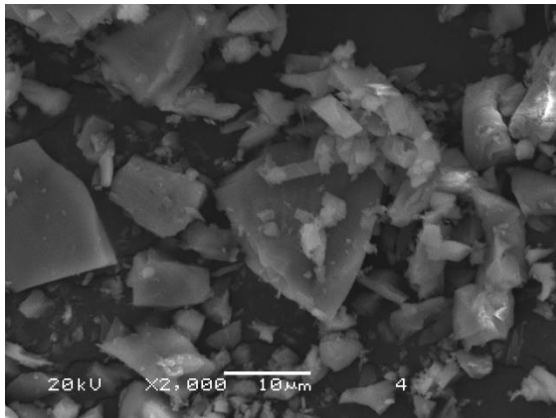
6a) Grava de 1/2 pulgada a 15 cm de profundidad del humedal simple.



Elemento	%	Sigma (%)
O	38.3	0.5
Si	41.4	0.4
Al	8.6	0.2
Ca	2.2	0.1
K	2.6	0.1
Na	3.3	0.1
Fe	2.3	0.2

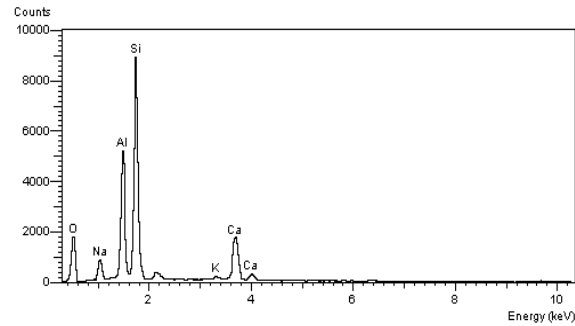
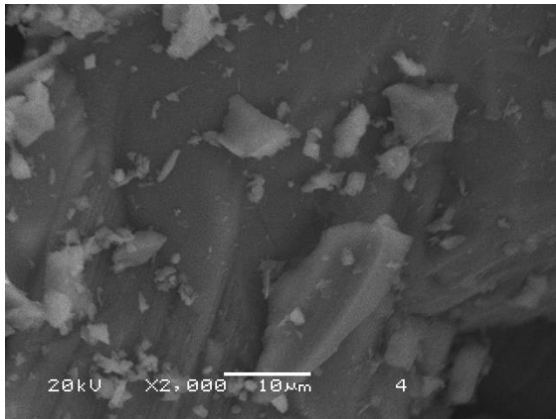
6b) Grava de 1/2 pulgada a 15 cm de profundidad del humedal simple.

**Figura 31.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada a 15 cm de profundidad al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	38.2	0.4
Si	31.0	0.3
Al	13.6	0.2
Ca	11.2	0.2
K	1.3	0.1
Na	4.8	0.1

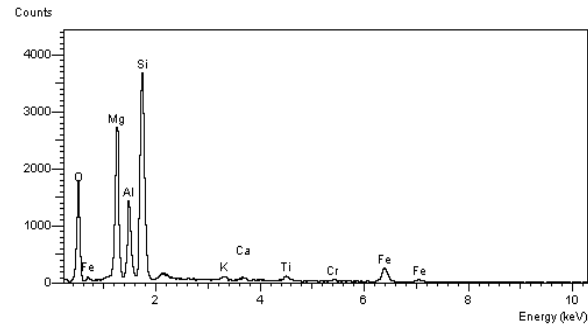
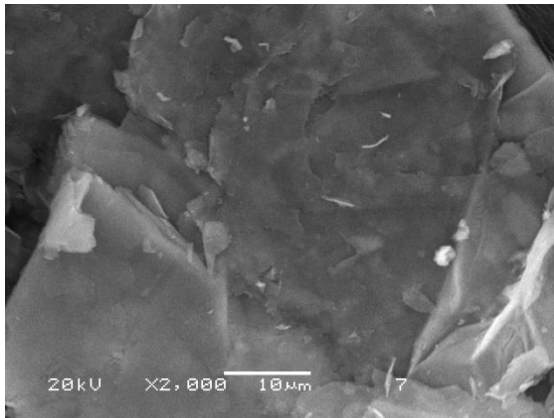
7a) Grava de 1/2 pulgada de la superficie del humedal mixto.



Elemento	%	Sigma (%)
O	36.9	0.3
Si	32.6	0.2
Al	15.8	0.1
Ca	10.2	0.1
K	0.5	0.1
Na	4.1	0.1

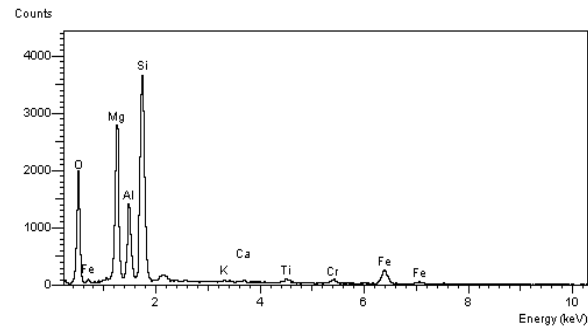
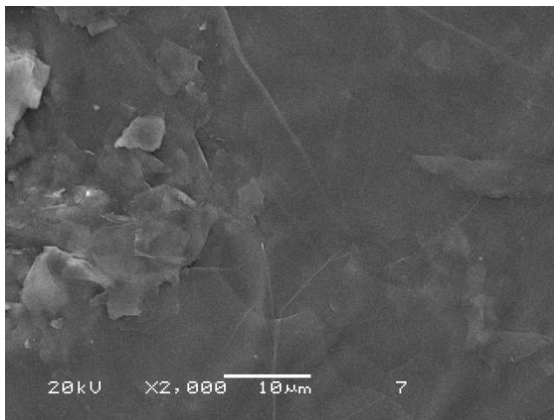
7b) Grava de 1/2 pulgada de la superficie del humedal mixto.

**Figura 32.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 1/2 de pulgada de la superficie del humedal mixto al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	42.9	0.7
Si	23.9	0.3
Al	8.9	0.2
Mg	16.3	0.3
Fe	5.8	0.3
Cr	0.4	0.1
Ti	1.0	0.1
K	0.6	0.1
Ca	0.4	0.1

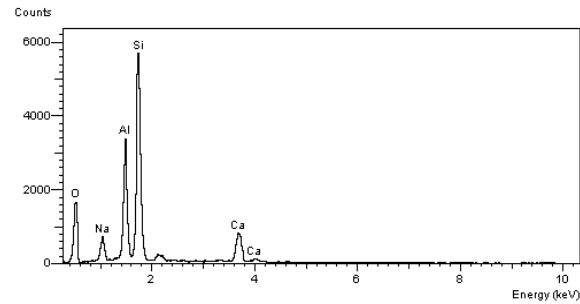
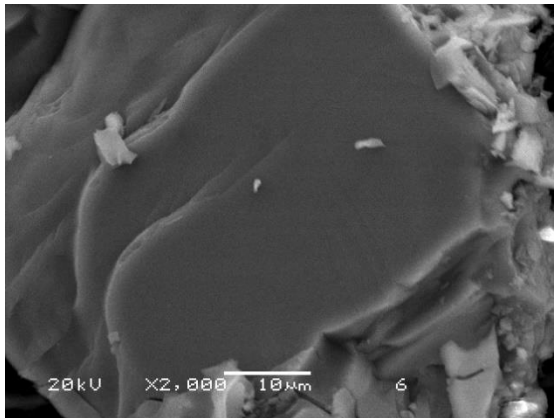
8a) Vermiculita del humedal mixto.



Elemento	%	Sigma (%)
O	43.8	0.7
Si	23.2	0.3
Al	8.8	0.2
Mg	16.4	0.3
Fe	5.6	0.2
Cr	1.0	0.1
Ti	0.8	0.1
K	0.2	0.1
Ca	0.2	0.1

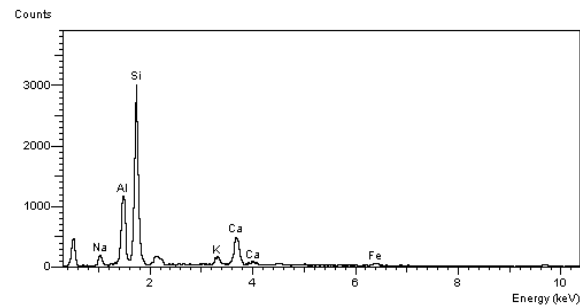
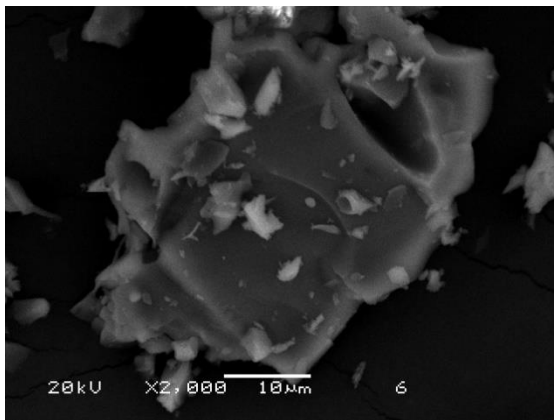
8b) Vermiculita del humedal mixto.

**Figura 33.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la vermiculita al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.



Elemento	%	Sigma (%)
O	41.9	0.4
Si	31.6	0.3
Al	15.3	0.2
Ca	6.7	0.1
Na	4.6	0.1

9a) Grava de 3/4 de pulgada del humedal mixto.



Elemento	%	Sigma (%)
O	34.4	0.6
Si	36.8	0.5
Al	12.6	0.3
Ca	9.5	0.3
Na	2.9	0.2
Fe	1.3	0.3

9b) Grava de 3/4 de pulgada del humedal mixto.

**Figura 34.** Microscopía electrónica de barrido y análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa de la grava de 3/4 de pulgada del humedal mixto al final de la etapa experimental. Los incisos a y b representan que la muestra se analizó por duplicado.

## 8. Conclusiones

- Los resultados obtenidos para este estudio indican que un Humedal Artificial de Flujo Horizontal Subsuperficial es un sistema económico y efectivo para la depuración del efluente de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente que todavía tiene materia orgánica y nutrientes.
- La turbidez del agua residual se eliminó eficientemente en ambos humedales, el agua del efluente del RAFA se clarificó a su paso por los HA-FHSS.
- Los HA-FHSS fueron eficientes en términos de la remoción de la materia orgánica remanente proveniente del RAFA y aunque no se lograron mantener concentraciones de DQO constantes en el influente de los humedales, estos fueron capaces de soportar las variaciones y flujos picos, el promedio de remoción para este parámetro en el HA-FHSS con medio poroso simple fue de 72.5 %, mientras que para el HA-FHSS con medio poroso mixto fue ligeramente más alta 77.33 %.
- De las especies nitrogenadas determinadas en este experimento (nitratos, amonio y nitrógeno total), los nitratos fueron la forma de nitrógeno removida eficientemente en ambos HA-FHSS, 69 % con el medio poroso simple y 74 % con el medio poroso mixto. Esto tiene una relación directa con los procesos de nitrificación/desnitrificación, en el tipo de humedal utilizado (Horizontal de flujo subsuperficial) los procesos y zonas anaerobias prevalecen y por consiguiente los procesos de desnitrificación. Además de que esta forma de nitrógeno es la utilizada por la vegetación para su asimilación como nutriente.
- El amonio no presentó remociones y en algunas ocasiones aumentó este parámetro al final del tratamiento. Debido principalmente a que la nitrificación es un proceso que no se ve favorecido en este tipo de humedales utilizados (HA-FHSS).
- Para el fósforo, las formas de fosfatos no fueron removidas con los HA-FHSS y de la misma manera que para amonio algunas veces aumentaron su concentración después del tratamiento.



- El fósforo total obtuvo remociones bajas alrededor del 25 % en ambos humedales. La remoción de este parámetro está relacionada con el medio poroso, ya que los mecanismos por los que principalmente puede ser removido es la adsorción en el medio y precipitación a través de su paso por los humedales.
- A pesar de que en el HA-FHSS con el medio poroso mixto alcanzo remociones ligeramente más altas, el análisis estadístico ANOVA determina que no existió diferencia significativa entre los dos humedales utilizados. En este trabajo experimental la hipótesis planteada no es cumple, pues lo medios porosos utilizados tuvieron un desempeño muy similar.
- La depuración del efluente del RAFA en los HA-FHSS fue exitosa, se obtuvo un agua tratada que cumple con los límites máximos permitidos para descarga en bienes nacionales, drenaje y alcantarillado.
- La vegetación (*Chlorophytum comosum*) utilizada en los HA-FHSS resistió las condiciones de inmersión y el tipo de agua residual, las plantas se mantuvieron verdes y creciendo a lo largo de los 300 días de operación, se recomienda se siga estudiando su aplicación en estos sistemas y la remoción de otros contaminantes.

## 9. Recomendaciones a trabajos futuros

- Se recomienda realizar análisis de cationes mayoritarios ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y diagramas de especiación, para poder determinar las posibles interacciones con el fósforo presente en el agua.
- Se sugiere realizar experimentos posteriores en los que se logre mantener la concentración de DQO lo más constante posible.
- Debido a la nula remoción del amonio, se sugiere diseñar y construir un humedal vertical, posterior a los humedales horizontales, pues se ha comprobado que estos son eficientes en la remoción de amonio.
- En este trabajo experimental no se realizaron estudios específicos para la vegetación utilizada, y en vista de que esta especie fue resistente a los factores adversos a los que fue sometida, se recomienda seguir investigando su aplicación en HA y realizar estudios específicos (raíz) de la especie.

## 10. Referencias bibliográficas

- Akratos, C.S., Papaspyros, J. N., Tshrintzis, V.A. (2009). Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: use of artificial neural networks and development of a design equation. *Bioresour. Technol.* 100, 586-596.
- Albuquerque, A., Oliveira, J., Semitela, S., Amaral, L. (2009). Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Technol* 100, 6269-6277.
- Alcaraz, S. (2015). Efecto de temperatura y sustrato sobre la actividad metanogénica específica de un lodo anaerobio psicrófilico. Tesis de maestría, CIRA. Facultad de ingeniería, UAEM. México.
- Alvarez, J., Ruiz I., Soto M. (2008). Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 33(1), 54-67.
- Arias, A. C., Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 13, 17-24.
- Badhe, N., Saha, S., Biswas, R., Nandy, T. (2014). Role of algal biofilm in improving the performance of free surface, up-flow constructed wetland. *Bioresour. Technol.* 169, 594-604.
- Cervantes-Carrillo, F., Pérez, J. y Gómez, J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Rev. Latinoam. Microbiol.* 42, 73-82.
- Cheng, L.L., Lee, H.Y., Lin, J.H., Chou, M.X. (2010). Treatment of mixture of sewage and partially treated swine wastewater by a combination of UASB and constructed wetlands. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive waste management*, 14(4), 234-239.
- Chong, H.L., Chia, P.S., Ahmad, M.N. (2013). The adsorption of heavy metal by bornean oil palm Shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresour. Technol.* 130, 181-186.

- CONAGUA (2015). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., Shutes, R.B.E. (1996). Reed beds and Constructed wetlands for wastewater treatment. WRc Publications, Medmenham, Marlow. UK.
- Cui, L., Ouyang, Y., Lou, Q., Yang, F., Chen, Y., Zhu, W., Luo, S. (2010). Removal of nutrients from wastewater with *Canna indica* L, under different vertical-flow constructed wetland conditions. *Ecol. Eng.* 36, 1083-1088.
- DOF (1997). NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes de las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- DOF (1998a). NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- DOF (1998b). NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- Estrada, Y. I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Tesis de ingeniería, Facultad de Química. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- García, M.C. (2015). Estudio del crecimiento de plantas y evaluación de la capacidad de remoción de contaminantes en aguas residuales mediante microcosmos de humedales artificiales. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Veracruzana. Veracruz; México.
- Greenway, M., Woolley, A. (2001). Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland, Cairns, Australia. *Water Sci, Technol.* 44, 303-310.
- Harrington, C., Scholz, M. (2010). Assessment of pre-digested piggery wastewater treatment operations with surface flow integrated constructed wetland systems. *Bioresource, Technology.* 101, 2228-2234.
- Kadlec, R. H., Knight, R. L. (1996). *Treatment wetlands.* CRC Press, Florida, EUA, 928 pp.

- Kadlec, R.H., Wallace, S.D. (2009). Treatment wetlands, 2<sup>nd</sup> edition CRC Press, Boca Raton.
- Kaur, S. (2015). Volatile organic compounds prevalence and their removal in indoors of Mumbai City. 12<sup>th</sup> International Conference, International Phytotechnology Society. [https://conferences.k-state.edu/phytotech2015/files/2015/09/80333-IPC-Abstract\\_Final-1hbwavr.pdf](https://conferences.k-state.edu/phytotech2015/files/2015/09/80333-IPC-Abstract_Final-1hbwavr.pdf).
- Kong, Y., Wang, Z., Gu, Y.J., Xiong, F., Chen, J., Zhang, C.L. (2009). Observations on the structure of *Chlorophytum comosum* roots under soil and water culture. Acta Horticulturae Sinica, 36 (4): 533-538.
- Lara, B. J. A., (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona, 49-74.
- Lettinga, G., Velsen, A., Hobma, S., Zeeuw, E., Klapwijk, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22(4), 699-734.
- Liu, W.J., Zeng, F.X., Jiang, H., Yu, H.Q., (2011). Total recovery of nitrogen and phosphorus from three wetland plants by fast pyrolysis technology. Bioresour. Technol. 102, 3471-3479.
- Metcalf and Eddy. (2004). Wastewater engineering treatment and reuse, 4<sup>a</sup>. Ed. McGraw-Hill, Nueva York, EUA, 1819 pp.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G. (2007). Wetlands, 4<sup>a</sup> Ed. John Wiley and Sons, Inc, Nueva York, EUA, 582 pp.
- Ortiz, M., Cuevas, G. (2014). Estabilización de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas, biofiltro-humedal. 2do Simposio internacional de bioingeniería ambiental. Guanajuato, México.
- Qianqian, Z., Xianyong, H., Zhangli, H., Hong, X. (2012). Treatment of industrial wastewater with plant composite bed technology. Journal Environmental Chemistry (07).
- Reed, S.C., (1990). Natural Systems for wastewater treatment, Manual of practice FD-16, Water Pollution Control Federation (WEF), Alexandria, VA.

- Saeed, T., Sun, G., (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *J. Environ. Manage.* 112, 429-448.
- Santianes, M.C., Crespi, S. N., Jimenez, J.A.C. (2008). Utilización de biogás en pilas de combustible. CIEMAT.
- Seidel, K., (1976). Macrophytes and water purification. In Tourbier, J. & R. W. Pierson, *Biological control of water pollution*. Pennsylvania University Press, Philadelphia, PA: 109-122.
- Soon-An, O., Katsuhiko, U. Daisuke, I., Yuji, I., Kazuaki, Y. (2010). Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants. *Bioresource Technology.* 101 (19), 7239-7244.
- Torres, B.A.X., Zurita, M.F., (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33 (1), 37-47.
- Truu, M., Juhanson, J., Truu, J. (2009). Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of The Total Environment.* 407 (13), 3958-3971.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Engin.* 18, 633-646.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment.* 380 (1-3), 48-65.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., (2008). *Wastewater treatment in Constructed wetlands with horizontal subsurface flow*. Springer, Dordrecht.
- Vymazal, J., (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia* 674, 133-156.
- Vymazal, J., (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewater: a review. *Ecol. Eng.* 73, 724-751.

- Wang, Y.B., Wang, N., Wu, D. (2011). Research on effect of copper on *Chlorophytum comosum* soil system. African Journal of Biotechnology. 10(65).
- Wo, J. X., Luan, H.F., Wang, G.F. (2012). Research on the hydroponic induction technology of bracket plants roots. J Anhui Agri Sci, 40 (10).
- Wu, H., Zhang, J., Wei, R., Liang, S., Li, C., Xie, H. (2013). Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes. Environ. Sci. Pollut. Res. 20, 443-451.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H.H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. Bioresource Tech. 175, 594-601.
- Yalcuk, A., Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. Bioresour. Technol. 100, 2521-2526.
- Yan, Y., Xu, J. (2014). Improving Winter performance of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern China: a review. Wetlands 34, 243-253.
- Yu, G., Tan, M., Chong, Y., Long, X. (2015). Spatial variation of phosphorous retention capacity in subsurface constructed wetlands: effect of wetland type and inflow loading. Plos One 10(7).
- Zhang, D.Q., Jinadasan, K.B., Gersberg, R.M., Liu, Y., Tan, S.K., Jern, W. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000-2013). J. Environ. Manag. 30, (30-46).
- Zhao, X. G., Zhang, N., Shu, H., Liu, N. (2014). Study on the purification effect of *Chlorophytum comosum* on indoor Formaldehyde. Applied Mechanics and Materials. 675-677.
- Zurita, F., De Anda, J., Belmont, M.A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Ecol. Eng. 35 (5), 861-869.

**11. Anexo**

**Registro fotográfico de la vegetación en los HA-FHSS.**

Día de operación: 1



Día de operación: 52

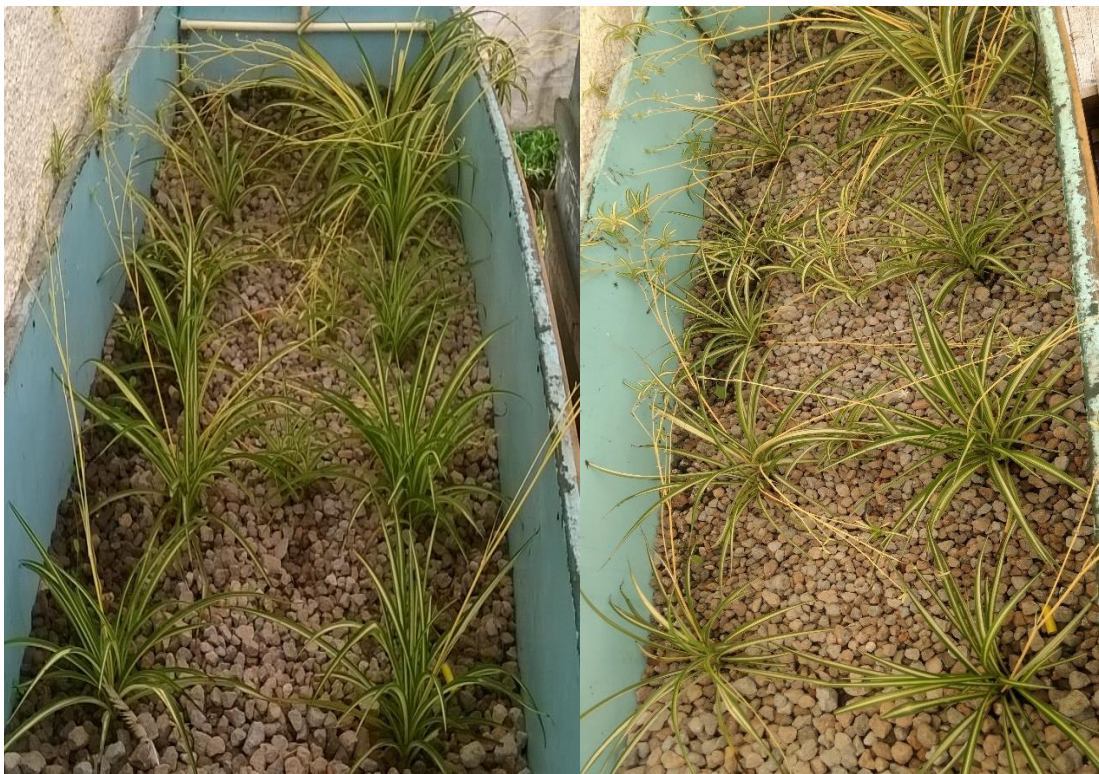




Día de operación 140



Día de operación: 280





En todas las fotografías la imagen de la izquierda corresponde al HA-FHSS con medio poroso simple (grava), imagen derecha HA-FHSS con medio poroso mixto (grava y vermiculita).

Se observa una adaptación de la vegetación a las condiciones de plantación, los especímenes crecieron, se mantuvieron verdes y la mayoría de ellos florecieron, observándose pequeñas flores blancas en los retoños nuevos de las plantas.

Las siguientes fotografías se tomaron para una planta en específico al inicio y al final de la etapa experimental. Fotografía de la izquierda tomada en el momento de la plantación en el medio poroso. Fotografía de la derecha se tomó al final de los 300 días de operación. Se observa un evidente crecimiento en las raíces, raíces más gruesas que se extienden a través del medio poroso.

