



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN SISTEMA DE HUMEDALES
ARTIFICIALES A NIVEL PROTOTIPO QUE RECIBE AGUAS RESIDUALES
DE UN PLANTEL EDUCATIVO

T E S I S

QUE PARA OBTENER SU TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

NADIA GABRIELA BORREGO SARÁCHAGA

MÉXICO, D. F.,

2015





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

Vocal: Landy Irene Ramírez Burgos

Secretario: Rolando Salvador García Gómez

1^{er} suplente: Alfonso Durán Moreno

2^o suplente: Marisela Bernal González

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM y Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur). Calle Cataratas y Llanura S/N. Coyoacán, Jardines del Pedregal, 04500 Ciudad de México, D.F.

Asesor del tema:

Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa _____

Supervisor técnico:

Dra. Marisela Bernal González _____

Sustentante:

Nadia Gabriela Borrego Saráchaga _____

Reconocimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), mi casa de estudios, que mediante su personal docente y sus herramientas, me ha ayudado en mi formación académica

A la Facultad de Química, por enseñarme a luchar siempre por lo que quiero no importando el esfuerzo que hay que hacer para lograrlo

A los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental por abrirme las puertas para la realización de mi tesis

Al Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur), por brindarme la oportunidad de realizar mis muestreos siempre que lo necesitaba

Al Subprograma 127 Formación Básica de Investigadores por la ayuda otorgada para la realización de mi tesis profesional

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo y por interesarse siempre en mi progreso

A la Dra. Marisela Bernal González por la confianza y paciencia brindadas a lo largo de mi trabajo y por brindarme todos los recursos necesarios

Reconocimientos institucionales

El humedal artificial objeto de esta investigación fue construido con el apoyo conjunto de los proyectos INFOCAB, Iniciativa para Fortalecer la Carrera Académica en el Bachillerato de la UNAM, a cargo del Prof. Q. Agustín Arreguín Rojas, un profesor y maestro en toda la acepción de la palabra, quien con gran empuje y dedicación dirigió los dos proyectos claves SB201608 “Instalación de un humedal con estrategias dinámicas de apoyo a los programas de Biología y Química del Bachillerato de la UNAM” y PB201312 “Desarrollo de actividades didácticas, ecológicas y técnicas del humedal artificial del CCH Sur de apoyo a las asignaturas de Biología, Química y Opciones Técnicas del bachillerato UNAM” que permitieron alcanzar esta magna obra

Se agradece también el decidido apoyo de las autoridades del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, el Director del Plantel el Lic. Jaime Flores Suaste y ahora el Maestro Luis Aguilar Almazán, los responsables del Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación, SILADIN, Biol. Sabel René Reyes Gómez y ahora el Ing. José Marín González y el siempre bienvenido apoyo del Biol. Narciso José Ruiz Cárdenas

La Dirección General de Obras y Conservación, en particular la Dirección de Obras Externas a cargo del Ing. Xavier Palomas Molina, a quien se reconoce su valioso e incansable apoyo para llevar a cabo una parte importante de la construcción del humedal en sustitución del humedal artificial de flujo vertical que se encontraba en las instalaciones ahora ocupadas por los edificios del Posgrado de la UNAM

Reconocimientos institucionales

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM. Los reactivos, consumibles y materiales empleados en esta investigación fueron adquiridos con el apoyo financiero parcial del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) dentro del proyecto con clave IN11811 con título “Identificación de bacterias metanogénicas y sulfatorreductoras en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C” y de los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME), “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, “Apoyo a la enseñanza experimental de las asignaturas terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM” y “Desarrollo de material didáctico para las asignaturas ingeniería ambiental y estancia académica de la carrera de ingeniería química con base en estudios de caso” Claves EN103704, PE101709 y PE-100514, respectivamente, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, DGAPA, y del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067.

Las empresas Tecnología Intercontinental, TICSA, INVENTEC, S.A. de C.V. y CONDIMARQ, S.A. de C.V. apoyaron altruistamente en especie, servicios técnicos especializados y donativos de equipos y materiales allanando el camino para la construcción, instalación, arranque y operación del humedal. El Prof. Dr. Salvador Alejandro Sánchez Tovar fue el principal apoyo para este decidido apoyo empresarial por su gran dedicación y entrega a la docencia en el bachillerato

y

Los reactivos, materiales y otros insumos para esta tesis experimental fueron obtenidos de los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, PAPIIME, “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, “Apoyo a la enseñanza experimental de las asignaturas terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM” y “Desarrollo de material didáctico para las asignaturas ingeniería ambiental y estancia académica de la carrera de ingeniería química con base en estudios de caso” Claves EN103704, PE101709 y PE-100514, respectivamente, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, DGAPA, y del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067

Agradecimientos

A Dios

Por todas las bendiciones recibidas a lo largo de toda mi vida, por darme a los mejores padres del mundo, y la mejor familia. Por darme una segunda oportunidad de vida y dejarme llegar hasta donde he llegado a lado de mis seres amados

A mis padres

Por darme la familia más increíble que nadie pueda desear. Por ser los mejores padres del mundo entero. Sin ustedes no sería la persona que soy ahora, los dos son la parte más importante de mi vida, son mi base y la razón de mis triunfos

A mis hermanos

Rosario, Margarita, Bertha, Rafael, Rigoberto, Federico, Carmen, Alicia, Juan y Josue, por enseñarme el significado de... “si no comes rápido, no comes”. Los amo con todo mi corazón, todos y cada uno de ustedes me han enseñado cosas bien padres y me hacen la persona que soy. No sé qué sería de mi sin ustedes, como dice papá, somos una cadenita y cada uno de nosotros somos un eslabón, si falta uno la cadenita deja de existir. Los amo con todo mi ser

A mis sobrinos

Karlita, Karencita, Nats, Mari, Fede, Roger, Helenita, Zoecita, Dieguín, Rafa y mi Mateito, por llenarme de alegría y ser los causantes de mis risas. Los amo

A Manchas

Por haber sido siempre mi mejor amigo, mi motivo de mayores risas y alegrías. Por haber sido incondicional para mí en todo momento. Siempre estarás en mi corazón. Te amare siempre

A mis amigos

A Karina

Porque en tan poco tiempo me robaste el corazón y me enseñaste a ver la vida desde un punto de vista totalmente diferente. Te amo

Sergio y Orlene, por haber sido el mejor equipo que puede existir y los mejores amigos que alguien puede pedir. Edgar, Daniel, Richie, Vane, Erick, Xime, Pancho, Kike, Ivette, Vero, Carlos, Tere, Juan por haber hecho mi carrera la mejor carrera y la más divertida. A Fernanda y Gabriela, por ser mis confidentes y mis amigas por tantísimo tiempo, la prepa sin ustedes no hubiera sido lo que fue. Tantas y tantas historias juntas... las amo un resto. Saúl, Lyanne y Sharon, desde que éramos horribles hasta hoy, los amo. Y a todos los demás que han formado parte de mi vida y mi carrera. Gracias por ser parte de mí

A mi familia

A mis abuelitos, por haberme regalado los tesoros más grandes de mi vida, a mi Tía Martha por siempre estar en mi vida y brindarme tanto cariño. A mis demás tíos y primos por formar parte de lo que soy

Índice

	Pág.
Resumen	1
Capítulo I	2
Problemática	2
1.1. Justificación	2
1.2. Introducción	3
1.3. Objetivos	6
Capítulo II	7
Marco teórico	7
2.1. Humedales artificiales	7
2.1.1. Historia de los humedales	8
2.1.2. Clasificación de los humedales	10
2.2. Tratamiento de aguas residuales por sistema de humedales artificiales	12
2.3. Desinfección	14
2.3.1. Métodos de desinfección de aguas residuales	17
2.3.1.1. Desinfección con cloro	17
2.3.1.2. Efectividad bactericida de residuales de cloro	18
2.3.2. Demanda del cloro	19
2.4. Desinfección con energía ultravioleta	21

	Pág.
Capítulo III	24
Metodología	24
3.1. Localización del humedal artificial de flujo horizontal	24
3.2. Agua a tratar	25
3.3. Parámetros que se realizaron en el desarrollo de la investigación	26
3.3.1. Parámetros físicos y químicos <i>in situ</i>	26
3.3.2. Parámetros físicos y químicos que se midieron en el laboratorio	27
3.3.3. Parámetros microbiológicos que se midieron en el laboratorio	30
3.4. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997	31
3.5. Toma de muestra del influente y efluente del HAFH	32
3.6. Diagrama de flujo	33
3.7. Análisis estadísticos	34
Capítulo IV	35
Resultados y discusión	35
4.1. Funcionamiento del humedal artificial de flujo horizontal	35
4.2. Seguimiento de los parámetros físicos y químicos <i>in situ</i> de las muestras tomadas en el influente, filtro percolador y efluente del humedal	36
4.2.1. Seguimiento de pH	36
4.2.2. Seguimiento de temperatura y de oxígeno disuelto (OD)	37

	Pág.
4.2.3. Seguimiento de conductividad eléctrica y de sólidos disueltos totales (SDT)	38
4.3. Seguimiento de cada uno de los parámetros físicos y químicos medidos en el laboratorio del influente, filtro percolador y efluente del humedal	39
4.3.1. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	39
4.3.2. Seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO)	40
4.3.3. Seguimiento de fósforo	41
4.3.4. Seguimiento de nitratos	42
4.3.5. Seguimiento de sulfuros y sulfatos	43
4.3.6. Seguimiento de los sólidos totales, volátiles totales, disueltos totales, suspendidos volátiles y suspendidos totales (ST, SVT, SDT, SSV, SST)	44
4.4. Evaluación de los parámetros microbiológicos	47
4.4.1. Seguimiento de coliformes fecales	48
4.4.2. Seguimiento de huevos de helminto	49
4.5. Caracterización de 12 muestras de agua tomadas en el influente, filtro percolador y efluente durante 7 meses de seguimiento analítico	50
4.6. Comparación de los resultados obtenidos del seguimiento de 12 muestras de agua tomadas en el influente, filtro percolador y efluente, durante 7 meses obtenidos en el laboratorio y la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997)	51
4.7. Método de desinfección propuesto	52

	Pág.
Capítulo V	54
Conclusiones y recomendaciones	54
5.1. Conclusiones	54
5.2. Recomendaciones	55
Bibliografía	57
Anexos	66
Anexo 1. Seguimiento de parámetros <i>in situ</i>	66
Anexo 2. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	69
Anexo 3. Seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO)	71
Anexo 4. Seguimiento de fósforo total	73
Anexo 5. Seguimiento de nitratos	75
Anexo 6. Seguimiento de sulfuros	77
Anexo 7. Seguimiento del ion sulfato	79
Anexo 8. Seguimiento de sólidos en todas sus formas	81
Anexo 9. Seguimiento del número más probable (NMP) de coliformes fecales	86
Anexo 10. Seguimiento del número de huevos de helminto	87
Anexo 11. Disposición de los residuos generados en esta investigación	89

Índice de Tablas

Tabla	Nombre de la Tabla	Pág.
1	Límite máximo permisible de contaminantes, NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997)	5
2	Humedales artificiales y naturales en la Base de Datos de Tratamiento y Calidad de Aguas de Humedales de América del Norte, <i>NADB</i> (USEPA, 2000)	9
3	Características del agua a tratar dependiendo del tipo de humedal	13
4	Tratamiento del agua dependiendo del humedal	14
5	Propiedades físicas y químicas del cloro (Romero, 2005)	17
6	Efectividad relativa de residuales de cloro (Romero, 2005)	18
7	Comparación de los desinfectantes cloro y ultravioleta (Metcalf y Eddy, 2003; WERF, 1995)	23
8	Parámetros <i>in situ</i> a medir en las muestras	27
9	Parámetros físico-químicos medidos en el laboratorio	30
10	Parámetros microbiológicos medidos en el laboratorio	31
11	Información de la toma de muestra	32
12	Parámetros físicos y químicos <i>in situ</i> de 12 muestras correspondientes a cada uno de los puntos (influyente, filtro percolador y efluente del humedal), durante el periodo de estudio	36
13	Evaluación de los parámetros biológicos de 8 muestras obtenidas al influyente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio	47
14	Caracterización del agua a tratar, del influyente, filtro percolador y efluente, de las 12 visitas durante el periodo de estudio	50
15	Comparación de los parámetro de la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997) y los resultados del seguimiento de las muestras de agua tomadas al influyente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio	51

Tabla	Nombre de la Tabla	Pág.
A-1	Seguimiento de los parámetros físicos y químicos in situ de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	66
A-2	Seguimiento de los parámetros físicos y químicos in situ de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	67
A-3	Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5 de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	69
A-4	Seguimiento de la demanda química de oxígeno, DQO, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio	72
A-5	Seguimiento de fósforo de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	73
A-6	Seguimiento de nitratos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	75
A-7	Seguimiento de sulfuros de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	78
A-8	Seguimiento de sulfatos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	79
A-9	Seguimiento de sólidos totales, ST, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	81
A-10	Seguimiento de sólidos volátiles totales, SVT, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	82
A-11	Seguimiento de sólidos disueltos totales, SDT, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	83
A-12	Seguimiento de sólidos suspendidos volátiles, SSV, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	84

Tabla	Nombre de la Tabla	Pág.
A-13	Seguimiento de sólidos suspendidos totales, SST, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	85
A-14	Seguimiento de coliformes fecales de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	86
A-15	Seguimiento de huevos de helminto de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio	87

Nota:

Esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009)

Índice de Figuras

Figura	Nombre de la Figura	Pag.
1	Sistema conceptual de un humedal artificial de flujo horizontal (Durán-de-Bazúa, 1998)	8
2	Corte longitudinal de un HAFH subsuperficial (Secundino-Sánchez, 2015)	10
3a	Diagrama isométrico de un HAFV construido en la Ciudad Universitaria de la UNAM (Fenoglio-Limón, 2000)	11
3b	Diagrama de un HAFV construido en la Ciudad Universitaria de la UNAM (Fenoglio-Limón, 2000, detalle del sistema, IWA, 2000)	12
4	Comportamiento de cloro al ir añadiendo agua (Metcalf y Eddy, 2003).	20
5	Localización del humedal artificial (CCH-Sur, 2014)	24
6	Diagrama esquemático de ubicación del humedal artificial (Sánchez-Tovar, 2012)	25
7a	Puntos de muestreo	33
7b	Humedal artificial de flujo horizontal en el CCH Sur (Sánchez-Tovar, 2010)	33
8	Diagrama de flujo de las actividades a desarrollar en esta investigación	34
9	Diagrama esquemático del funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales basado en un humedal artificial de flujo horizontal	35
10	Seguimiento de pH de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle - Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	37
11	Seguimiento de \diamond -temperatura y de \square -oxígeno disuelto (OD) de las muestras tomadas al Efluente, durante el periodo de estudio	38
12	Seguimiento de \diamond -Conductividad eléctrica y de \square -sólidos disueltos totales (SDT) de las muestras tomadas al Efluente, durante el periodo de estudio	38
13	Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	39

Figura	Nombre de la Figura	Pag.
14	Seguimiento de demanda química de oxígeno, DQO, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	40
15	Seguimiento de fósforo de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	41
16	Seguimiento de nitratos de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	42
17	Seguimiento de sulfuros, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	43
18	Seguimiento de sulfatos, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	44
19	Seguimiento de sólidos totales, ST, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	45
20	Seguimiento de sólidos volátiles totales, SVT, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	45
21	Seguimiento de sólidos disueltos totales, SDT, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	46
22	Seguimiento de sólidos suspendidos totales, SST, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	46
23	Seguimiento de sólidos suspendidos volátiles, SSV, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	47
24	Seguimiento de coliformes fecales de 8 muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	48
25	Seguimiento de huevos de helminto de 8 muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio	49

Glosario

%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
μS	Microsiemens
CCH-Sur	Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur
CDE	Coeficiente de desviación estándar
CE	Corriente eléctrica
Cl ⁻	Ion Cloro
Cl ₂	Cloro
ClNO ₂	Cloruro de nitrilo
ClO ⁻	Ión hipoclorito
cm	Centímetros
CO ₂	Dióxido de carbono
CT	Tiempo de contacto
CV	Coeficiente de variación
DBO ₅	Demanda biológica de oxígeno
DOF	Diario Oficial de la Federación
DQO	Demanda química de oxígeno
e ⁻	Electrón
ENEP	Escuela Nacional de Estudios Profesionales
EPA	Environmental Protection Agency
Fe ²⁺	Hierro
FWS	<i>Flow Water Surface</i>
g	Gramo
h	Huevos
H ⁺	Protón
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Acido sulfhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HA	Humedales artificiales
HAFH	Humedales artificiales de flujo horizontal
HAFV	Humedales artificiales de flujo vertical

HCl	Ácido clorhídrico
HClO	Ácido hipocloroso
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
km ³	Kilómetros cúbicos
L	Litros
masa versus peso	<p>La masa y el peso son diferentes propiedades, que se definen en el ámbito de la física. La masa es una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo mientras que el peso es una medida de la fuerza que es causada sobre el cuerpo por el campo gravitatorio. Todo eso fue descubierto por Isaac Newton. Por lo tanto la masa de un objeto no cambiará de valor sea cual sea la ubicación que tenga sobre la superficie de la Tierra (suponiendo que el objeto no está viajando a velocidades relativistas con respecto al observador), mientras que si el objeto se desplaza del Ecuador al Polo Norte, su peso aumentará aproximadamente 0.5 % a causa del aumento del campo gravitatorio terrestre en el Polo. En forma análoga, en el caso de astronautas que se encuentran en condiciones de microgravedad, no es preciso realizar ningún esfuerzo para levantar objetos del piso del compartimento espacial; los mismos “no pesan nada”. Sin embargo, dado que los objetos en microgravedad todavía poseen su masa e inercia, un astronauta debe ejercer una fuerza diez veces más grande para acelerar un objeto de 10 kilogramos a la misma tasa de cambio de velocidad que la fuerza necesaria para acelerar un objeto de 1 kilogramo. En la Tierra, una simple hamaca puede servir para ilustrar las relaciones entre fuerza, masa y aceleración en un experimento que no es influido en forma apreciable por el peso (fuerza vertical descendente). Si alguien se para detrás de un adulto grande que este sentado y detenido en la hamaca y le da un fuerte empujón, el adulto se acelerará en forma relativamente lenta y la hamaca solamente se desplazará una distancia reducida hacia adelante antes de comenzar a moverse en</p>

dirección para atrás. Si se ejerciera la misma fuerza sobre un niño pequeño que estuviera sentado en la hamaca se produciría una aceleración mucho mayor, ya que la masa del niño es mucho menor que la masa del adulto. Las unidades de masa son los kg y las de fuerza son N (Wikipedia, 2015)

mg	Miligramo
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mn ²⁺	Manganeso
MnO ₂	Oxido de magnesio
MnSO ₄	Sulfato de manganeso
N	Nitrógeno
NA	No aplica
Na ₂ S ₂ O ₃	Tiosulfato de sodio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sodio
NaCl	Cloruro de sodio
NADB	<i>North American Data Base</i>
NCl ₃	Tricloramina
NH ₂	Aminas
NH ₂ Cl	Monocloramina
NH ₃	Amoniacó
NH ₄ ⁺	Amonio
NHCl ₂	Dicloramina
nm	Nanómetros
NMP	Número más probable
N ^o NH ₃	Nitrógeno orgánico amoniacal
NO ₂	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno disuelto
OD	Oxígeno disuelto
OH	Anión hidróxido

P	Fósforo
p1	Número de tubos positivos con la dilución más baja
p2	Número de tubos positivos con una dilución más elevada
pH	Potencial de hidrógeno
R1	Residuos 1
R2	Residuos 2
R3	Residuos 3
REPSA	Reserva Ecológica de Pedregal San Angel
S ²⁻	Sulfuros
SDT	Sólidos disueltos totales
SFW	<i>Surface Flow Wetlands</i>
SILADIN	Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación
SO ₂	Dióxido de azufre
SO ₄ ²⁻	Sulfatos
SsF	<i>Subsurface Flow</i>
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SVT	Sólidos volátiles totales
T	Temperatura
uma	Unidad de masa atómica
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta tipo A
UV-B	Ultravioleta tipo B
UV-C	Ultravioleta tipo C
VSBs	<i>Vegetated Submerged Bed</i>

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar la calidad del agua que se obtiene después de que un efluente acuoso entra a un sistema de depuración que consta de un filtro empacado y un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial ubicado en unas instalaciones educativas de la UNAM, el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur). El efluente acuoso proviene de los edificios del Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación (SILADIN) y del Edificio de Idiomas, llegando por gravedad a un registro anterior a una fosa séptica. De allí es enviada a un filtro percolador para su posterior distribución al humedal artificial de flujo horizontal (HAFH). La evaluación de los parámetros físicos-químicos y biológicos *in situ* y en los laboratorios se realizó mediante las técnicas establecidas en las normas correspondientes. Con la caracterización del agua residual que entra al sistema así como con la del efluente se evaluó si esta agua se encuentra en condiciones de ser reutilizada, según lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997. Los resultados obtenidos para coliformes fecales fueron de 2375.0 ± 8.3 _{Influyente}, 1662.5 ± 7.1 _{Filtro percolador} y 965.0 ± 4.5 _{Efluente} NMP/100mL. En el caso de huevos de helminto presentaron valores de 4 ± 0 _{Influyente}, 3 ± 0 _{Filtro percolador} y 3 ± 0 _{Efluente} h/L. Con la DBO₅ los resultados arrojados fueron de 513.7 ± 3.8 _{Influyente}, 453.3 ± 3.6 _{Filtro percolador} y 93.7 ± 0.9 _{Efluente} mg/L. Por último, los sólidos suspendidos totales, SST, fueron los siguientes: 438.3 ± 1.1 _{Influyente}, 136.7 ± 0.4 _{Filtro percolador} y 151.8 ± 1.2 _{Efluente} mg/L. Por lo tanto, con los resultados mostrados, se observó que el agua a la salida de este sistema no está todavía en condiciones óptimas para ser reutilizada, es decir, no cumple con los límites máximos permisibles de la NOM-003-ECOL-1997. Por lo tanto, se propone un método de cloración, el cual debido a su gran eficiencia, bajo costo y fácil operación podría permitir el cumplimiento con dicha normativa.

Palabras clave: Calidad del agua, humedales artificiales, planta prototipo, aguas residuales, plantel educativo

Capítulo I

Problemática

1.1. Justificación

La mayoría de los cuerpos de agua superficial del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola o pecuario, lo que ha ocasionado grados variables de contaminación que limitan el uso directo del agua. México cuenta con una amplia gama de mantos acuíferos, 653 de los cuales son explotados y de los 772 mm de lluvia que en promedio ocurren anualmente en el territorio nacional, el 67% ocurre de junio a septiembre, lo que dificulta su aprovechamiento. El abastecimiento de las aguas superficiales depende directamente de los escurrimientos naturales, los cuales en promedio anual generan 397 km³. La infraestructura anual proporciona una capacidad de almacenamiento del orden de 150 km³. Debe tenerse en cuenta que la variabilidad temporal y espacial de los escurrimientos impide aprovechar en su totalidad el escurrimiento superficial, especialmente en los meses en que éste es más abundante. Respecto de las aguas subterráneas, la recarga de los acuíferos se estima del orden de 75 km³/año, de los cuales se estima que se aprovechan 28 km³/año, siendo de gran importancia para la producción agrícola. La sobre-explotación de los acuíferos ha generado diversos efectos perjudiciales entre los que se encuentran: agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, reducción de los caudales de los ríos, eliminación de la vegetación nativa y pérdida de ecosistemas. Asimismo, se tiene el deterioro de la calidad del agua de numerosos acuíferos, provocado por la sobre-explotación así como por la contaminación generada en las ciudades y zonas agrícolas (Conagua, 2014).

La situación de escasez en muchas regiones del país se agrava por la contaminación del agua y en zonas de aparente abundancia la disponibilidad

efectiva se reduce por la misma razón. El cobro por descarga de aguas residuales se hace por tipo de contaminante y en función de los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996). Conforme a esta norma, los usuarios sólo deben cumplir con el valor límite establecido para cada contaminante que producen. Dicha norma tiene en cuenta tanto el uso del cuerpo receptor como su vulnerabilidad, además de incorporar una política de cumplimiento gradual, para que los contaminantes principales se debieran haber cumplido en el año 2000, los intermedios en el 2005 y los menores en el 2010. Sin embargo, las plantas de tratamiento que existían cuando se publicó la norma debían seguir operando de acuerdo con sus permisos originales de descarga o con las normas nuevas, dependiendo de la voluntad del usuario. Nada de esto se ha cumplido (González, 1993).

En la ciudad de México, según el INEGI (2010), la población total fue de 8,851,080 personas, contando con un número de hogares para ese mismo año de 2,388,534 y una tasa de crecimiento de 0.30. Desafortunadamente no todas las viviendas tienen tuberías y drenajes óptimos para que el agua no se vaya al subsuelo. Solamente 147,575 viviendas disponen de agua de la red pública, 167,843 disponen de drenaje y 168,458 tienen excusado o sanitario. Este problema se ha vuelto realmente preocupante debido al manejo inadecuado de las descargas industriales y urbanas a los cuerpos de agua.

1.2. Introducción

Debido a este problema, es necesaria la implementación de medidas alternas, una de ellas para resolver el problema de contaminación del agua es el uso de las ecotecnologías que protejan los recursos naturales. Dentro de estas últimas se encuentran los “*humedales artificiales*” (HA). El propósito de estos es darle tratamiento a las aguas residuales con el fin de reducir la contaminación del ambiente y conservar los recursos naturales, de tal forma que no se vean afectados (Durán-de-Bazúa *et al.*, 2008; Rodríguez Monroy y Durán de Bazúa, 2006; Soto-Esquivel *et al.*, 2013).

Los humedales artificiales, son sistemas de depuración biológica, que tiene la capacidad de transformar contaminantes contenidos en el agua, removiéndolos

del medio, esto con el fin de mejorar la calidad del agua que es tratada en estos sistemas. La operación y su diseño se basan principalmente en los principios de los sistemas naturales, al limitarlos, son denominados genéticamente como ecotecnologías.

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son (EPA, 1999):

- a) Se requiere de una menor cantidad de área, debido a que las áreas superficiales para la absorción, filtración y los biofilmes son mucho más altos;
- b) Hay una menor cantidad de insectos y se reducen los problemas del olor, puesto que las aguas residuales permanecen debajo de la superficie de grava.

Claro que estos sistemas también pueden llegar a tener desventajas. Una de ellas es la saturación de los espacios libres del lecho a causa del gran crecimiento de las raíces y rizomas de las hidrófitas, derivando en la formación de caminos preferenciales para el agua, con lo que se reduce el tiempo de residencia hidráulica y, por tanto, la capacidad de depuración del humedal (De Miguel *et al.*, 2005).

La calidad de agua que proviene de un tratamiento mediante humedales artificiales debe estar acorde con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997), para que el agua obtenida pueda ser reutilizada para diferentes fines como el rellenar lagos y ríos, regar áreas verdes y utilizarla en los retretes o escusados, es decir servicios al público con contacto directo. Los parámetros que debe cumplir dicha agua se presentan en la Tabla 1 y forman parte de la normativa mexicana ya mencionada.

Estos sistemas (HA) han estado siendo estudiados en los últimos cincuenta años para evaluar su eficacia en la depuración de aguas residuales, al ser considerados por la literatura como una tecnología de bajo costo y porque requieren bajo esfuerzo en su construcción y operación y en el mantenimiento, sin dejar de ser eficientes para la remoción de los contaminantes.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de contaminantes, NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997)

Tipo de "reúso" (reutilización)	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto (h/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)	Grasa y aceites (mg/L)
Servicio al público con contacto directo	240	1	20	20	15
Servicio al público con contacto directo u ocasional	1,000	5	30	30	15

NMP: número más probable; mL: mililitros; h: huevos, mg: miligramos; L: litros; DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno; SST: sólidos suspendidos totales

Son también reconocidos debido a que son de las pocas tecnologías que, además de limpiar el agua, son benéficas y compatibles con el ambiente, debido a que generan gran cantidad de biomasa vegetal gracias a la transformación de los contaminantes en biomasa de plantas acuáticas, que ésta puede llegar a usarse como generador de energía (Ciria *et al.*, 2005).

En la UNAM su estudio inició en los años 80 del siglo XX con el Dr. Fermín Rivera-Agüero, de la ENEP-Iztacala, quien invitó al grupo de investigación de la Dra. Carmen Durán, de la Facultad de Química, a participar en investigación conjunta sobre la aplicación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas mixtas en el estado de San Luis Potosí a invitación del gobernador del estado. Un tiempo después, en julio de 1989, se creó el Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental en la UNAM con el objetivo de coadyuvar en la formación de personal altamente calificado en varias áreas importantes, destacando la del manejo, tratamiento, reutilización y reciclado del agua y de las aguas residuales usando tecnologías apropiadas para las condiciones de México, entre ellas la del uso de los humedales artificiales como los usados por los aztecas para mantener limpias las aguas de sus lagos, lo que es ahora la Ciudad de México. La investigación se inició con reactores a escala de laboratorio simulando el comportamiento de humedales artificiales y estudiando sus efectos sobre la remoción de patógenos así como de contaminantes disueltos en aguas residuales sintéticas y reales usando *Typha latifolia* (tules) y *Phragmites australis* (carrizos) y otras plantas acuáticas.

Para los sistemas con aguas residuales reales se construyeron por el PIQAYQA plantas prototipo y una de ellas se encuentra en las instalaciones del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (Durán-de-Bazúa, 2014).

Esta última planta prototipo recibe aguas residuales mixtas de laboratorios de docencia y de sistemas sanitarios. Por ello, a continuación se presenta el objetivo de esta investigación.

1.3. Objetivos

- a) Realizar el seguimiento de un humedal artificial de flujo horizontal mediante parámetros físicos, químicos y biológicos para evaluar la calidad de agua obtenida comprobando esto con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997).
- b) Proponer un método final de depuración viable para este sistema si los resultados de calidad dados en el laboratorio no cumplen con los establecidos en NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997).

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Humedales artificiales

Los humedales naturales son áreas saturadas o inundadas por aguas, las cuales tienen la característica de que tanto su frecuencia como duración es suficiente para el desarrollo de plantas acuáticas, donde predomina la vegetación adaptada para vivir bajo las condiciones de saturación. Con esta definición, los pantanos, ciénagas, etc., pueden ser considerados como humedales naturales (USEPA, 2000).

Se definen los humedales artificiales (HA) como sistemas diseñados por el hombre, conformados por un substrato o medio soporte-saturado, vegetación emergente y/o sub-emergente, organismos vivos y agua, que simulan a un sistema de humedales naturales, con un fin determinado (Hammer y Bastian, 1989).

Un humedal artificial (HA) se puede definir como un área que se encuentra saturada por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tal, que sea suficiente para mantener estas condiciones de saturación (USEPA, 2000).

El humedal artificial (Fig. 1), utilizado como sistema de tratamiento de aguas residuales en esta investigación, consta de un material de soporte (grava, arena o escoria volcánica), plantas (plantas vasculares) y microorganismos (bacterias, hongos principalmente) separados del entorno circundante (suelos adyacentes) mediante una membrana impermeable. Al ponerse en contacto estos elementos tienen una interacción para así remover los contaminantes del agua residual mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Guido-Zarate, 2006).

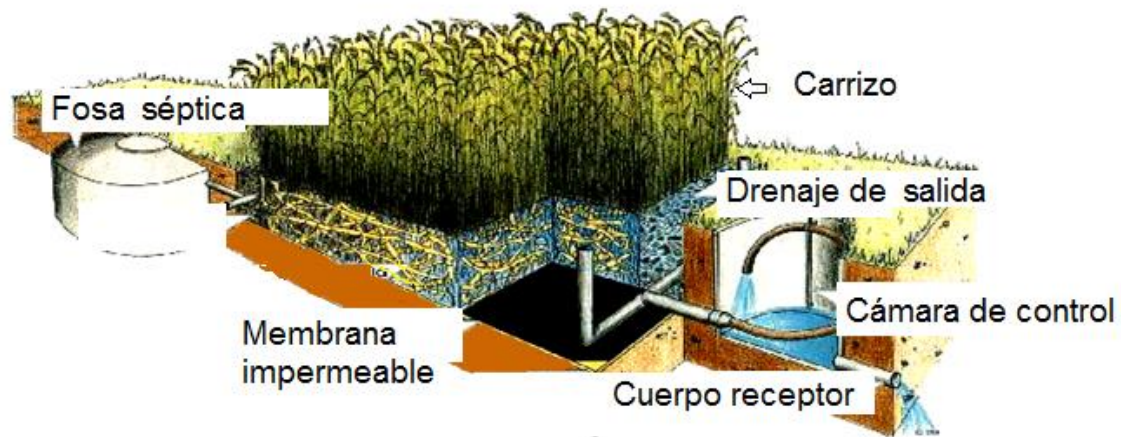


Figura 1. Sistema conceptual de un humedal artificial de flujo horizontal (Durán-de-Bazúa, 1998)

El sistema puede servir para efectuar un tratamiento terciario (eliminación de elementos minerales eutrofizantes) en los efluentes secundarios de sistemas de depuración convencionales y puede también servir para efectuar un tratamiento secundario (descomposición de la materia orgánica disuelta), por medio de los microorganismos adheridos al sistema radicular de las plantas (Guido-Zárate, 2006).

2.1.1. Historia de los humedales

Kadlec y Knight (1996) señalan que los humedales naturales y artificiales, probablemente han sido usados en el tratamiento y disposición de aguas residuales desde el tiempo en que las aguas residuales empezaron a ser recolectadas, estos registros se tienen sobre el vertido de aguas residuales y se remontan en 1912.

Es probable que en la construcción de los primeros humedales, los esfuerzos estuvieran basados en la observación de la capacidad de tratamiento de los humedales naturales. Una forma de ver, fue la posibilidad de usar el agua residual como una fuente de nutrientes para la creación o restauración de los humedales (USEPA, 2000).

Los primeros estudios de los humedales artificiales para tratar aguas residuales iniciaron en Europa en los años 50 del siglo XX, mientras que en Estados Unidos se iniciaron a finales de los años 60 del siglo XX. En los años 70 y 80, los esfuerzos de investigación aumentaron notablemente en América del Norte, tanto en los EE.UU., como en México. En 1952, gracias a la Dra. Kathe Seidel de Alemania, fue introducida como tecnología de tratamiento de aguas residuales y el primer sistema completo de humedales artificiales fue construido por los países bajos a finales de los años 60 (Vymazal *et al.*, 1998). El desarrollo de esta tecnología creció rápidamente, ya que muchos de los HA estaban siendo aplicados para tratar aguas residuales en Europa y América del Norte. Hasta el 2004 según la USEPA (2004), se tenían registrados 100 HA en operación en Norteamérica y 5000 en Europa.

De acuerdo con la Base de Datos de Tratamiento y Calidad de Aguas de Humedales de América del Norte (**NADB**, *por sus siglas en inglés North American Data Base*), con base en la USEPA (2000), los humedales artificiales pueden ser de flujo de agua superficial (**FWS**, *por sus siglas en inglés*) o de flujo sub-superficial (**VSB**, *por sus siglas en inglés*). En la Tabla 2 se desglosa la cantidad de humedales naturales, artificiales y la fecha de inicio de operación en los Estados Unidos (USEPA, 2000).

Tabla 2. Humedales artificiales y naturales en la Base de Datos de Tratamiento y Calidad de Aguas de Humedales de América del Norte, NADB (USEPA, 2000)

Tipo Humedal	Antes de 1950	1950 y 60	1970	1980 - 84	1985 - 89	1990 - 96
Artificial, FWS	1	0	3	8	33	85
Artificial, VSB	0	0	0	0	21	31
Artificial, híbrido	0	0	0	1	4	6
Natural, FWS	4	3	9	5	8	1

FWS: flow water surface; VSB: vegetated submerged bed

2.1.2. Clasificación de los humedales

Los humedales artificiales pueden clasificarse dependiendo de su hidráulica, como ya se mencionó arriba, en humedales de flujo superficial (*en inglés Surface Flow Wetlands o Free Water Surface Wetlands*, SFW), flujo sub-superficial (*Submerged Bed o Subsurface Flow*, SsF) y con plantas emergiendo de la superficie del agua. En ellos, el agua puede fluir horizontalmente (HAFH) o verticalmente (HAFV). En el HAFH, el influente de estos sistemas se alimenta en forma continua por uno de los extremos del humedal. A continuación, en la Figura 2 se aprecia este tipo de humedal.

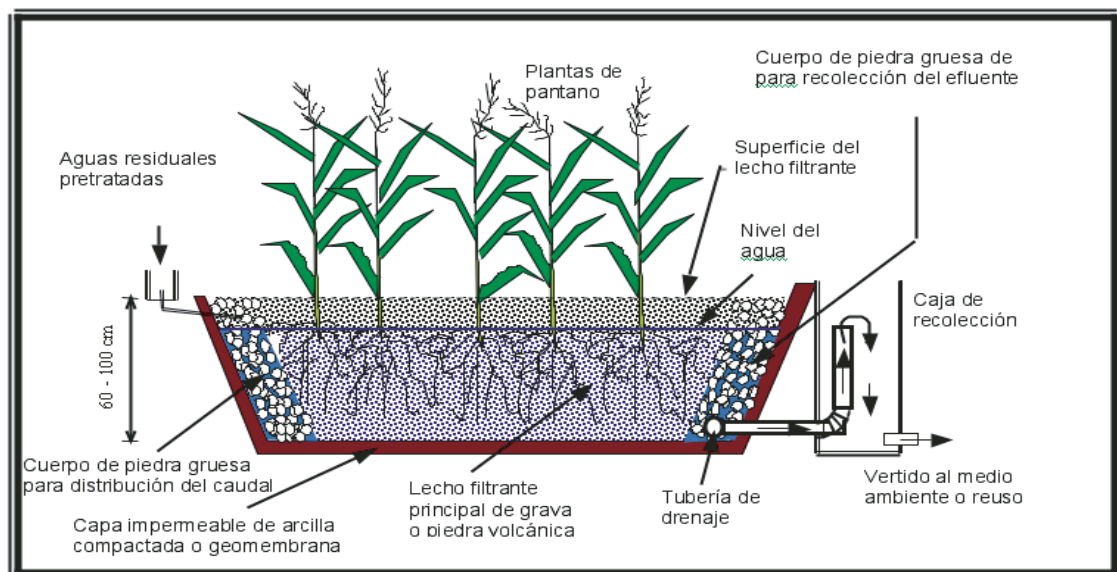


Figura 2. Corte longitudinal de un HAFH subsuperficial (Secundino-Sánchez, 2015)

Estos sistemas tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: (1) Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del material de soporte (suelo, materiales pétreos, etc.) y la materia orgánica, (2) Utilizar y transformar los elementos o compuestos contaminantes por medio de los microorganismos y (3) Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y mínimo mantenimiento (Ruiz-López, 2009).

El sistema de alimentación es, por lo regular, un tubo horizontal perforado o una canaleta, que está montado de tal manera que facilite la infiltración por gravedad al lecho del agua residual que se vaya a tratar; de esta forma, se busca que no se formen caminos que reduzcan el área real de transferencia de

masa y, por lo tanto, la transformación de los contaminantes orgánicos en compuestos más estables como en CO₂, agua, nitritos y sulfatos (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

El agua residual se alimenta al humedal y fluye lentamente a través del medio poroso debajo de la superficie del lecho en un patrón de flujo horizontal hacia la zona de salida donde se recolecta. En esta trayectoria, el agua se pone en contacto con zonas anaerobias, aerobias y anóxicas. Alrededor de la raíz y los rizomas es donde se presentan las zonas aerobias. Al pasar a través de la rizosfera el agua es limpiada por degradación biológica y procesos físicos y químicos (IWA, 2000).

En los humedales artificiales de flujo vertical (HAFV) es necesario contar con un medio de soporte compuesto por partículas de diferente granulometría.

Como se muestra en las Figuras 3a y 3b, el agua se alimenta a lo largo del lecho en forma discontinua, inundando la superficie y fluyendo de forma vertical a través del medio de soporte.

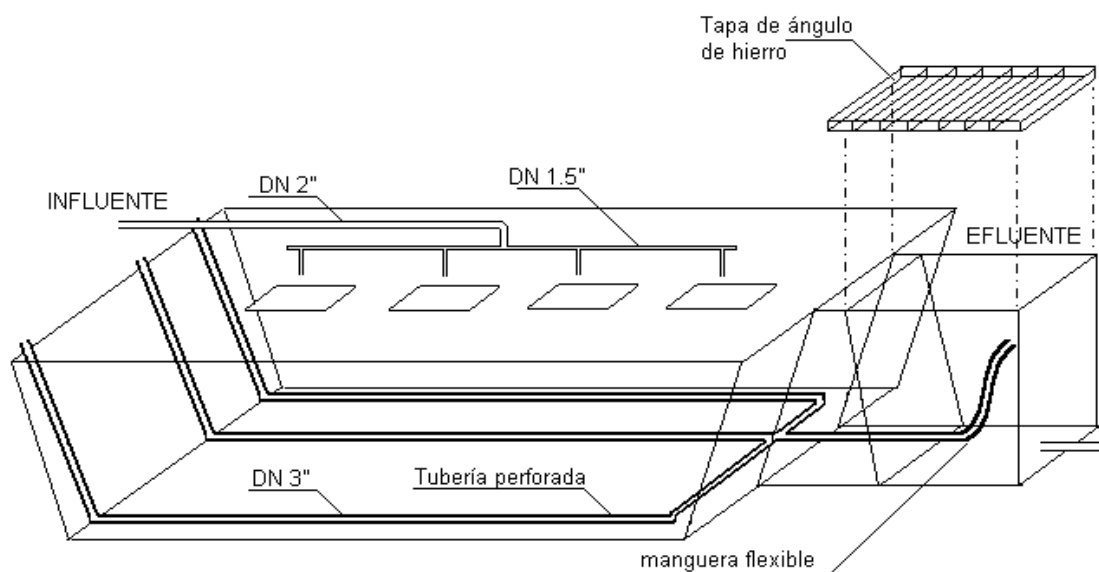


Figura 3a. Diagrama isométrico de un HAFV construido en la Ciudad Universitaria de la UNAM (Fenoglio-Limón, 2000)

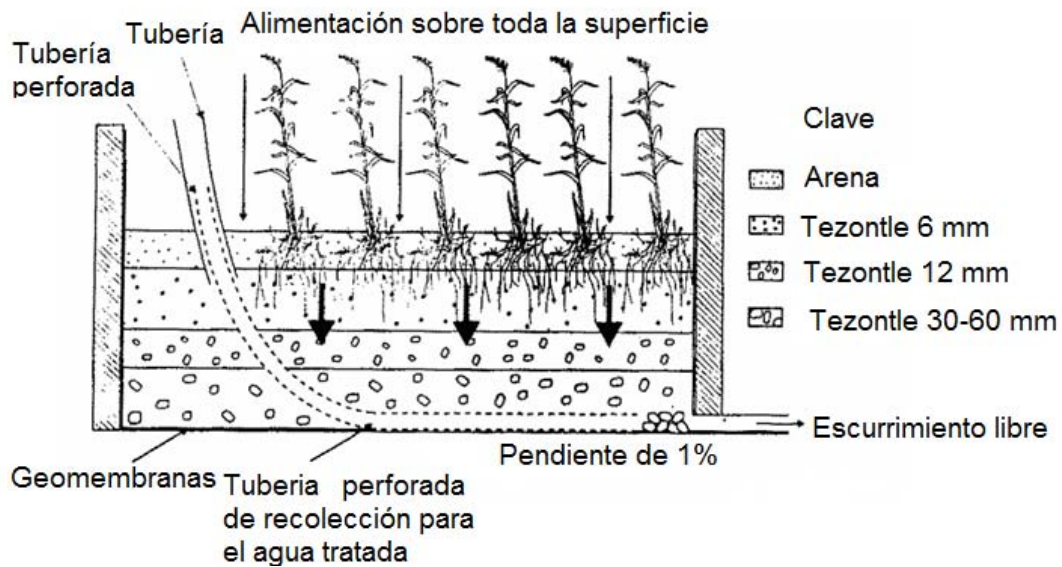


Figura 3b. Diagrama de un HAFV construido en la Ciudad Universitaria de la UNAM (Fenoglio-Limón, 2000, detalle del sistema, IWA, 2000)

Durante el período de carga, el aire es forzado a salir del medio de soporte y durante el período de secado el aire atmosférico es llevado hacia los espacios de los poros del sustrato, de esta forma se incrementa la oxigenación del lecho. La eficiencia del proceso de depuración de estos sistemas, depende del grado de aireación del medio de soporte (Rodríguez y Varela, 2003).

El principal inconveniente de este sistema es que se requiere un montaje relativamente complejo para la distribución del sistema de irrigación y mayor mantenimiento para evitar azolvamientos (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998; Fenoglio-Limón, 2000).

2.2. Tratamiento de aguas residuales por sistema de humedales artificiales

La procedencia de los humedales debe tener una característica específica para su tratamiento. En las Tablas 3 y 4 se mencionan los tipos de humedales, la procedencia del agua para cada uno de los humedales, así como su posible destino; también describen su calidad y los posibles métodos de desinfección a utilizar con estos sistemas.

Los sistemas de humedales artificiales, típicamente reducen al menos un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente (EPA, 2000b, Rodríguez y Varela, 2003).

Tabla 3. Características del agua a tratar dependiendo del tipo de humedal

Tipo de humedal	Tipo de agua	Calidad del agua (cumple o no con NOM-003-ECOL-1997)		Referencias
Humedal artificial de flujo subsuperficial	Está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual tratamiento. Un uso poco convencional es para estabilizar lodos o fangos de depuradoras convencionales. También se usan en la fase final del tratamiento de aguas	DBO ₅	Si	Cervantes y Mora, 2013
		SST	Si	
		Huevos	Si	EPA, 2000a
		Coliformes	No	
Humedal artificial de flujo horizontal	Actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal	DBO ₅	Si	EPA, 2000a
		SST	Si	
		Huevos	Si	
		Coliformes	No	
Humedal artificial de flujo vertical	Estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación	DBO ₅	Si	Mendonça, 2000
		SST	Si	
		Huevos	Si	EPA, 2000a
		Coliformes	No	
Humedal artificial de flujo superficial	Tratamiento del drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos y avícolas y lixiviados de rellenos sanitarios, y para efectos de mitigación	DBO ₅	Si	EPA, 2000b
		SST	Si	
		Huevos	No	
		Coliformes	No	

Tabla 4. Tratamiento del agua dependiendo del humedal

Tipo de humedal	Disposición del agua de Salida	Tipo de tratamiento que se utiliza para desinfectar el agua	Referencias
Humedal artificial de flujo subsuperficial	Estanques artificiales, fuentes ornamentales, producción de nieve artificial, creación o llenado de lagos en los que se pueda practicar pesca, riego de campos de golf, riego de áreas verdes	Luz ultravioleta Cloro	IGME, 1995 Cervantes y Mora, 2013
Humedal artificial de flujo horizontal	Estanques artificiales, fuentes ornamentales, producción de nieve artificial, creación o llenado de lagos en los que se pueda practicar pesca, riego de campos de golf, riego de áreas verdes	Luz ultravioleta Cloro	EPA, 2000 ^a
Humedal artificial de flujo vertical	Estanques artificiales, fuentes ornamentales, producción de nieve artificial, creación o llenado de lagos en los que se pueda practicar pesca, riego de campos de golf, riego de áreas verdes	Luz ultravioleta Cloro	EPA, 2000 ^a
Humedal artificial de flujo superficial	Debido a que el agua está expuesta y es accesible a personas y animales, el concepto de recibir agua residual parcialmente tratada puede no ser adecuado en el caso de viviendas individuales, parques, áreas de juego, o instalaciones públicas similares	Depende de la hidráulica del humedal la eficiencia que tenga Normalmente es utilizado para vida acuática	EPA, 2000b

2.3. Desinfección

Los procesos de desinfección deben incluir un tratamiento que se encargue de la destrucción de organismos perjudiciales o que sean indeseables. Normalmente se usan con la finalidad de destruir o desactivar los organismos (patógenos) que producen enfermedades de origen intestinal.

Los microorganismos patógenos de precaución en el tratamiento del agua se dividen en tres grandes tipos: bacterias, virus y protozoos (EPA, 1999). Las bacterias y los virus, se encuentran tanto en aguas subterráneas como en aguas superficiales, mientras que los protozoos son comúnmente en aguas superficiales (Lenntech, 2015).

Existen diferentes métodos de desinfección para aguas residuales y estos se utilizan para la destrucción de organismos que pueden llegar a ser muy dañinos.

Son los que constituyen comúnmente la etapa final de los tratamientos de agua. Para llevar a cabo un proceso de desinfección se debe tener sumo cuidado en la selección de esta etapa, para así evitar la formación de compuestos no deseados.

La desinfección y la esterilización no son lo mismo, ya que la esterilización constituye la destrucción total de los organismos; mientras que la desinfección, implica la destrucción de algunos microorganismos que, por ingestión, pueden producir enfermedades en los hombres o en los animales. Existen factores que influyen en la eficiencia de los desinfectantes. Entre los más relevantes en el proceso de desinfección están (Fonseca-Montes-de-Oca, 2004):

- 1) La naturaleza y concentración de los microorganismos a ser destruidos, distribución y condición en el agua
- 2) La naturaleza y concentración del desinfectante y su distribución en el agua
- 3) Temperatura del agua
- 4) Tiempo de contacto
- 5) Naturaleza y condición del agua

El agua puede desinfectarse a través de diferentes medios. Los procesos de desinfección más específicos que hoy se emplean incluyen uno de los siguientes tratamientos (Romero, 2005).

- I. Tratamiento físico, tales como el almacenamiento o aplicación de calor u otros agentes físicos
- II. Radiación, como luz ultravioleta
- III. Iones metálicos, por ejemplo, cobre o plata
- IV. Álcalis y ácidos
- V. Productos químicos tensoactivos, ejemplo, compuestos de amonio cuaternario
- VI. Oxidantes, como los halógenos, ozono y otros materiales inorgánicos y orgánicos.

Para que un desinfectante se le considere como ideal, debe cumplir con las siguientes propiedades (Fonseca-Montes-de-Oca, 2004):

- A. El análisis para la determinación de la concentración del desinfectante en el agua debe ser exacto, sencillo, rápido y apropiado de hacerlo *in situ* como en el laboratorio
- B. Debe poder destruir o inactivar las clases y números de microorganismos patógenos que pueden estar presentes en el agua que se va a desinfectar
- C. Costo razonable, tanto el costo del equipo, su instalación, operación, mantenimiento y reparación, así como la adquisición y el manejo de materiales para su dosificación eficaz
- D. No debe introducir, ni producir sustancias tóxicas, de modo que no altere de ninguna forma las características del agua
- E. El desinfectante debe ser fiable para usarse dentro del intervalo de condiciones que podrían encontrarse en el abastecimiento de agua
- F. Se debe mantener una concentración residual adecuada en el sistema de distribución de agua para evitar la recontaminación o que los microorganismos se reproduzcan.

2.3.1. Métodos de desinfección de aguas residuales

2.3.1.1. Desinfección con cloro

La cloración del agua es el método de desinfección dominante tanto en México como en el resto del mundo, ya que contribuye eficientemente a la reducción y el control de las enfermedades originadas, transmitidas o relacionadas con el agua, control de olor y sabor: así como prevención del crecimiento de algas, oxidación del hierro y manganeso, teniendo un efecto residual, entre otros (Cáceres, 1990; White, 1992).

El cloro ha sido usado para el control de microorganismos en aguas residuales, de consumo, piscinas, etc.; para controlar los olores y sabores; también como para la oxidación de hierro, manganeso, sulfuros y cianuros, remoción de amoníaco y color orgánico.

En la Tabla 5, se observan algunas de las características fisicoquímicas de este compuesto:

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del cloro (Romero, 2005)

Propiedad	Valor
Estado de agregación	Gas
Color (condiciones ambientales)	Amarillo verdoso
Olor	Irritante
Masa molecular (uma)	35.357
Punto de fusión (°C)	-101.4
Punto de ebullición (°C)	-4.5
Densidad relativa al aire	2.5
Corrosión	Alta

Entre las ventajas y desventajas de este método se encuentran (EPA, 1999; WERF, 1995; White, 1992):

Ventajas:

- a) Tecnología bien establecida
- b) La desinfección con cloro es confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos
- c) Controla olores y sabores
- d) Permite un control flexible de la dosificación

- e) Es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos
- f) Es más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono
- g) El cloro residual que permanece en el efluente puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial, y puede ser medido para evaluar su efectividad.

Desventajas:

- a) Aún a bajas concentraciones, el cloro residual es tóxico para los organismos acuáticos y por ello puede requerir una des-cloración posterior si el agua se vierte a cuerpos receptores
- b) Todas las formas químicas del cloro son muy corrosivas y tóxicas
- c) Oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua generando compuestos más peligrosos como las cloraminas
- d) Es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada
- e) Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro.

2.3.1.2. Efectividad bactericida de residuales de cloro

En la Tabla 6, se observan diferentes tipos de cloro residual, los cuales muestran la efectividad relativa que tiene cada uno.

Tabla 6. Efectividad relativa de residuales de cloro (Romero, 2005)

Tipo de compuesto residual	Fórmula	Efectividad relativa
Ácido hipocloroso	HClO	1
Ión hipoclorito	ClO ⁻	1/100
Tricloramina	NCl ₃	Posiblemente > 1/80
Dicloramina	NHCl ₂	1/80
Monocloramina	NH ₂ Cl	1/150

2.3.2. Demanda del cloro

Al ponerse en contacto el agua con el cloro, se llevan a cabo diversas reacciones. Según la reacción mostrada en la ecuación (1):



al reaccionar el agua con el cloro, forma el ácido hipocloroso (HClO) y el ácido clorhídrico. Esta reacción se produce en fracciones de segundo y es reversible. El ácido hipocloroso se disocia en iones de hidrógeno e iones hipoclorito (ClO^-) según la ecuación (2), que también es reversible:



A estos compuestos de cloro que existen en el agua se les llama genéricamente “cloro activo libre”. El HClO es mucho más eficaz como desinfectante que el ión ClO^- al que, para efectos prácticos, no se le considera como desinfectante.

Las reacciones (1) y (2) dependen del pH del agua. Así, la primera predomina con valores bajos de pH y la segunda con valores altos. Las cantidades de ácido hipocloroso y de iones hipoclorito formadas en las reacciones anteriores, equivalen en capacidad oxidante a la cantidad de cloro original.

Cuando se usa cloro para desinfección, se debe dosificar a niveles conocidos de cloro activo, el cual solamente debe ser consumido parcialmente; ya que luego de un periodo de contacto debe mantenerse a un nivel adecuado de cloro residual. A esta variación entre el nivel de cloro añadido luego de la dosificación y el nivel de cloro residual, se le denomina *demanda de cloro* (cantidad de cloro que debe añadirse para alcanzar un nivel deseado de cloro residual). No importa la presentación en la que se use el cloro (hipoclorito de sodio, cloro gas, hipoclorito de calcio), estos decrecen luego de un tiempo de contacto (EPA, 1999; Fonseca-Montes-de-Oca, 2004).

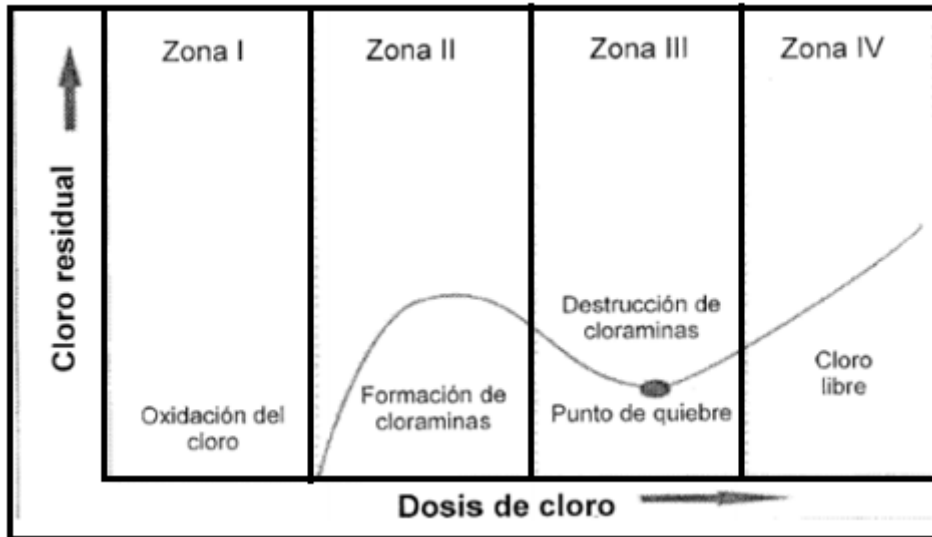
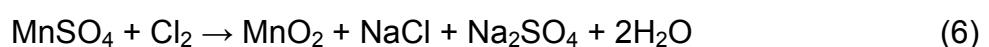
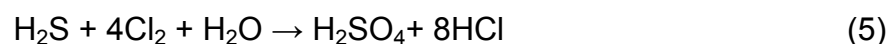
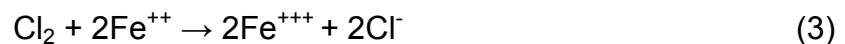


Figura 4. Comportamiento de cloro al ir añadiendo agua (Metcalf y Eddy, 2003)

La demanda de cloro que necesita el agua se determina experimentalmente por el método de punto de quiebre (*breakpoint* en inglés) como se observa en la Figura 4 (Metcalf y Eddy, 2003). Este punto se refiere a la cantidad de cloro necesario para producir la presencia de cloro residual libre y con esto asegurar la desinfección total y la eliminación del nitrógeno (de tipo amoniacal) de las aguas en tratamiento.

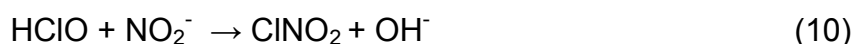
En la Figura 4 se observa el comportamiento de las diferentes formas de cloro que se tiene al añadir el agua. Conforme se va añadiendo cloro, las sustancias que más fácilmente funcionan con el Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S o la materia orgánica, reaccionan con el cloro y lo reducen en gran parte a ión cloruro (zona I, ecuaciones 3, 4, 5 y 6).



Una vez satisfecha esta demanda, el cloro continuará reaccionando con el amoníaco para formar cloraminas, proceso que corresponde a la zona II. En caso de que las reacciones sean molares menores a 1 entre cloro y amoníaco, se formarán monocloramina y dicloramina (ecuaciones 7 y 8). La distribución de estas dos formas viene dictada por sus velocidades o rapidez de formación, que son función de la temperatura y del pH.



En las zonas II y III, algunas de las cloraminas se transformarán en tricloruro de nitrógeno mientras que las restantes cloraminas se oxidarán a óxido de nitrógeno y nitrógeno y, el cloro se reducirá a ión cloruro (ecuaciones 9, 10 y 11).



Si se continúa añadiendo cloro, todas las cloraminas se oxidarán en la zona III (punto de quiebre). La adición de cloro más allá del punto de quiebre, que es la zona IV, producirá un aumento del cloro libre disponible directamente proporcional al cloro añadido (Metcalf y Eddy, 2003).

2.4. Desinfección con energía ultravioleta

La luz ultravioleta es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X (100 nm) y la luz visible (400 nm). La radiación ultravioleta se clasifica en cuatro regiones, las cuales son: la UV de vacío (100-200 nm), UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-C (200-280 nm). El intervalo óptimo de

UV para efectos germicidas está entre 245 y 285 nm (EPA, 1999; Wright y Cairns, 1998).

Este método tiene ventajas y desventajas, las cuales se citan a continuación (EPA, 1999; Liberti *et al.*, 2000; Malley *et al.*, 1995; Rajala *et al.*, OMS, 2003; WERF, 1995; Wolfe, 1990):

Ventajas:

- a) No produce cambios organolépticos en el agua
- b) Desinfectante efectivo en la iniciación de bacterias, virus y quistes de parásitos
- c) Más efectivo que el cloro en la iniciación de virus, esporas y quistes
- d) No forma subproductos de la desinfección no otros residuos químicos
- e) Tiempo de contacto corto requeridos para inactivar bacterias y virus
- f) No se manejan ni almacenan reactivos químicos peligrosos
- g) Costo de operación más bajo que la mayoría de los métodos alternativos de desinfección.

Desventajas:

- a) Puede haber reactivación en presencia o ausencia de luz solar
- b) No se puede medir inmediatamente la eficiencia de la desinfección (requiere análisis microbiológico)
- c) Debido a que no se forma ningún residual es necesario un desinfectante químico secundario para mantener un residual que asegure la desinfección en todo el sistema de distribución, con lo que aumentaría el costo de la desinfección.

A continuación en la Tabla 7, se muestra una comparación de los dos tratamientos mencionados, en los cuales se muestran sus diferencias y similitudes.

Tabla 7. Comparación de los desinfectantes cloro y ultravioleta (Metcalf y Eddy, 2003; WERF, 1995)

Puntos a comparar	Cloro	UV
Disponibilidad	Bajo costo	Moderadamente a alto costo
Habilidad desodorizante	Alta	Ninguna
Toxicidad a microorganismos	Alta	Alta
Solubilidad	Ligera	NA
Estabilidad	Estable	Debe generarse al usarse
Toxicidad a formas de vida superiores	Alta	Tóxico
Homogeneidad	Homogéneo	NA
Interacción con materia extraña	Oxida materia orgánica	Moderada
Toxicidad a temperatura ambiente	Alta	Alta
Penetración	Alta	Alta
Corrosión	Altamente corrosivo	NA

De la Tabla 7 se deriva que el mejor método de desinfección para el sistema en estudio parece ser el de cloración, debido a su bajo precio, gran eficiencia y facilidad de utilización.

Capítulo III

Metodología

3.1. Localización del humedal artificial de flujo horizontal

El humedal artificial en estudio se localiza dentro de las instalaciones del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur) de la UNAM (Fig. 5). El área donde está ubicado forma parte de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), que se encuentra al suroeste de la Ciudad de México, en los terrenos de Ciudad Universitaria, por lo que es custodiada y manejada por la Universidad Nacional Autónoma de México (Palacios-Vargas *et al.*, 2009).

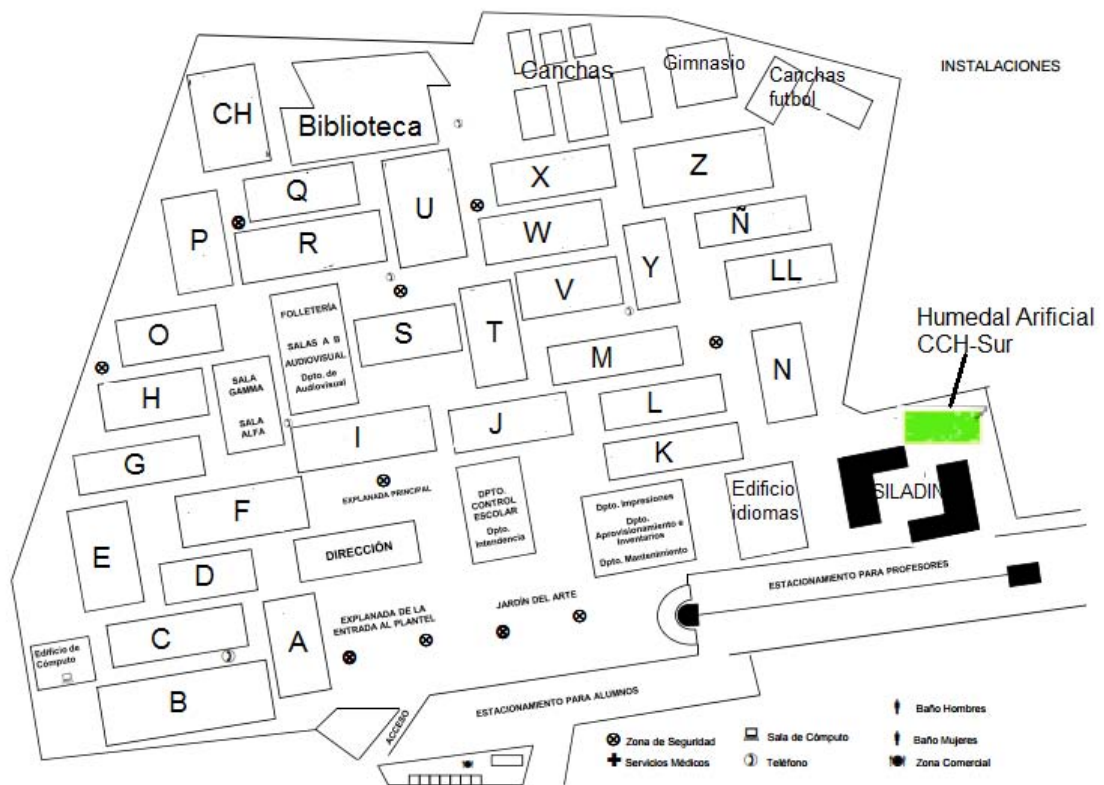


Figura 5. Localización del humedal artificial (CCH-Sur, 2014)

3.2. Agua a tratar

El agua residual a tratar por el humedal artificial proviene de los edificios del Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación (SILADIN) y del llamado Edificio de Idiomas (Figura 6). La primera descripción del sistema se encuentra en un libro electrónico (Arreguín-Rojas *et al.*, 2013).

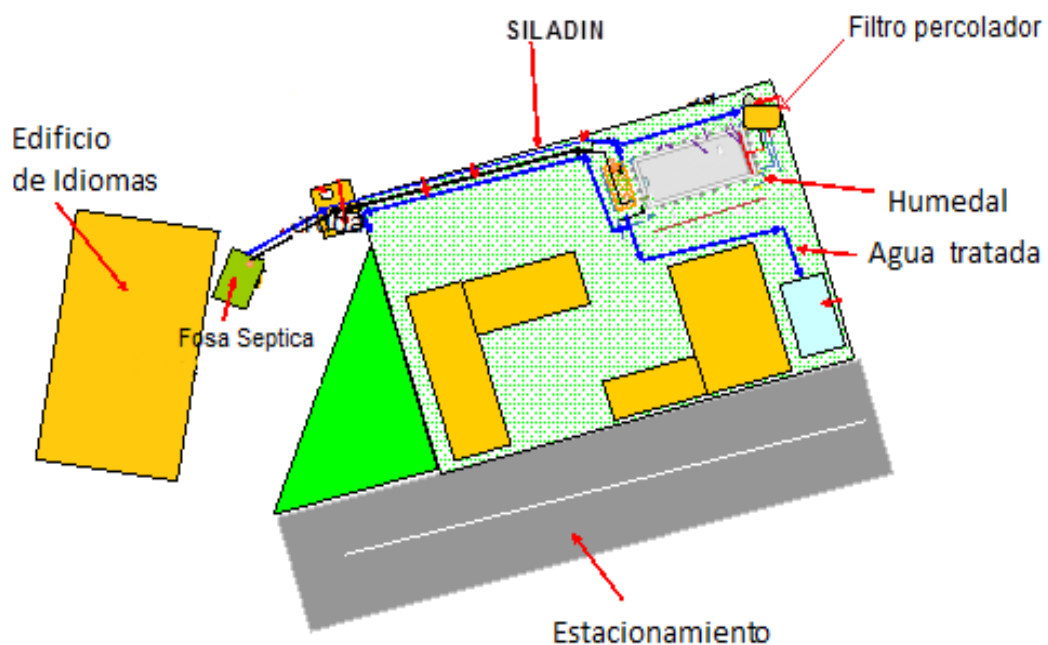


Figura 6. Diagrama esquemático de ubicación del humedal artificial (Sánchez-Tovar, 2012)

El sistema, construido con el apoyo parcial de varias entidades, puede describirse de manera simple como sigue: comienza cuando el agua se descarga por gravedad a una fosa séptica.

Una vez que las aguas negras se vierten en esta unidad de separación, al llegar al último compartimiento el agua clarificada es enviada a un filtro percolador para su posterior distribución al humedal artificial de flujo horizontal.

3.3. Parámetros que se realizaron en el desarrollo de la investigación

3.3.1. Parámetros físicos y químicos *in situ*

Los parámetros que se midieron *in situ* fueron pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto (OD), sólidos disueltos totales (SDT) (Tabla 8). Se usó un equipo multiparamétrico marca Hanna modelo HI 9821. Las mediciones se basaron en las siguientes normas mexicanas:

- a) **NMX-AA-034-SCFI-2000 (DOF, 2000a)**. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.
- b) **NMX-AA-008-SCFI-2011 (DOF, 2011)**. Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba-. La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático
- c) **NMX-AA-007-SCFI-2000 (DOF, 2000b)**. Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura, en aguas naturales crudas no salinas (epicontinentales, subterráneas y pluviales), en aguas salinas (marinas, costeras, de estuarios, esteros, marismas y subterráneas), aguas residuales crudas municipales e industriales y aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo comprendido entre 0°C y 45°C.

- d) NMX-AA-093-SCFI-2000 (DOF, 2000c).** Análisis de agua - determinación de la conductividad eléctrica - método de prueba. Determinación de la conductividad electrolítica en agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada.
- e) NMX-AA-012-SCFI-2001 (DOF, 2001a).** Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales utilizando las técnicas de azida modificada y la electrométrica. Esta norma mexicana es aplicable para el análisis de aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Tabla 8. Parámetros *in situ* a medir en las muestras

Parámetro	Cantidad	Envase	Preservación	Tiempo	Norma
SDT (mg/L)	100 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-034-SCFI-2000 (DOF, 2000a)
pH	100 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-008-SCFI-2011 (DOF, 2011a)
T (°C)	100 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-007-SCFI-2000 (DOF, 2000b)
CE (µS/cm)	100 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-093-SCFI-2000 (DOF, 2000c)
O ₂ (mg/L)	100 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-012-SCFI-2001 (DOF, 2001a)

SDT: sólidos disueltos totales; pH: potencial de hidrógeno; T: Temperatura; CE: conductividad eléctrica; mL: mililitros; O₂: oxígeno disuelto

3.3.2. Parámetros físicos y químicos que se midieron en el laboratorio

Los parámetros físicos y químicos que se midieron en el laboratorio se presentan en la Tabla 9, los cuales fueron: demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, nitratos, sulfuros, sulfatos, sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos totales (SST).

- f) NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b).** Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales

(DBO₅) y residuales tratadas - método de prueba. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

- g) NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001c).** Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. El método que involucra el uso de dicromato es preferible sobre procedimientos que utilizan otros oxidantes debido a su mayor potencial redox y su aplicabilidad a una gran variedad de muestras.
- h) NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001d).** Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.
- i) NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001e).** Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba. El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. El nitrato se encuentra sólo

en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato como N/L. El nitrato es un nutriente esencial para muchos organismos autótrofos fotosintéticos y, en algunos casos, ha sido identificado como el factor determinante del crecimiento de estos. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suele encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario.

- j) **NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982).** Análisis de agua - determinación de sulfuros. Esta Norma es aplicable a aguas naturales, residuales y estuarinas. El método iodométrico se aplica si el contenido de sulfuros es mayor de 1 mg/L; éste método se usa para aguas residuales y aguas que oxidan parcialmente el azufre y que están libres de interferencias, asimismo, para muestras que han sido das recientemente.
- k) **NMX-AA-074-1981 (DOF, 1981).** Análisis de agua - determinación del ion sulfato. Determinación del ion sulfato en aguas naturales y residuales con un ámbito de aplicación de 10 a 100 mg/L para el método turbidimétrico que se aplica cuando se requiere una determinación rápida de rutina o control de aguas industriales (ambos métodos expresados como SO_4^{2-}).
- l) **NMX-AA-034-SCFI-2001 (DOF, 2001f).** Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

Tabla 9. Parámetros físico-químicos medidos en laboratorio

Parámetro, mg/L	Cantidad	Envase	Preservación	Tiempo	Norma
DBO _{Total}	200 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis inmediato	NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b)
DQO _{Total}	50 mL	Plástico o vidrio	pH<2 con H ₂ SO ₄	Análisis dentro de los 28 días	NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001c)
Fósforo (P)	50 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis dentro de los 28 días	NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001d)
Nitratos (NO ₃)	200 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis dentro de 48 horas	NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001e)
Sulfuros (S ²⁻)	50 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis dentro de los 28 días	NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982)
Sulfatos (SO ₄)	50 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis dentro de los 28 días	NMX-AA-074-1981 (DOF, 1981)
Sólidos (ST, SVT, SDT, SSV, SST)	10 mL	Plástico o vidrio	4°C	Análisis dentro de los 7 días	NMX-AA-034-SCFI-2001 (DOF, 2001f)

DBO: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno

3.3.3. Parámetros microbiológicos que se midieron en el laboratorio

Los huevos de helminto y coliformes fecales fueron los parámetros con los que se dio seguimiento al HAFH (Tabla 10).

m) NMX-AA-42-1987 (DOF, 1987). Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva. La presencia y extensión de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de

microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. El examen de muestras de agua para determinar la presencia de microorganismos del grupo coliforme que habitan normalmente en el intestino humano y de otros animales de sangre caliente, da una indicación. Dada la limitada capacidad de algunos miembros del grupo de organismos coliformes para sobrevivir en agua; sus números también pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal.

n) **NMX-AA-113-SCFI-2000 (DOF, 2000d)**. Análisis de agua – medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica - método de prueba. Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadíos infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada. Así, el agua constituye un vehículo directo o indirecto de diseminación de helmintos, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando ésta se emplea para el riego de cultivos.

Tabla 10. Parámetros microbiológicos medidos en laboratorio

Parámetro	Cantidad	Envase	Preservación	Tiempo	Norma
Coliformes fecales	200 mL	Plástico o vidrio	4°C 0.008% Na ₂ S ₂ O ₃	Análisis inmediato, 6 horas	NMX-AA-42-1987 (DOF, 1987)
Huevos de helminto	5000 mL	Vidrio	4°C	Análisis inmediato, 6 horas	NMX-AA-113-SCFI-2000 (DOF, 2000d)

3.4. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reúsen” (reutilicen) en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y “reúso” (reutilización). En el caso de que el servicio al público se

realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su “reúso” (reutilización) o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma.

3.5. Toma de muestras del influente y efluente del HAFH

Cada una de las muestras se toma según lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 (DOF, 1980). Tal y como lo indica la norma citada, se deben etiquetar los frascos contenedores y una vez tomada la muestra debe colocarse en una hielera con bolsas refrigerantes o hielo para su transporte al laboratorio, de preferencia a una temperatura entre los 4 y 10°C, cuidando de no congelar las muestras. Una vez en el laboratorio, son almacenadas en una cámara de refrigeración en oscuridad a una temperatura entre 4 y 10°C.

Se realizaron 12 visitas al HAFH durante nueve meses, de los cuales dos (Julio y Diciembre) no se llevaron a cabo visitas debido al periodo vacacional, para llevar a cabo el muestreo de tres puntos a) Influyente (agua cruda), b) Filtro percolador (agua oxigenada) y c) Efluente (agua tratada por el humedal), el total de muestras fue de 36 (Figuras 7a,b). En la Tabla 11 se presentan las fechas en que se llevaron a cabo cada muestreo, y el volumen de agua recolectado de cada punto para su subsecuente análisis. El tiempo de residencia de este humedal es de 10 a 15 días, y debido a esto se llevaron a cabo las visitas en las diferentes fechas.

Tabla 11. Información de la toma de muestra

Muestreo	Fecha del muestreo	Influente (L) (agua cruda)	Filtro (L) (agua oxigenada)	Efluente (L) (agua tratada por el HAFH)
1	23-06-2014	5	5	5
2	11-08-2014	5	5	5
3	1-09-2014	5	5	5
4	22-09-2014	5	5	5
5	6-10-2014	10	10	10
6	20-10-2014	10	10	10
7	27-10-2014	10	10	10
8	10-11-2014	10	10	10
9	12-01-2015	10	10	10
10	19-01-2015	10	10	10
11	26-01-2015	10	10	10
12	3-02-2015	10	10	10

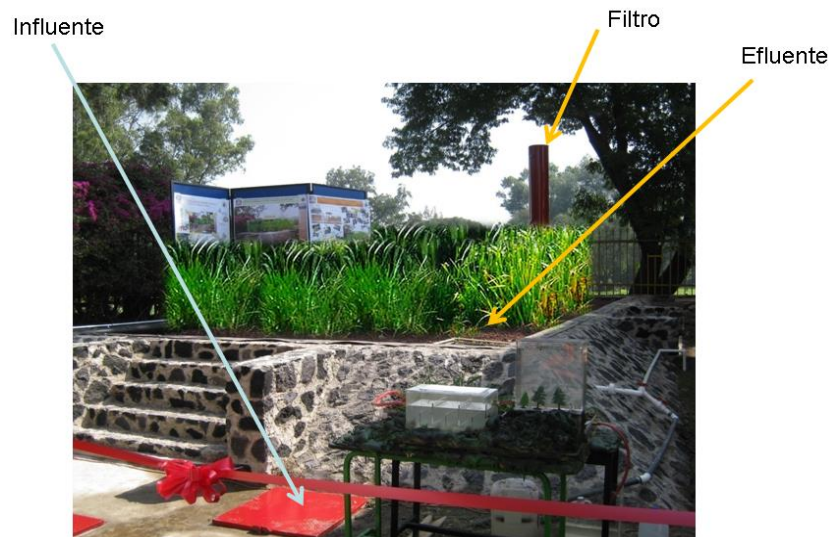


Fig. 7a. Puntos de muestreo



Fig. 7b. Humedal artificial de flujo horizontal en el CCH Sur (Sánchez-Tovar, 2010)

3.6. Diagrama de flujo

Las actividades que se realizaron sistemáticamente durante el desarrollo de la investigación se aprecian en la Figura 8.

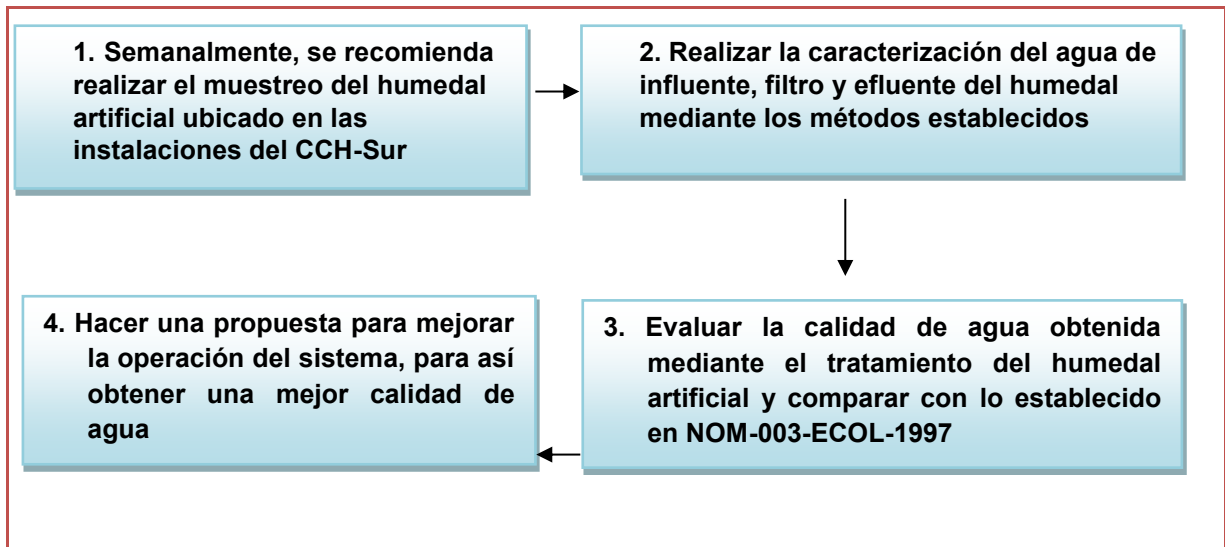


Fig. 8. Diagrama de flujo de las actividades a desarrollar en esta investigación

3.7. Análisis estadísticos

A los datos experimentales obtenidos se les aplicaron análisis estadísticos para confiabilidad, exactitud y precisión.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1. Funcionamiento del humedal artificial de flujo horizontal

En el HAFH existen dos líneas de alimentación. La primera va de los drenajes del SILADIN a la fosa séptica S-1. La segunda va de los drenajes del Edificio de Idiomas a una pequeña fosa séptica S-2 y de allí se une a la línea de salida de S-3. Hay un registro anterior a la fosa séptica. Originalmente se enviaba directamente a un filtro percolador para su posterior distribución al humedal artificial de flujo horizontal. Actualmente se han instalado un par de tanques que permiten retener más sólidos ya que las fosas sépticas no son efectivas para realizar esta separación sólido-líquido debido al problema constructivo en el siglo XX que no consideró la purga de los lodos por lo que se encuentran azolvadas (Figura 9). Se planea a futuro la instalación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, para digerir los lodos de ambas fosas y quemar el biogás producido en un quemador que permita precalentarlos al salir de las fosas sépticas para aumentar su eficiencia de degradación.

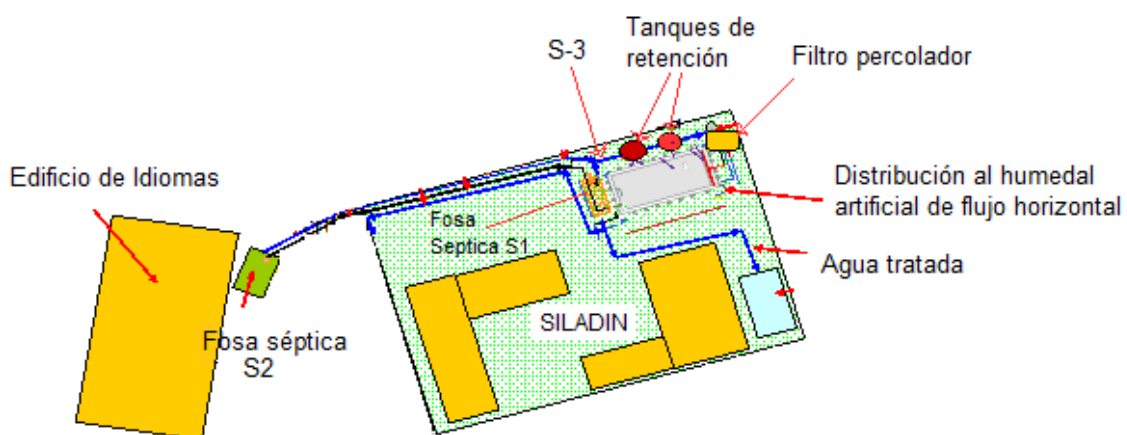


Figura 9. Diagrama esquemático del funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales basado en un humedal artificial de flujo horizontal

La calidad de agua que proviene de un sistema de tratamiento ya sea mediante humedales artificiales o cualquier otro debe estar acorde con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997) para que, en este caso, el agua obtenida pueda ser reutilizada para regar las áreas verdes aledañas. La Tabla 1 presentó esta información y el segundo objetivo de esta investigación fue el evaluar si se logran cumplir estos parámetros.

4.2. Seguimiento de los parámetros físicos y químicos *in situ* de las muestras tomadas en el influente, filtro percolador y efluente del humedal

La evaluación de los parámetros *in situ* de las 12 muestras correspondientes a cada punto de muestreo se realizaron en el momento en que se tomaron las muestras *in situ* mediante un equipo multiparamétrico descrito en la sección 3.3.1. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros físicos y químicos *in situ* de 12 muestras correspondientes a cada uno de los puntos (influyente, filtro percolador y efluente del humedal), durante el periodo de estudio

Parámetro	Influente	Filtro percolador	Efluente
SDT (mg/L)	1257.0±8.2	1168.4±5.0	873.0±3.2
pH	7.7±0.1	7.5±0.1	7.2±0.0
T (°C)	21.1±1.1	21.2±1.4	21.3±1.4
CE (µS/cm)	2375.7±5.0	2056.0±4.0	1745.4±3.2
O ₂ (mg/L)	1.3±0.1	1.1±0.3	0.9±0.3

4.2.1. Seguimiento del pH

En la Fig. 10 se presentan los valores de pH del influente al sistema que oscilaron entre 7.2 y 8.6 con un valor promedio de 7.7±0.1. En cuanto a la salida del primer sistema (filtro percolador) que ayuda a homogeneizar el agua a tratar, así como a oxigenarla se tiene un pH entre 6.7 y 8.5 con un valor promedio de 7.5±0.1. Finalmente, el pH de la salida después del tratamiento con el humedal presenta valores entre 6.8 y 7.7 con un valor promedio de 7.2±0.0 (Anexo 1). El cambio de pH de influente con efluente es del 6%, mientras que de filtro percolador con efluente es del 5%. Estos resultados son

considerados como un pH adecuado para el siguiente tratamiento que se pretende implementar, que es una desinfección. El pH registrado es ligeramente alcalino, esto puede ser debido a la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos (Jiménez, 2002). Aunque también, en los meses de lluvia (septiembre y octubre), tiene un pH más ácido, esto se debe a que el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) que existen en el aire entran en contacto con el agua de lluvia y producen lluvia ácida (National Geographic, 2015). El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6.5 a 8.5; al igual que para algunas reacciones, como el cloro, solo pueden llegar a realizarse cuando existe el mismo intervalo de pH (Lenntech, 2015).

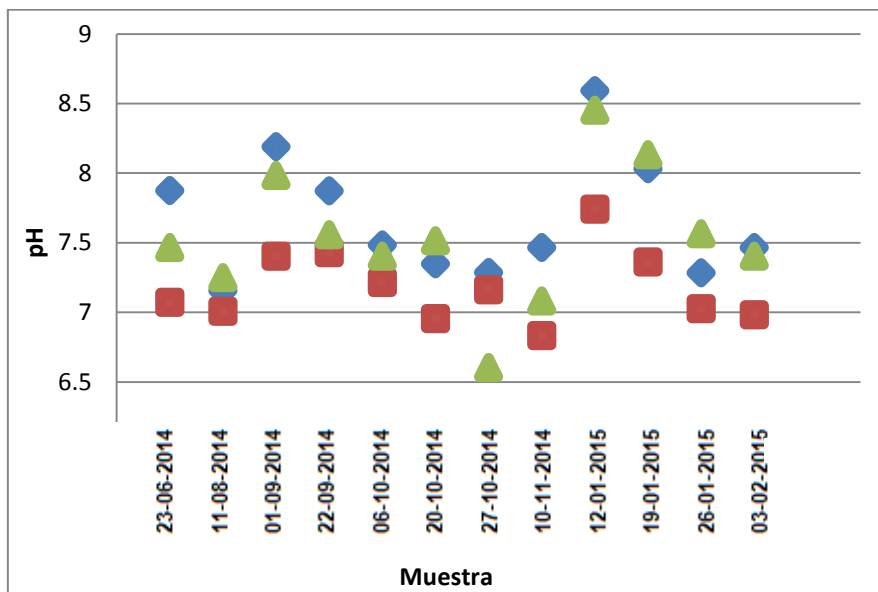


Fig. 10. Seguimiento de pH de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.2.2. Seguimiento de temperatura y de oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) se encuentra muy relacionado con la temperatura. Del efecto de ambos depende la vida de los organismos. Como se observa en la Fig. 11, los resultados de la temperatura y del oxígeno disuelto al efluente, a

medida que la temperatura aumenta, el oxígeno disuelto en el agua disminuye (Anexo 1).

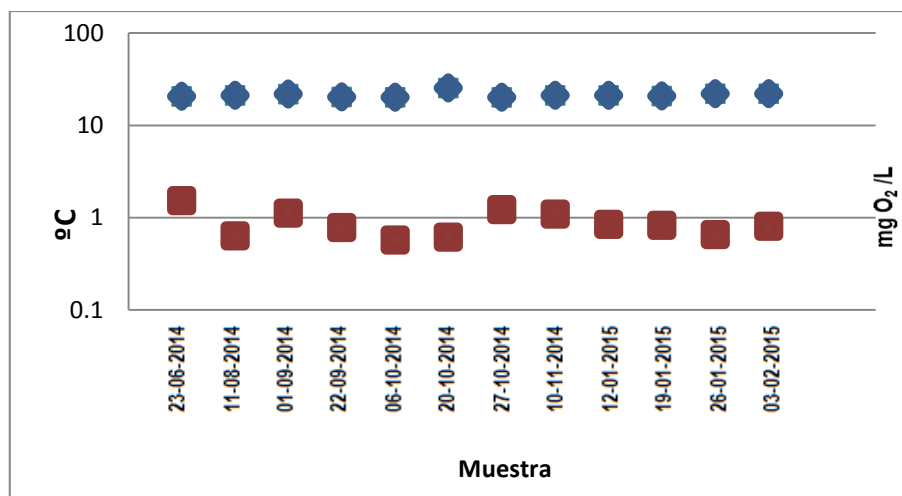


Fig. 11. Seguimiento de \diamond -temperatura y de \square -oxígeno disuelto (OD) de las muestras tomadas al Efluente, durante el periodo de estudio

4.2.3. Seguimiento de conductividad eléctrica y de sólidos disueltos totales (SDT)

Tanto la conductividad eléctrica como los sólidos disueltos totales, se encuentran estrechamente relacionados, como se aprecia en la Fig. 12, ya que ambos presentan el mismo comportamiento, en ella que se observa que cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor es el valor de la conductividad eléctrica (Lenntech, 2015).

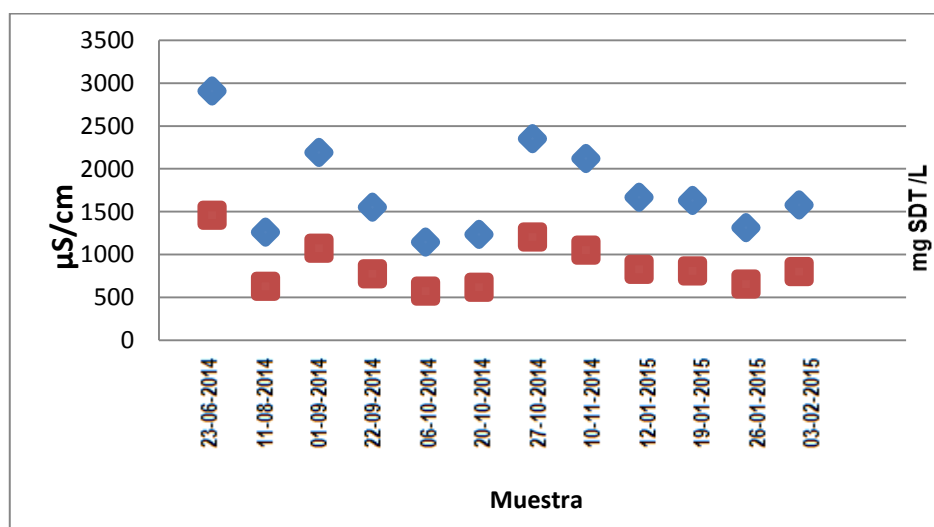


Fig. 12. Seguimiento de \diamond -Conductividad eléctrica y de \square -sólidos disueltos totales (SDT) de las muestras tomadas al Efluente, durante el periodo de estudio

4.3. Seguimiento de cada uno de los parámetros físicos y químicos medidos en el laboratorio del influente, filtro percolador y efluente del humedal

4.3.1. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno, tiene valores para el influente de 513.7 ± 4.8 mg/L; mientras que para la salida del primer sistema (filtro percolador) tiene un valor de 453.3 ± 3.6 mg/L, y por último el efluente del HAFH, 93.7 ± 1.1 mg/L. El porcentaje de remoción del influente con respecto al efluente es de 82%, y del filtro percolador y efluente del 80% (Anexo 2). El humedal, como se observa en la Fig. 13, trata con gran efectividad la DBO_5 , ya que disminuye la contaminación de los compuestos biodegradables del agua residual proveniente del SILADIN y del Edificio de Idiomas. Esta disminución de la materia orgánica en el periodo en que se llevó a cabo el seguimiento se debe principalmente a que hay gran cantidad de materia biológica (organismos), que remueve la materia orgánica. En algunas fechas (1/09/2014, 10/11/2014, 12/01/2015, 19/01/2015 y 3/02/2015) se observa que el valor se acerca a lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997 de 20 mg/L para contacto directo, pero en el resto de los muestreos los resultados de la DBO_5 se encuentran por arriba del límite máximo permisible. El pico que se formó el 12/01/2015, puede deberse a un error experimental debido a que la tendencia de los resultados del sistema a la entrada disminuye, no aumenta como es en este caso.

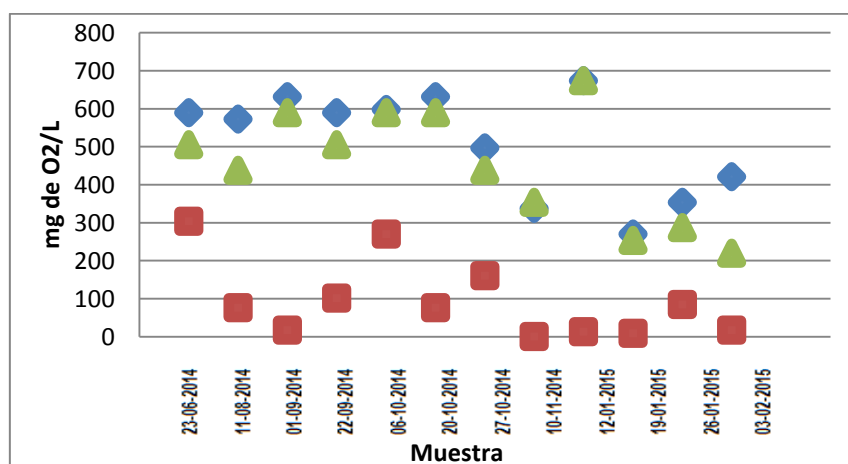


Fig. 13. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.3.2. Seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO)

El influente del sistema del humedal entra con un valor promedio de 310.2 ± 2.0 mg DQO/L. Posteriormente, al pasar por el filtro percolador se reduce la carga orgánica a 106.7 ± 1.9 mg DQO/L. Finalmente, al salir del humedal artificial se tiene un efluente con 34.0 ± 1.1 mg DQO/L (Anexo 3). La concentración de DQO, al ingreso del agua residual al sistema, que se encuentra entre noviembre y enero (meses sin lluvia) es más alta, mientras que en los meses con lluvia, la concentración es menor. La transformación de materia químicamente oxidable del sistema en el influente y efluente es del 89%, mientras que del filtro percolador al efluente es del 68%. Esto quiere decir que el sistema aún se encuentra en un periodo de estabilización ya que se tiene reportado que dichos sistemas pueden alcanzar hasta un 95% de remoción (Bernal *et al.*, 2001). Sin embargo debe considerarse que el influente incluye los vertimientos que se dan en los laboratorios del SILADIN y no se sabe si los estudiantes estén vertiendo a la tarja residuos peligrosos que estén afectando la calidad de la depuración del sistema (Fig. 14).

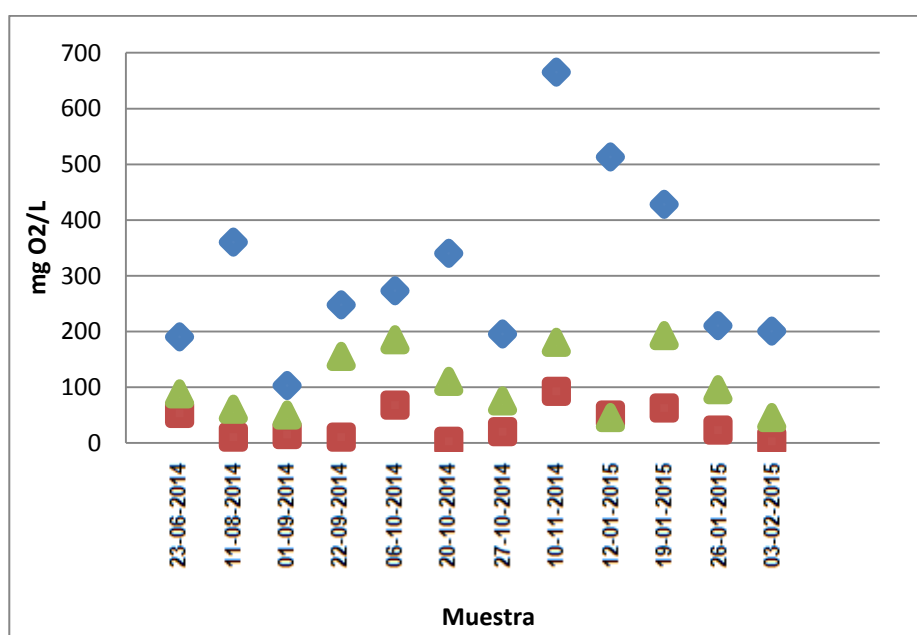


Fig.14. Seguimiento de demanda química de oxígeno, DQO, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.3.3. Seguimiento de fósforo

En cuanto al fósforo presente en el influente al humedal fue de 30.9 ± 4.6 mg P/L, al pasar por el filtro percolador tuvo un valor de 22.8 ± 4.6 mg P/L, y el efluente del humedal artificial tuvo una cantidad de fósforo de 16.4 ± 5.1 mg P/L (Anexo 4). Se observó una disminución de concentración, que pudiera deberse tanto a una porción removida por las plantas, como por la acumulada en el sustrato siendo el resto arrastrada por el agua (Sánchez-de-F., 2001) y esto se vio más reflejado en los meses donde había lluvia. Una de las limitantes que llega a tener este sistema es la remoción de este elemento, ya que lo más que puede llegar a remover es entre 30 y 50% del fósforo presente (Lara, 1999; Reyes-Luz, 2006). En este caso, del influente al efluente se obtuvo una remoción del casi 50%, y del filtro percolador con respecto a la cantidad de salida del 28%. La Fig. 15 presenta el comportamiento en el sistema.

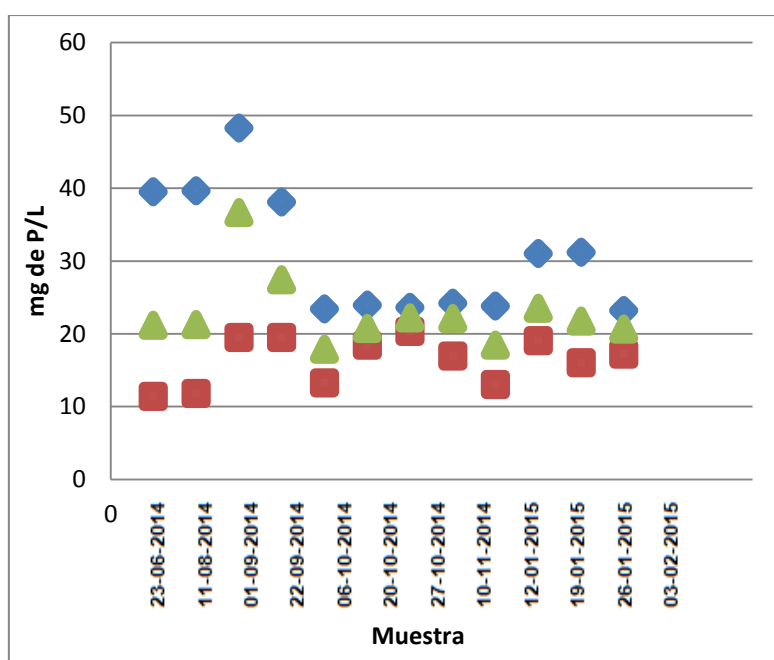


Fig. 15. Seguimiento de fósforo de las muestras tomadas al \diamond - Influente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.3.4. Seguimiento de nitratos

De las 12 mediciones realizadas en esta técnica, se desecharon las primeras dos debido a errores experimentales y que ya no se contaba con la muestra. En cuanto a los valores de contenido de nitratos (Fig. 16), se observa que la cantidad de entrada con la de salida es muy alta en todos los casos, existió un aumento en cuanto a la cantidad que entró (0.3 ± 0.2 mg NO_3^-/L) con respecto a valor obtenido en la salida del filtro percolador (1.3 ± 0.1 mg NO_3^-/L) y el efluente (2.7 ± 0.1 mg NO_3^-/L), esta información se encuentra completa en el Anexo 5. Este aumento a la salida se debe a que el nitrato proviene del nitrógeno orgánico amoniacal (N-NH_3), que al entrar en contacto con el oxígeno disuelto (O_2), se transforma por oxidación a nitritos (NO_2^-) (Ecuación 12), para después transformarse a nitratos (NO_3^-) (Ecuación 13) (Apolonio, 2011; Durán-de-Bazúa *et al.*, 2008; Huanosta-Gutiérrez, 2006; Padrón-López, 2005; Rodríguez-Monroy y Durán-de-Bazúa, 2006).

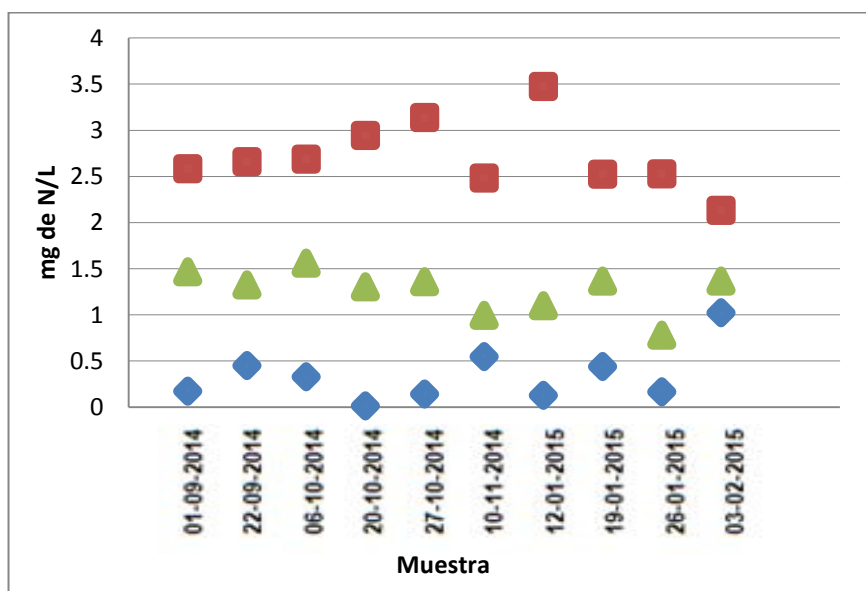
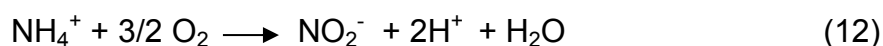


Fig. 16. Seguimiento de nitratos de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.3.5. Seguimiento de sulfuros y sulfatos

Los sulfuros (Anexo 6), por su parte, se encuentran en el influente del HAFH 32.8 ± 3.6 mg S^{2-}/L , después del filtro percolador su valor aumenta muy ligeramente a 33.8 ± 3.5 mg S^{2-}/L y, finalmente, en el efluente del sistema se tienen 34.5 ± 3.5 mg S^{2-}/L (Fig. 17). El comportamiento de los sulfatos (Anexo 7) en el influente presenta valores de 1175.8 ± 2.9 mg SO_4^{2-}/L , posterior al filtro percolador de 806.7 ± 9.8 mg SO_4^{2-}/L y en el efluente del sistema del humedal artificial de 714.2 ± 10.8 mg SO_4^{2-}/L , lo que arroja una remoción total del influente y efluente del 39% y del 12% entre el filtro percolador y el efluente (Fig. 18). Como se aprecia en la ecuación 14 (Hernández, 2013), esto se debe a la transformación de los sulfatos a sulfuros por organismos anaerobios.

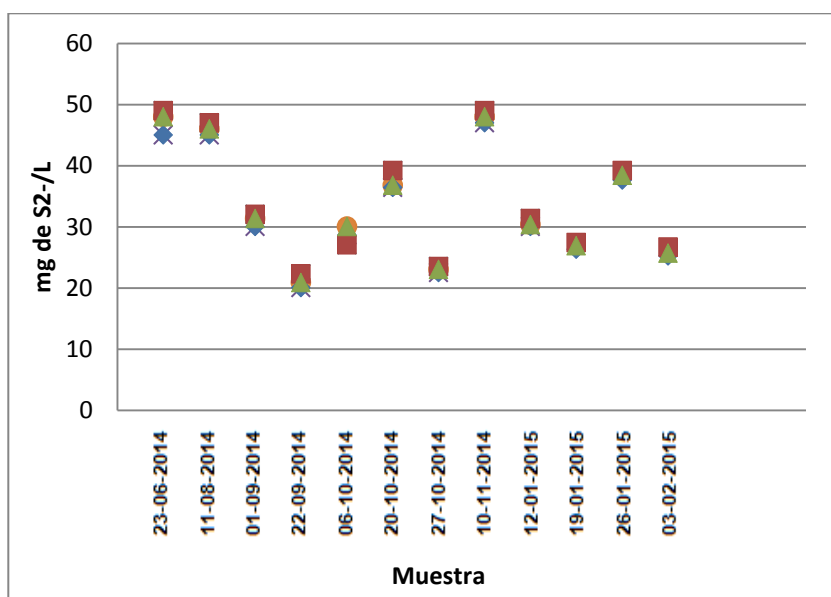
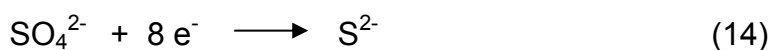


Fig. 17. Seguimiento de sulfuros, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

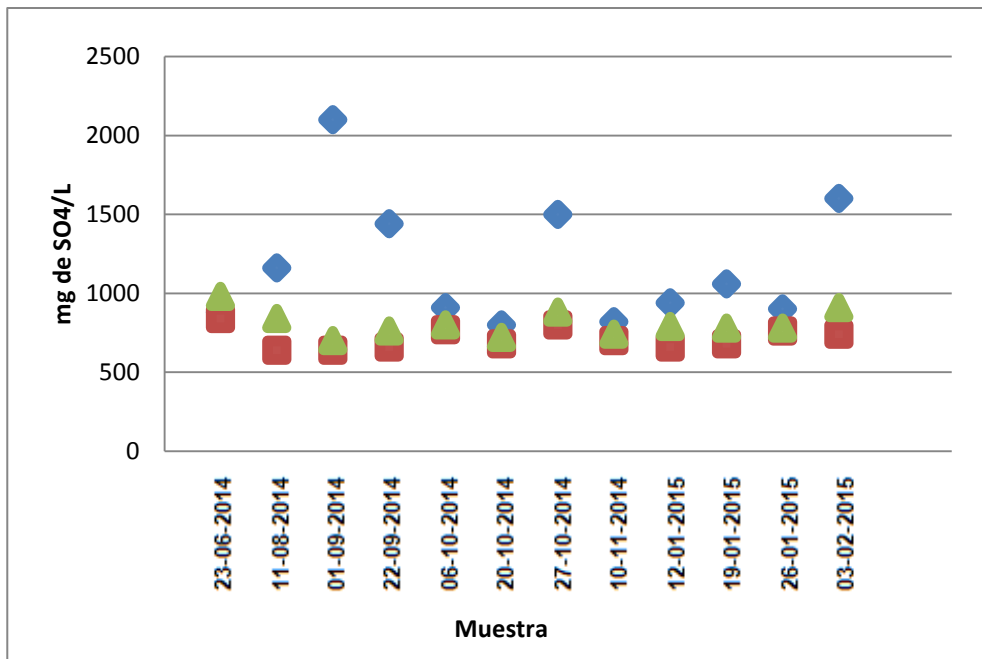


Fig. 18. Seguimiento de sulfatos, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.3.6. Seguimiento de los sólidos totales, volátiles totales, disueltos totales, suspendidos volátiles y suspendidos totales (ST, SVT, SDT, SSV, SST)

Los resultados promedio obtenidos para ST fueron de 990.8 ± 3.5 _{Influente}, 767.5 ± 3.8 _{Filtro percolador} y 755.5 ± 2.8 _{Efluente} mg ST/L, presentando una disminución del 24% del influente al efluente, mientras que del filtro percolador a la salida del 2% (Fig. 19). En cuanto a los valores de SVT se tuvieron 431.7 ± 1.9 _{Influente}, 333.3 ± 1.9 _{Filtro percolador} y 345.5 ± 2.2 _{Efluente} mg SVT/L, teniendo una remoción para el influente con respecto al efluente del 20% y hubo un aumento en cuanto a la cantidad del filtro percolador con la salida del humedal (Fig. 20). Con los SDT, los resultados arrojados son de 552.5 ± 2.2 _{Influente}, 630.8 ± 0.1 _{Filtro percolador} y 603.6 ± 2.2 _{Efluente} mg SDT/L (Fig. 21). En el caso de los SST, se tuvieron valores de 438.3 ± 1.1 _{Influente}, 136.7 ± 0.4 _{Filtro percolador} y 151.8 ± 1.2 _{Efluente} mg SST/L, su descenso fue de 65% de influente a efluente (Fig. 22). Los SSV son los siguientes 556.7 ± 1.4 _{Influente}, 244.2 ± 0.9 _{Filtro percolador} y 203.6 ± 1.6 _{Efluente} mg SSV/L, disminuye un 63% del influente al efluente del humedal y del 17% del filtro percolador a la salida del humedal (Fig. 23). Los gráficos presentan dispersiones significativas, estas pueden deberse a las lluvias, ya que en época

de lluvia había gran cantidad de lodo y el agua salía de los tres puntos de muestreo con una mayor cantidad de sólidos, este fenómeno se observa claramente en los SST y SVT, en estos casos la cantidad que salía del filtro percolador fue menor que a la salida del HAFH (Anexo 8).

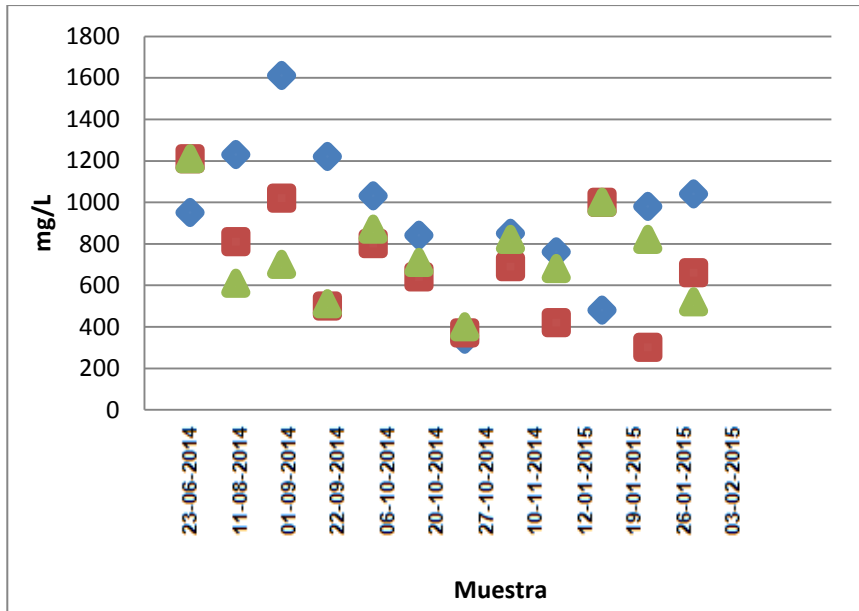


Fig. 19. Seguimiento de sólidos totales, ST, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle - Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

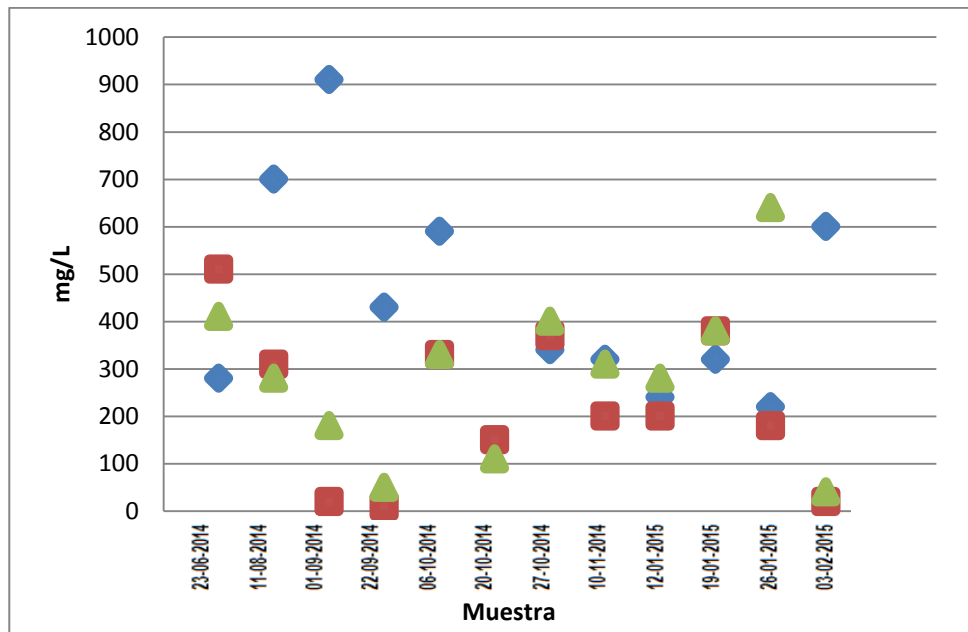


Fig. 20. Seguimiento de sólidos volátiles totales, SVT, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

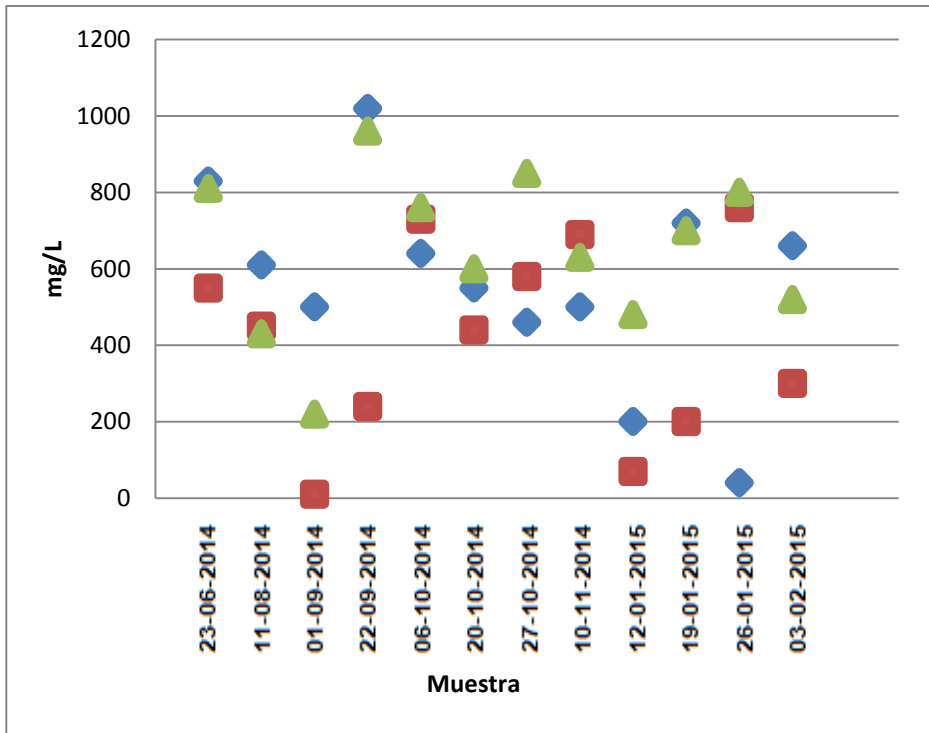


Fig. 21. Seguimiento de sólidos disueltos totales, SDT, de las muestras tomadas al \diamond -Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

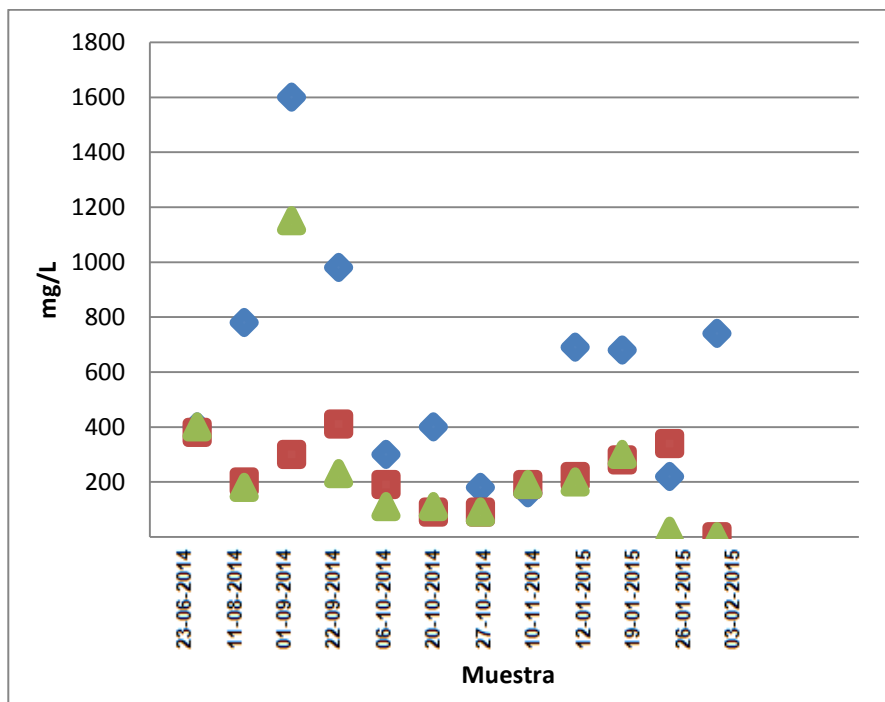


Fig. 22. Seguimiento de sólidos suspendidos totales, SST, de las muestras tomadas al \diamond -Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

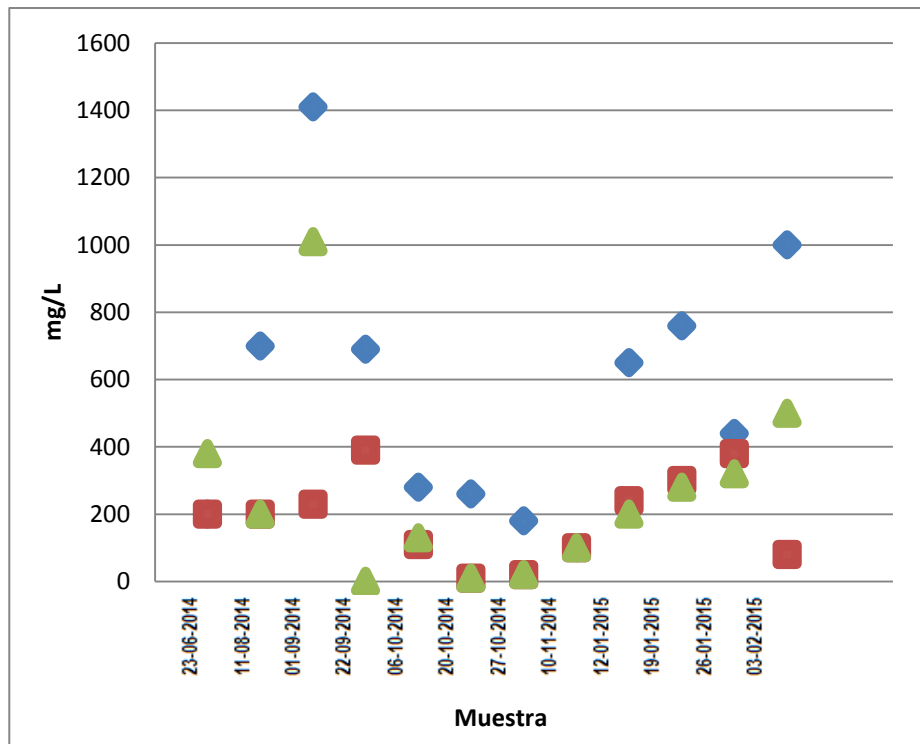


Fig. 23. Seguimiento de sólidos suspendidos volátiles, SSV, de las muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle -Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.4. Evaluación de los parámetros microbiológicos

En esta parte de la investigación se realizaron las determinaciones microbiológicas (coliformes fecales y huevos de helminto) apreciándose los resultados en la Tabla 13. Estas determinaciones se realizaron solamente en las últimas 8 visitas al HAFH, con la finalidad de contar con puntos de comparación entre cada una. Estas pruebas se deben realizar el mismo día que se obtiene la muestra.

Tabla 13. Evaluación de los parámetros biológicos de 8 muestras obtenidas al influente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio

Parámetro	Influente (agua cruda)	Filtro percolador (agua filtrada)	Efluente
Coliformes fecales NMP/100 mL	2375 \pm 8	1663 \pm 7	965 \pm 5
Huevos Helminto h/L	4 \pm 0	3 \pm 0	3 \pm 0

4.4.1. Seguimiento de coliformes fecales

Los resultados para coliformes fecales son de 2375 ± 8 _{Influyente}, 1663 ± 7 _{Filtro percolador} y 965 ± 5 _{Efluente} NMP/100mL (Anexo 9). En la Fig. 24, se observa que la reducción de coliformes fecales entre el influente y el efluente es del 59%, mientras que entre el filtro percolador y el efluente es de 42%, aunque la remoción es considerable, aún no se alcanza lo establecido con la NOM-003-ECOL-1997 para el caso de contacto directo u ocasional con seres humanos que debe ser de 240 NMP/100mL. El valor más bajo obtenido fue a 680 NMP/100mL, este resultado se presentó a finales de noviembre y principios de enero. Esto coincide con el periodo vacacional de los estudiantes del CCH-Sur, debido a que en esta época hay menor generación de contaminación fecal y estos son contaminantes que están presentes en grandes cantidades en el tracto gastrointestinal del hombre (Villalba, 2012). Por lo que se puede decir que, para cumplir con la normativa vigente para poder enviar el agua tratada para riego que pudiera tener contacto directo con los usuarios, el sistema basado en el HAFH necesita un método de desinfección para que alcance dicha normativa.

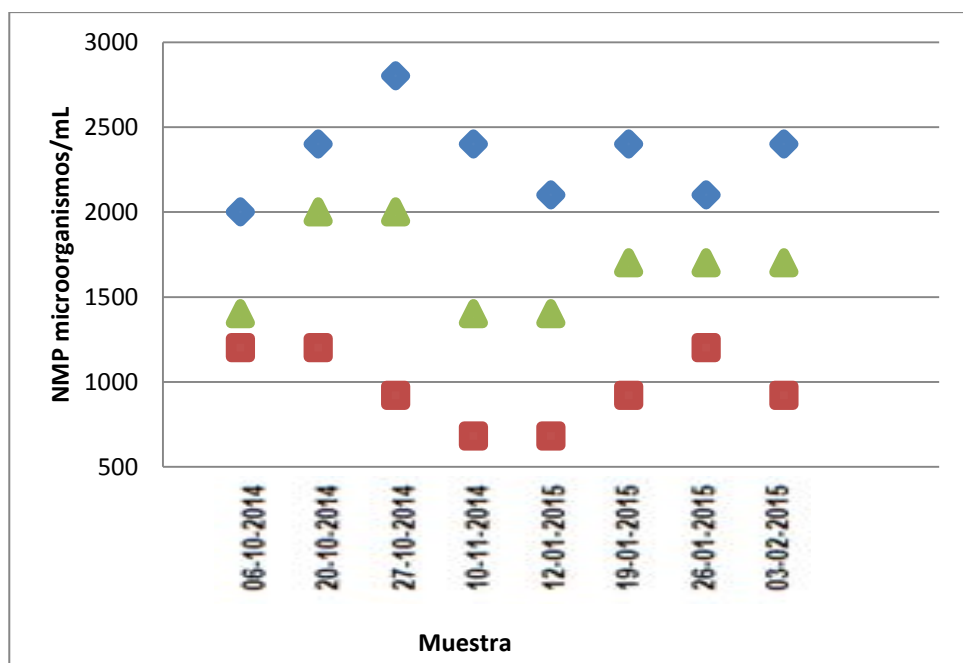


Fig. 24. Seguimiento de coliformes fecales de 8 muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle - Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.4.2. Seguimiento de huevos de helminto

En el caso de huevos de helminto presentaron valores de 4 ± 0 Influyente, 3 ± 0 Filtro percolador y 3 ± 0 Efluente h/L (Anexo 10). En este caso también se ve un descenso en la cantidad de huevos de influente a efluente, pero de filtro percolador al efluente no hay disminución, esto es porque aún no está en condiciones óptimas el agua del efluente para que se reutilice (reusar todavía no es aceptado por la Academia de la Lengua Española) en servicios de contacto humano, según lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 que menciona que la cantidad máxima permisible de huevos de helminto es de 1 h/L. Lo cual no se cumplió. En la Fig. 25, se aprecia que la cantidad de huevos en el efluente con respecto al influente se vio beneficiada, mientras que del filtro percolador al efluente no hubo tal disminución. Los huevos de helminto son considerados como los organismos con mayor resistencia biológica dentro de la ingeniería ambiental, lo cual se debe a la gran cantidad de capas de protección que posee (tres a cuatro), las cuales tienen resistencia mecánica que disuelven los disolventes orgánicos, y son capaces de proteger contra la acidez extrema, agentes oxidantes y detergentes (Jiménez, 2007).

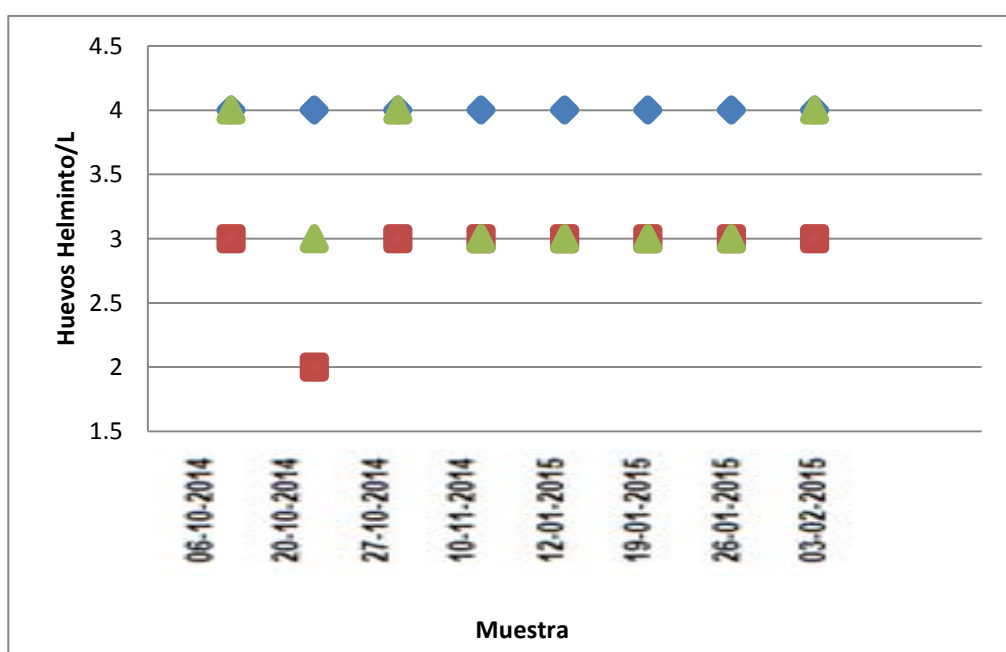


Fig. 25. Seguimiento de huevos de helminto de 8 muestras tomadas al \diamond - Influyente; \blacktriangle - Filtro percolador; \square -Efluente, durante el periodo de estudio

4.5. Caracterización de 12 muestras de agua tomadas en el influente, filtro percolador y efluente durante 7 meses de seguimiento analítico

La caracterización del agua residual que llega a la fosa séptica S-1, la que sale del filtro percolador FP y los tanques adicionales (antes de entrar al humedal) y la que sale del humedal (efluente) conforman esta etapa de la investigación. La caracterización se realizó de las tres corrientes, según lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996). La Tabla 14 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 14. Caracterización del agua a tratar, del influente, filtro percolador y efluente, de las 12 visitas durante el periodo de estudio

Parámetro	Influente (agua cruda)	Filtro percolador (agua filtrada)	Efluente
DBO₅ (mg O₂/L)	513.7±3.8	453.3±3.6	93.7±0.9
DQO (mg O₂/L)	310.2±2.0	106.7±1.9	34.0±1.1
Fósforo (mg P/L)	30.8±4.6	22.8±4.6	16.4±5.1
Nitratos (mg NO₃/L)	0.3±0.2	1.3±0.1	2.7±0.1
Sulfuros (mg S²⁻/L)	32.8±3.6	33.8±3.5	34.5±3.5
Sulfatos (mg SO₄/L)	1175.8±2.9	806.7±9.8	714.2±10.8
ST (mg/L)	990.8±3.5	767.5±3.8	755.5±2.8
SVT (mg/L)	431.7±1.9	333.3±1.9	345.5±2.2
SDT (mg/L)	552.5±2.2	630.8±0.1	603.6±2.2
SSV (mg/L)	556.7±1.4	244.2±0.9	203.6±1.6
SST (mg/L)	438.3±1.1	136.7±0.4	151.8±1.2

4.6. Comparación de los resultados obtenidos del seguimiento de las muestras de agua tomadas en el influente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio obtenidos en el laboratorio y la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997)

Del seguimiento realizado mediante parámetros físicos-químicos y microbiológicos se realizó una comparación con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (Tabla 15).

Tabla 15. Comparación de los parámetro de la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997) y los resultados del seguimiento de las muestras de agua tomadas al influente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio

	Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	Servicio al público con contacto directo	Obtenido en laboratorio (Influente)	Obtenido en laboratorio (Filtro percolador)	Obtenido en laboratorio (Efluente)
Coliformes fecales NMP/100 mL	1,000	240	2375±8	1663±7	965±4
Huevos de helminto (h/L)	5	1	4±0	3±0	3±0
DBO ₅ mg/L	30	20	513.7±3.8	453.3±3.6	93.7±0.9
SST mg/L	30	20	438.3±1.1	136.7±0.4	151.8±1.2

Como se observa en la Tabla 15, la cantidad de coliformes fecales a la salida del humedal es más del triple de lo establecido para contacto directo con el humano (240 NMP/100 mL), en el caso de contacto indirecto u ocasional que es de 1,000 NMP/100 mL sí se cumple con la norma. Los huevos de helminto registrados en el efluente sí cumplen con lo permitido para contacto indirecto,

mientras que para contacto directo el valor es 2 veces más grande que el valor permitido. La DBO_5 al efluente es tres veces mayor que el valor permitido para contacto indirecto, en cuanto al valor permitido para contacto directo es mayor 4.5 veces. La salida de los SST son 5 veces mayores que el valor permitido para contacto indirecto y 7.5 veces mayores para contacto directo; por lo tanto, la remoción que existe entre el influente y la salida del filtro percolador, y éste con el efluente es considerable como se aprecia en la tabla aún no cumplen con los límites máximos permisibles de la norma para contacto directo, por lo que se sugiere la implementación de un método de desinfección.

4.7. Método de desinfección propuesto

Como se mencionó anteriormente, es necesaria la implementación de un método de desinfección especialmente para la parte de coliformes fecales y huevos de helminto, por lo que el método de cloración fue el seleccionado debido a su eficiencia, a su bajo costo y fácil operación y, lo más importante, su efecto residual.

Los desinfectantes pueden matar de manera efectiva muchos microorganismos patógenos (bacterias, virus y parásitos). Estos microorganismos llegan a ser resistentes. Un ejemplo es la bacteria *E. coli*, debido a que es más resistente a los desinfectantes que otras bacterias y, por lo tanto, esta bacteria es utilizada como un organismo indicador. El tiempo de contacto, TC (*CT, Contact Time*, en inglés) para esta bacteria utilizando cloro libre con un pH de 6-7, es de: 0.034 - 0.05 mg*min/L (Lenntech, 2015).

Tanto el tiempo de contacto (*CT*), el agente desinfectante, la concentración de los microorganismos y la concentración del agente desinfectante son factores importantes de la desinfección del agua. El parámetro *CT* se usa para calcular la cantidad de desinfectante necesaria para la desinfección del agua (ecuación 15).

$$CT = \text{concentración desinfectante} * \text{tiempo de contacto} \quad (15)$$

$$C \text{ (mg/L)} * T \text{ (min)}$$

$$C = \text{concentración residual de agente desinfectante (mg/L)}$$

T= tiempo mínimo de contacto (minutos) entre el material a desinfectar y el agente desinfectante

CT se expresa como mg*min/L

La cantidad de cloro necesario para desinfectar, viene dado con la ecuación 16 un litro del agua a la salida del humedal, será de:

$$\begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{desinfectante} \\ \text{que se} \\ \text{necesita} \end{array} = \frac{\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ necesario} * \text{volumen a desinfectar}}{\% \text{ del desinfectante} * \text{factor de dilución}} \quad (16)$$

El volumen viene dado en mL

El factor de dilución se toma como 10,000

Tratándose de cloro con un porcentaje de 5.25%, un volumen de un litro y sabiendo que para *E. coli* se necesita una concentración 20 mg/L, sustituyendo datos (ecuación 17) se obtiene que la cantidad de cloro necesario para desinfectar el agua a la salida del humedal y que disminuya los 954±4.5 NMP/100 mL a los 240 NMP/100 mL de coliformes fecales que establece la norma, es de 0.38 g/mL con un tiempo de contacto de 0.05 mg*min/L (Lenntech, 2015):

$$\begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{desinfectante} \\ \text{que se necesita} \end{array} = \frac{20 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 1,000 \text{ mL}}{5.25\% * 10,000} \quad (17)$$

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos de esta investigación que eran: Realizar el seguimiento de un humedal artificial de flujo horizontal mediante parámetros físicos, químicos y biológicos para evaluar la calidad de agua obtenida comprobando esto con lo establecido en la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997) y proponer un método final de depuración viable para este sistema si los resultados de calidad dados en el laboratorio no cumplen con los establecidos en NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997), se hizo el seguimiento de un humedal artificial con flujo horizontal, mediante parámetros físicos, químicos y biológicos, y de esta forma se pudo evaluar la calidad del agua y se pudo llegar a una caracterización con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Las conclusiones fueron las siguientes:

La realización de las pruebas para obtener los parámetros biológicos, esto es, coliformes fecales y huevos de helminto, indicó la necesidad de un método de desinfección para que el efluente tratado cumpla con dicha norma. En el Capítulo II se hizo una comparación con los diferentes métodos de desinfección, viéndose que el mejor método es el de cloración, ya que es barato, eficiente y no se necesita mano de obra altamente especializada pero sí entrenada. En este sistema es posible usarlo, no siendo necesario usar un método de desinfección más avanzado o costoso. Sin embargo, debe continuarse el seguimiento del sistema cambiando las condiciones de operación para lograr una mejor remoción de los contaminantes reduciendo su concentración medida como demanda bioquímica de oxígeno para que cumpla con la norma.

La cantidad de cloro libre con un pH de 6-7, propuesta para desinfectar el agua a la salida del humedal, es de 0.38 g/mL con un tiempo de contacto de 0.05 mg*min/L, esperando que con esta cantidad de cloro el efluente de este

sistema basado en un humedal artificial de flujo horizontal cumpla con la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997) y pueda llegar a utilizarse para regar las áreas verdes aledañas e incluso emplearla en los retretes o escusados, es decir, en servicios al público con contacto directo.

La realización del seguimiento de los parámetros físicos y químicos indican que el sistema se encuentra todavía en su fase de estabilización (95% de remoción de DQO) ya que no se han alcanzado todavía los valores deseables para el efluente final de acuerdo con la norma correspondiente a su reutilización (Bernal, *et al.*, 2001).

5.2. Recomendaciones

1. Seguir realizando el seguimiento de este humedal para que se alcance plenamente su estabilización, verificando que en los laboratorios del SILADIN se inicie la educación ambiental de los estudiantes para que no viertan en los drenajes sustancias o residuos químicos que, muy probablemente, estén coadyuvando a la lentitud en alcanzar la estabilización.
2. Llevar a cabo las pruebas de adición de cloro, en forma de hipoclorito de sodio, para corroborar que el agua cumpla con la NOM-003-ECOL-1997 (DOF, 1997), además de completar los análisis de grasas y aceites así como de metales pesados y cianuros establecidos en la norma
3. Es recomendable realizar todos los análisis por duplicado o, preferentemente, por triplicado y cuidando que correspondan perfectamente con la norma establecida para, de esta forma, tener resultados confiables, precisos y exactos.
4. Fortalecer en el desarrollo de la fase experimental de las asignaturas impartidas en el CCH Sur la educación ambiental diseñando e implementando formatos en los que se usen los residuos de una de ellas en la siguiente y, al final, separar los residuos siguiendo las recomendaciones internacionales para su estabilización y disposición controlada. Esta forma

de seguir el proceso de enseñanza-aprendizaje no solamente permite a académicos y estudiantes interrelacionar al agua con las sustancias y los residuos peligrosos sino a tener una formación ambiental integral u holística.

5. Continuar con la formación de recursos humanos en el marco de los proyectos que la Facultad de Química y el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur iniciaron desde hace casi 15 años para que el sistema construido originalmente en la Zona Cultural y que fue trasladado al CCH Sur sirva como un paradigma de esta ecotecnología.

Bibliografía

- Apolonio, L., 2011. Construcción y arranque de un humedal artificial escala banco de laboratorio. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Aragón. México D.F. México.
- Arreguín-Rojas, A., Durán-Domínguez, M.C., Bernal-González, M., González-Sandoval, M.R., Sánchez-Tovar, S.A. 2013. Manual de operación y mantenimiento del humedal artificial del CCH PLANTEL SUR, con actividades didácticas para el BACHILLERATO UNAM. ISBN 978-607-7807-12-4. Pub. CCH-Sur (Proys. INFOCAB SB201608 y PB201312), Facultad de Química, UNAM y AMCATH. 46 pags. 10 ejemplares, 1a. Ed. (2010). Libro electrónico (disco compacto), 2ª. Ed. (2013). México D.F. México.
- Bernal, F., Mosqueda, D., Maury, H.A., González, D., Guerra, R., Pomare, A., Silva, M. 2001. Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la costa. Colombia
- Cáceres, L.O. 1990. Desinfección del agua. Ministerio de Salud. Lima, Perú.
- Cervantes, D., Mora, C. 2013. Evaluación de la calidad del agua tratada en un sistema de humedales de flujo subsuperficial, para uso recreativo. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Ciria, M.P., Solano M.L., Soriano P. 2005. Role of macrophyte *Typha latifolia* in a constructed wetland for wastewater treatment and assessment of its potential as a biomass fuel. Biosystems Engineering. 92(4):535-544.
- CCH-Sur, 2014. Colegio de Ciencias y Humanidades plantel Sur. 28 de mayo de 2015. Dirección electrónica: <http://www.cch.unam.mx/sur>
- CONAGUA. 2014. Comisión Nacional del Agua. 11 de noviembre de 2014. Dirección electrónica: <http://www.conagua.gob.mx/>
- De Miguel, E., De Miguel, J., Curt, M.D. 2005. Proyecto Life. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Dirección electrónica: <http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/Manual%20sobre%20fitodepuracion.htm>
- DOF. 1980. Muestreo. Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

- DOF. 1981. Análisis de aguas- Determinación del ión sulfato - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1982. Análisis de aguas- Determinación de sulfuros - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-084-1982. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1987. Análisis de Agua - Calidad del agua- Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-042-1987. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1996. Muestreo. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1997. Aguas tratadas. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000a. Sólidos disueltos totales. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2000. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000b. Análisis de Agua - Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000c. Análisis de agua - Determinación de la conductividad eléctrica - método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000d. Análisis de agua - Determinación de huevos de helminto - Método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001a. Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Norma

Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2001b. Análisis de aguas-Determinación bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2001c. Análisis de aguas-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2001d. Análisis de aguas-Determinación de fósforo en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2001e. Análisis de aguas-Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2001f. Análisis de aguas-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

DOF. 2009. Jueves 24 de septiembre de 2009. DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México D.F., México.

- DOF. 2011. Análisis de agua - Determinación del pH -método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- Durán-de-Bazúa, C. 2014. En Mesa Redonda de expertos: *Dra. Carmen Durán de Bazúa* (FQUNAM), *Q. Agustín Arreguín Rojas* (CCH Sur), moderador, *Biol. Narciso José Ruiz Cárdenas* (CCH Sur) y *Dr. Salvador Alejandro Sánchez Tovar* (Tecnología Intercontinental S. A. de C.V.). En *3ª REUNIÓN DEL DÍA INTERNACIONAL DE LOS HUMEDALES 2014*. Viernes 31 de enero del 2014. UNAM, Facultad de Química y Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, organizadores. Auditorio SILADIN. México D.F. México.
- Durán-de-Bazúa, C., Guido-Zárate, A., Huanosta, T., Padrón-López, R.M., Rodríguez-Monroy, J. 2008. Artificial wetlands performance: Nitrogen removal. *Water Science and Technology*. 58(7)1357-1360.
- Durán-de-Bazúa, C. (Profesora), Rodríguez-Cruz, A. Varela-Montellano, E. (Estudiantes). 1998. Manual de construcción, arranque y operación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de casas habitación en zonas rurales o suburbanas y para el tratamiento terciario de aguas residuales de casas habitación o de condominios verticales suburbanos. **VOL. 6 bis, SERIE: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA**. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 27 pags. 500 ejemplares, 1a. Ed. (1998). 50 ejemplares, 2ª. Ed. (2003). 50 ejemplares.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, MC., Luna-Pabello, V.M. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México. Patente Núm 210924. Otorgada el 21 de octubre de 2002.
- EPA. 1999. Alternative Desinfectants and Oxidants Guidance Manual. Environmental Protection Agency, EPA 815-R-99-014.
- EPA. 2000a. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. Environmental Protection Agency, EPA 832-F-00-023.

- EPA. 2000b. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. Environmental Protection Agency, EPA 832-F-00-024.
- Fenoglio-Limón, F.E. 2000. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedades artificiales de flujo vertical. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. México.
- Fonseca-Montes-de-Oca, R.M.G. 2004. Estudio de la formación y distribución de Trihalometanos con agua potable de la zona norte de la ciudad de Toluca. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México, México.
- González, V. 1993. Estudios de biodegradabilidad de efluentes industriales. *Ingeniería Química*, 25:97-101.
- Guido-Zárata, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de maestría en Ingeniería. Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Julio 4, 2006. México D.F. México.
- Hammer D.A., Bastian, R.K. 1989. Wetland ecosystems: Natural water purifiers? In D. A. Hammer (ed). *Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural*. Lewis Publishers. Boca Raton, FL, EE.UU.
- Hernández, D. 2013. Estudio de un sistema anaerobio de laboratorio con bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento del efluente de flotación de una planta minera. Tesis profesional. Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. México.
- Huanosta-Gutiérrez, T. 2006. Estudio de la dinámica y remoción de especies de nitrógeno en humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio. Tesis profesional. Química. Facultad de Química, UNAM. Diciembre 07. México D.F. México.
- IGME. 1995. *Nuevas Tecnologías para el Saneamiento. Depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia alicante*. Instituto

Geológico y Minero de España. Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. España.

- INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Redes internacionales. 24 de junio de 2014. Dirección electrónica: www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mambio2&c=5827
- IWA. 2000. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design, and operation. Londres, Reino Unido.
- Jiménez, B. 2007. Helminths (worms) eggs control in wastewater and sludge, in International Symposium on New Directions in Urban Water Management 2007, UNESCO Paris.
- Jiménez, J. R. 2002. Agua de mayor calidad. El agua contribuye mucho a la salud. *Rev. Agua Potable*. 4(51):34-38.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. Treatment wetlands. Lewis Publisher, Boca Raton, FL, EE.UU.
- Lara, B.J.A. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. Barcelona, España.
- Lenntech. 2015. Consulta a redes internacionales. 28 de mayo de 2015. Dirección electrónica: <http://www.lenntech.com>
- Liberti, L., López, A., Notarnicola, M., Barnea, N., Pedahzur, R., Fatal, B. 2000. Comparison of advanced disinfection methods for municipal wastewater reuse in agricultura. *Water Science and Technology*. 42(2):215-220.
- Malley, J., Shaw, J.P., Ropp, J. 1995. Evaluations of byproducts by treatment of ground waters with ultraviolet irradiation. AWWA, Denver, CO, EE.UU.
- Mendonça, S. 2000. Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. McGraw Hill, Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Metcalf-Eddy. 2003. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Fourth edition. Mc Graw Hill. Nueva York, NY, EE.UU.
- National Geographic. 2015. Consulta a redes internacionales. 23 de junio de 2015. Dirección electrónica: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/acid-rain-overview>

- OMS. 2003. Health risks in aquifer recharge using reclaimed water - State of the art report. Ed. R. Aertgeerts, A. Angelakis. Water, Sanitation and Health, Protection and the Human Environment, Organización Mundial de la Salud, World Health Organization, Ginebra, Suiza y WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Dinamarca.
- Padrón-López, R.M. 2005. Depuración de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Programa de División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Noviembre 7. Villahermosa, Tab., México.
- Palacios-Vargas, J.G., Mejía-Recamier, B.E., Cutz-Pool, L.Q. 2009. Microartrópodos edáficos. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF, México. Pp. 203-211.
- Rajala, R.L., Pulkkanen, M., Pessi, M., Heinonen-Tanski, H. 2003. Removal of microbes from municipal wastewater effluent by rapid sand filtration and subsequent UV irradiation. *Water Science and Technology*. 47(3):157-162.
- Reyes-Luz, M.I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tesis profesional. Ingeniera Química. Facultad de Química, UNAM. Diciembre 07. México D.F. México.
- Rodríguez, A., Varela, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional. Ingeniería Química. FES Zaragoza, UNAM, México D.F. México.
- Rodríguez-Monroy, J., Durán-de-Bazúa, C. 2006. Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ, México)*. 21(1):25-33.
- Romero, G. R. 2005. Desinfección de agua potable y de aguas residuales tratadas por métodos de cloración. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Ruiz-López, V. 2009. Remoción de cadmio y zinc de aguas residuales de una industria minera mediante reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería. Campo del conocimiento:

Ingeniería Ambiental. Campo disciplinario: Sustancias y residuos peligrosos. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Septiembre 28. México D.F. México.

Sánchez-de-F., J. 2001. In XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. V. 10. El fósforo, parámetro crítico de calidad de agua técnicas analíticas y de muestreo. Venezuela.

Sánchez-Tovar, S.A. 2012. Material audiovisual para la conferencia presentada en la *1a REUNIÓN DEL DÍA INTERNACIONAL DE LOS HUMEDALES 2012*. Viernes 3 de febrero del 2012. UNAM, Facultad de Química y Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, organizadores. Auditorio SILADIN. México D.F. México.

Secundino-Sánchez, O. 2015. Material audiovisual para la conferencia presentada en la *4a REUNIÓN DEL DÍA INTERNACIONAL DE LOS HUMEDALES 2012*. Viernes 30 de enero del 2015. UNAM, Facultad de Química y Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, organizadores. Auditorio SILADIN. México D.F. México.

Soto-Esquivel, M.G., Guido-Zárate, A., Guzmán-Aguirre, S., Mejía-Chávez, A.G., García-Gómez, R.S., Huanosta, T., Padrón-López, R.M., Rodríguez-Monroy, J., Mijaylova-Nacheva, P., Buitrón-Méndez, G., Durán-de-Bazúa, C. (2013). Algunos aspectos interesantes de sistemas de humedales a escala de laboratorio y de banco en México. *Revista Química Central (Facultad de Ciencias Químicas Universidad Central del Ecuador)*. 3(2):53-65.

USEPA. 2000. *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. U. S. Environmental Protection Agency, EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development. Cincinnati, OH, EE.UU.

USEPA. 2004. *Constructed treatment wetlands*. U. S. Environmental Protection Agency EPA843-F-03-013. Cincinnati, OH, EE.UU.

Villalba, M.E. 2012. Remoción de patógenos (Coliformes fecales, Salmonella) en lodos de purga municipal mediante tratamiento térmico. Tesis profesional. Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. 2012 México D.F. México.

- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M., Haberl, R. 1998. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers. Leiden, Países Bajos (Holanda).
- WERF. 1995. Disinfection of wastewater effluent: Comparison of alternative technologies. Leong, L.Y.C., Contractor, Kuo, J., Tang, Ch.Ch., Co-Principal Investigators. Sanitations Districts of Los Angeles County. Water Environment Foundation Disinfection Committee. Cooperative Agreement Number CP-83112101. Alexandria, VA, EE.UU.
- White, G. 1992. Handbook of Chlorination and Alternative Desinfectants. 4ta Edición. Nueva York, NY, EE.UU.
- Wikipedia. 2015. 25 de junio de 2015. Dirección electrónica:
https://es.wikipedia.org/wiki/Diferencias_entre_masa_y_peso
- Wolfe, R.L. 1990. Ultraviolet disinfection of potable water. Environ. Sci. Technol. 24(6):768-773.
- Wright, H.B., Cairns, W.L. 1998. Ultraviolet Light. CEPIS-OPS. Regional Symposium on Water Quality: Effective Disinfection. CEPIS. Lima, Perú.

Anexos

Anexo 1. Seguimiento de parámetros *in situ*

De acuerdo con lo establecido en las **NMX-AA-008-SCFI-2011; NMX-AA-007-SCFI-2013; NMX-AA-093-SCFI-2000; NMX-AA-012-SCFI-2001** Análisis de agua – medición de parámetros *in situ*, al igual que el pH, se midieron en campo con el multiparámetro Hanna, HI 9828 durante 12 visitas, por lo tanto, se tienen 12 datos experimentales para cada punto de muestreo, tal como lo muestra las Tablas A-1 Y A-2.

Tabla A-1. Seguimiento de los parámetros físicos y químicos *in situ* de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

		SDT (mg/L)	O₂ (mg/L)	CE (µS/cm)	T (°C)
1	Influyente	1592	1.67	3173	20
	Filtro percolador	1490	1.55	2983	20.13
	Efluente	1457	1.52	2908	20.56
2	Influyente	1172	1.2	1289	22.12
	Filtro percolador	1060	1.7	2127	21.43
	Efluente	630	0.63	1260	21.02
3	Influyente	1416	1.48	2918	22.09
	Filtro percolador	1469	0.54	952	22.98
	Efluente	1072	1.11	2189	21.78
4	Influyente	1082	1.11	2132	20.07
	Filtro percolador	1069	1.1	2136	20.18
	Efluente	776	0.78	1552	20.29
5	Influyente	1190	1.23	2367	19.68
	Filtro percolador	1152	1.19	2298	18.59
	Efluente	575	0.57	1146	20.03
6	Influyente	1089	1.11	2195	23.36
	Filtro percolador	662	0.66	1692	23.93
	Efluente	619	0.61	1235	25.32
7	Influyente	1363	1.42	2728	19.98
	Filtro percolador	1338	1.39	2668	21.34
	Efluente	1204	1.22	2351	20.12

Tabla A-1. Seguimiento de los parámetros físicos y químicos *in situ* de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

		SDT (mg/L)	O₂ (mg/L)	CE (μS/cm)	T (°C)
8	Influente	1393.33	1.45	2460.00	21.40
	Filtro percolador	1339.67	1.26	2020.67	21.51
	Efluente	1053.00	1.09	2119.00	21.12
9	Influente	1223.33	1.26	2113.00	21.43
	Filtro percolador	1199.33	1.11	1738.33	21.53
	Efluente	826.00	0.84	1667.00	21.03
10	Influente	1229.33	1.27	2472.33	20.61
	Filtro percolador	1230.00	0.94	1795.33	20.58
	Efluente	807.67	0.82	1629.00	20.70
11	Influente	1120.33	1.15	2231.33	21.04
	Filtro percolador	961.00	0.98	2042.00	20.90
	Efluente	656.67	0.65	1311.00	21.88
12	Influente	1214.00	1.25	2430.00	21.01
	Filtro percolador	1050.67	1.08	2219.33	21.29
	Efluente	799.33	0.80	1577.33	21.82
Promedio	Influente	1257.03	1.30	2375.72	21.07
	Filtro percolador	1168.39	1.13	2055.97	21.20
	Efluente	872.97	0.89	1745.36	21.31
CDE	Influente	153.84	0.17	470.61	19.30
	Filtro percolador	231.96	0.33	509.20	15.58
	Efluente	270.20	0.29	538.03	15.03
CV	Influente	8.17	0.131	5.05	1.09
	Filtro percolador	5.04	0.296	4.04	1.36
	Efluente	3.23	0.327	3.24	1.42

Tabla A-2. Seguimiento de pH de las muestras tomadas *in situ* en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de pH		
	Influente	Filtro percolador	Efluente
1	7.874	7.465	7.07
2	7.154	7.247	7.007
3	8.188	7.981	7.401
4	7.871	7.556	7.426
5	7.482	7.401	7.213
6	7.347	7.512	6.954
7	7.284	6.601	7.16
8	7.465	7.079	6.831
9	8.59	8.45	7.74
10	8.03	8.13	7.36

Tabla A-2. Seguimiento de pH de las muestras tomadas *in situ* en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de pH		
11	7.282	7.562	7.024
12	7.463	7.401	6.981
Promedio	7.669	7.532	7.181
CDE	0.439	0.486	0.259
CV	0.057	0.064	0.036

Anexo 2. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-028-SCFI-2001**. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - método de prueba.

Para la realización de DBO, se empleó el aparato 2173B BOD modelo HAGH, una vez pasados los 5 días, se calculó la DBO₅, utilizando una dilución, y emplea la ecuación 18.

$$DBO \left(\frac{mg}{L} \right) = DBO_5 * \frac{Volumen \ de \ muestra}{Volumen \ de \ dilución} \quad (18)$$

El volumen de muestra fue de 160 mL, mientras que el de dilución fue de 190mL.

Haciendo un ejemplo del cálculo, ecuación 19, se tiene:

$$DBO \left(\frac{mg}{L} \right) = 700 * \frac{160}{190} \quad (19)$$

En la Tabla A-3, se muestran los datos experimentales y los resultados.

Tabla A-3. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de DBO ₅		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	589.473	505.264	303.158
2	572.632	437.895	75.789
3	631.5787	589.474	16.842
4	589.4736	505.263	101.052
5	597.894	589.474	269.474
6	631.578	589.473	75.7894
7	496.842	437.895	160
8	336.842	353.684	0
9	673.684	673.684	12.632

Tabla A-3. Seguimiento de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5 de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de DBO ₅		
10	269.473	252.632	8.4211
11	353.684	286.316	84.211
12	421.053	218.947	16.842
Promedio	538.947	493.474	102.316
CDE	133.444	126.546	109.367
CV	4.039	3.900	0.936

Anexo 3. Seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO)

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-030-SCFI-2001**. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

Para calcular la DQO en la muestra en miligramos de O₂ por litro (mg/L), se hace directamente de la curva de calibración, en el espectrofotómetro Milton Roy modelo Spectronic 21D, ecuación 20:

$$Y = mX + b \quad (20)$$

donde:

Y = Absorbancia;

m = Pendiente;

b = Ordenada al origen; y

X = La cantidad de mg de O₂/L.

Ejemplo del cálculo con mi curva de calibración, ecuación 21:

$$Y = 0.0002X + 0.028 \quad (21)$$

Despejando, ecuación 22:

$$X = \frac{0.066 - 0.028}{0.0002} \quad (22)$$

dando así que X = 190 mg de O₂/L

Se hace lo mismo para todos los datos experimentales y los resultados se muestran en la Tabla A-4.

Tabla A-4. Seguimiento de la demanda química de oxígeno, DQO, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente, durante el periodo de estudio

	Valor de DQO		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	190	87.5	52.5
2	360	60	10
3	102.5	50	15
4	247.5	155	10
5	272.5	185	67.5
6	340	110	2.5
7	195	75	20
8	665	180	92.5
9	512.5	45	50
10	427.5	192.5	62.5
11	210	95	22.5
12	200	45	2.5
Promedio	310.208	106.667	33.958
CDE	160.207	56.992	29.819
CV	1.936	1.872	1.139

Y con estos datos se obtuvo el promedio y el coeficiente de variación que están reportados en la Tabla 14 de la tesis.

Anexo 4. Seguimiento de fósforo total

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-029-SCFI-2001**. Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

Se calcula la concentración de la muestra por medio de la ecuación que se genera de la curva de calibración la cual se calcula con el espectrofotómetro Milton Roy modelo Spectronic 21D, la cual viene representada en la ecuación 20.

X = La concentración de mg de P/L

Ejemplo del cálculo con mi curva de calibración, ecuación 23

$$Y = 0.0065X + 0.0034 \quad (23)$$

Despejando, ecuación 24:

$$X = \frac{0.261 - 0.0034}{0.0065} \quad (24)$$

Obteniendo de esta forma una X = 39.492 mg de P/L

En la Tabla A-5 se observan los datos y resultados completos.

Tabla A-5. Seguimiento de fósforo de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de Fósforo		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	39.492	21.185	11.415
2	39.646	21.262	11.815
3	48.262	36.646	19.492
4	38.108	27.415	19.492
5	23.415	17.877	13.262
6	23.954	20.723	18.415

Tabla A-5. Seguimiento de fósforo de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de Fósforo		
7	23.646	22.185	20.338
8	24.185	22.108	16.954
9	23.800	18.415	13.031
10	31.031	23.492	19.031
11	31.185	21.723	16.031
12	23.185	20.646	17.185
Promedio	30.826	22.806	16.372
CDE	8.611	4.981	3.216
CV	3.580	4.579	5.092

Anexo 5. Seguimiento de nitratos

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-079-SCFI-2001**. Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

Gracias al el espectrofotómetro Milton Roy modelo Spectronic 21D, es posible realiza una curva de calibración, graficando la absorbancia contra los valores establecidos de nitratos y se llega a la ecuación de la recta, la cual viene dada por la ecuación 20.

X = La concentración de mg de N-NO₃⁻/L

Ejemplo del cálculo con la curva de calibración, ecuación 25

$$Y = 0.1907X + 0.0498 \quad (25)$$

Despejando, ecuación 26:

$$X = \frac{0.0825 - 0.0498}{0.1907} \quad (26)$$

Obteniendo de esta forma una X = 0.1714 mg de N-NO₃⁻/L

Como se observa, la Tabla A-6 arroja todos los datos y resultados completos.

Tabla A-6. Seguimiento de nitratos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de Nitratos		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	0.171	1.467	2.581
2	0.449	1.322	2.660
3	0.326	1.558	2.686
4	0.012	1.302	2.943
5	0.139	1.359	3.137
6	0.546	0.992	2.481
7	0.127	1.097	3.472

Tabla A-6. Seguimiento de nitratos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de Nitratos		
8	0.054	1.364	2.523
9	0.164	0.777	2.526
10	1.021	1.364	2.130
Promedio	0.340	1.260	2.714
CDE	0.868	0.184	0.347
CV	0.295	0.146	0.128

Anexo 6. Seguimiento de sulfuros

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-084-1982**. Análisis de agua, -
determinación de sulfuros.

En esta técnica se utiliza el método iodométrico, en donde si un mililitro de iodo
0.025 N reacciona con 0.4 mg de sulfuro, luego con ecuación 27.

$$\frac{\text{mg de } S^{2-}}{L} = \frac{[(A * B) - (C * D)] * 16,000}{\text{mL de la muestra}} \quad (27)$$

donde:

A = Solución de iodo, en mL (5 mL)

B = Normalidad de la solución de yodo (0.025 N)

C = Tiosulfato de sodio, en mL

D = Normalidad de tiosulfato de sodio (0.025 N)

Ejemplo de cálculo, usando ecuación 27, sustituimos ecuación 28:

$$\frac{\text{mg de } S^{2-}}{L} = \frac{[(5 \text{ mL} * 0.025 \text{ N}) - (0.5 * 0.025 \text{ N})] * 16,000}{40 \text{ mL}} \quad (28)$$

Por lo tanto:

$$\frac{\text{mg de } S^{2-}}{L} = 30$$

La prueba se repitió 12 veces y en la Tabla A-7 se muestran los resultados.

Tabla A-7. Seguimiento de sulfuros de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de Sulfuros		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	45.00	48.00	49.00
2	45.00	46.00	47.00
3	30.00	31.33	32.00
4	20.00	20.86	22.29
5	28.67	30.00	27.06
6	36.40	36.80	39.20
7	22.50	23.00	23.50
8	47.00	48.00	49.00
9	30.00	30.33	31.33
10	26.286	26.857	27.429
11	37.600	38.400	39.200
12	25.200	25.657	26.686
Promedio	32.804	33.770	34.474
CDE	9.235	9.599	9.880
CV	3.552	3.518	3.489

Anexo 7. Seguimiento del ion sulfato

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-074-1981**. Análisis de agua - determinación del ion sulfato.

Con ayuda del espectrofotómetro Milton Roy modelo Spectronic 21D, se realiza una curva de calibración, graficando la absorbancia contra los valores que se tienen establecidos de ion sulfato y se llega a la ecuación de la recta, la cual viene dada por la ecuación 20.

X = La concentración de mg de $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$

Ejemplo del cálculo con curva de calibración, ecuación 29:

$$Y = 0.005X - 0.03 \quad (29)$$

Despejando, y agregando el valor de dilución, tenemos la ecuación 30:

$$X = \frac{0.014 + 0.03}{0.005} * 100 \quad (30)$$

Obteniendo de esta forma una X = 880 mg de SO_4/L

La Tabla A-8 nos muestra todos los datos y resultados completos.

Tabla A-8. Seguimiento de sulfatos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de Sulfatos		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	880	980	840
2	1160	840	640
3	2100	700	640
4	1440	760	660
5	910	800	770
6	800	720	680
7	1500	880	800
8	820	740	700

Tabla A-8. Seguimiento de sulfatos de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de Sulfatos		
9	940	790	660
10	1060	780	680
11	900	780	760
12	1600	910	740
Promedio	1175.833	806.667	714.167
CDE	402.299	82.278	66.395
CV	2.923	9.804	10.756

Anexo 8. Seguimiento de sólidos en todas sus formas

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-034-SCFI-2000** Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

Para realizar sólidos se emplea el horno Arsa AR-290D y la mufla Felisa FE-360, una vez obtenidos los datos experimentales, se utilizan las ecuaciones 31, 32, 33, 34 y 35 y se registran los valores en las tablas A-9, A-10, A-11, A-12 y A-13.

Para sólidos totales, es la suma de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica.

$$ST = ((G1 - G)/V) * 1000 * 1000 \quad (31)$$

donde:

ST son sólidos totales, en mg/L;

G1 es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg

G es la masa de la cápsula vacía, en mg a peso constante, y

V es el volumen de muestra en mL

Tabla A-9. Seguimiento de sólidos totales, ST, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de ST		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	950	1210	1210
2	1230	610	810
3	1610	700	1020
4	1220	510	500
5	1030	870	800
6	840	710	640
7	340	400	370

Tabla A-9. Seguimiento de sólidos totales, ST, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de ST		
8	850	820	690
9	760	680	420
10	480	1000	1000
11	980	820	300
12	1040	520	660
Promedio	990.833	767.500	755.455
CDE	287.195	204.678	265.855
CV	3.450	3.750	2.842

Los sólidos volátiles disueltos, es la cantidad de materia orgánica capaz de volatilizarse por efecto de la calcinación.

$$SVT = ((G1 - G2)/V) * 1000 * 1000 \quad (32)$$

donde:

SVT es la materia orgánica total, en mg/L;

G2 es la masa de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en mg

V es el volumen de muestra en mL

Tabla A-10. Seguimiento de sólidos volátiles totales, SVT, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de SVT		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	280	410	510
2	700	280	310
3	910	180	20
4	430	50	10
5	590	330	330
6	140	110	150
7	340	400	370
8	320	310	200
9	240	280	200
10	320	380	380

Tabla A-10. Seguimiento de sólidos volátiles totales, SVT, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de SVT		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
11	220	640	180
12	600	40	20
Promedio	431.667	333.333	345.455
CDE	228.929	171.489	160.586
CV	1.886	1.944	2.151

Sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua y que no son retenidas en el material filtrante.

$$SST = ST - SST \quad (33)$$

donde:

SDT son sólidos disueltos totales, en mg/L;

ST son sólidos totales, en mg/L

SST son sólidos suspendidos totales, en mg/L

Tabla A-11. Seguimiento de sólidos disueltos totales, SDT, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de SDT		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	830	810	550
2	610	430	450
3	500	220	10
4	1020	960	240
5	640	760	730
6	550	600	440
7	460	850	580
8	500	630	690
9	200	480	70
10	720	700	200
11	40	800	760
12	660	520	300
Promedio	552.500	630.833	603.636
CDE	254.802	209.038	260.470
CV	2.168	3.018	2.317

$$SST = ((G4 - G3)/V) * 1000 * 1000 \quad (34)$$

donde:

SST son sólidos totales, en mg/L;

G3 es la masa del crisol con el disco a peso constante, en mg

G4 es la masa del crisol con él y el residuo seco, en mg/L, y

V es el volumen de muestra en mL

Tabla A-12. Seguimiento de sólidos suspendidos volátiles, SSV, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de SSV		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	200	380	200
2	700	200	200
3	1410	1010	230
4	690	0	390
5	280	130	110
6	260	10	10
7	180	20	20
8	100	100	100
9	650	200	240
10	760	280	300
11	440	320	380
12	1000	500	80
Promedio	556.667	244.167	203.636
CDE	389.509	282.171	128.051
CV	1.429	0.865	1.590

Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

$$SST = ((G4 - G5)/V) * 1000 * 1000 \quad (35)$$

Dónde:

SST son sólidos totales, en mg/L;

G5 es la masa del crisol con el residuo después de la calcinación, en mg/L, y

V es el volumen de muestra en mL

Tabla A-13. Seguimiento de sólidos suspendidos totales, SST, de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de SST		
	Influyente (mg/L)	Filtro percolador (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	400	400	380
2	780	180	200
3	1600	1150	300
4	980	230	410
5	300	110	190
6	400	110	90
7	180	90	90
8	160	190	190
9	690	200	220
10	680	300	280
11	220	20	340
12	740	0	0
Promedio	438.333	136.667	151.818
CDE	415.046	305.490	124.423
CV	1.056	0.447	1.220

Anexo 9. Seguimiento del número más probable (NMP) de coliformes fecales

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-42-1987** Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.

Para calcular el número más probable, de la muestra, primero determinar el número característico, para ello seleccionar como p1 la dilución más baja en la que todos o el mayor número de tubos resaltaron positivos, p2 y p3 representan el número de tubos positivos en las siguientes dos diluciones, después localizar el número característico registrado en la tabla NMP, con lo que se obtiene la cantidad de microorganismos inoculados en la dilución intermedia de las tres consideradas. Multiplicar el NMP obtenido de la dilución por el recíproco de la dilución media. Los resultados están dados en la Tabla A-14.

Tabla A-14. Seguimiento de coliformes fecales de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

	Valor de Coliformes fecales		
	Influyente (NMP/100mL)	Filtro percolador (NMP/100mL)	Efluente (NMP/100mL)
1	2000	1400	1200
2	2400	2000	1200
3	2800	2000	920
4	2400	1400	680
5	2100	1400	680
6	2400	1700	920
7	2100	1700	1200
8	2800	1700	920
Promedio	2375	1662.5	965
CDE	286.138	234.187	204.389
CV	8.300	7.099	4.721

Anexo 10. Seguimiento del número de huevos de helminto

De acuerdo con lo establecido en la **NMX-AA-113-SCFI-2000** Análisis de agua – medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica - método de prueba.

En esta técnica, una vez que se realiza el procedimiento, se cuentan los huevos que hay en los 5 L de agua en el microscopio, una vez contados, se utiliza la ecuación 33, y con esto obtenemos los datos reportados en la Tabla A-15.

$$\frac{h}{L} = \frac{\text{Número de huevos}}{5 L} \quad (36)$$

Ejemplo ecuación 37:

$$\frac{h}{L} = \frac{20 \text{ huevos}}{5 L} \quad (37)$$

$$\frac{h}{L} = 4$$

Por lo tanto se tienen 4 huevos por cada litro en el ejemplo mostrado. Como no puede haber fracciones de huevos, se tomara el número entero más cercano a la fracción que resulte.

Tabla A-15. Seguimiento de huevos de helminto de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio

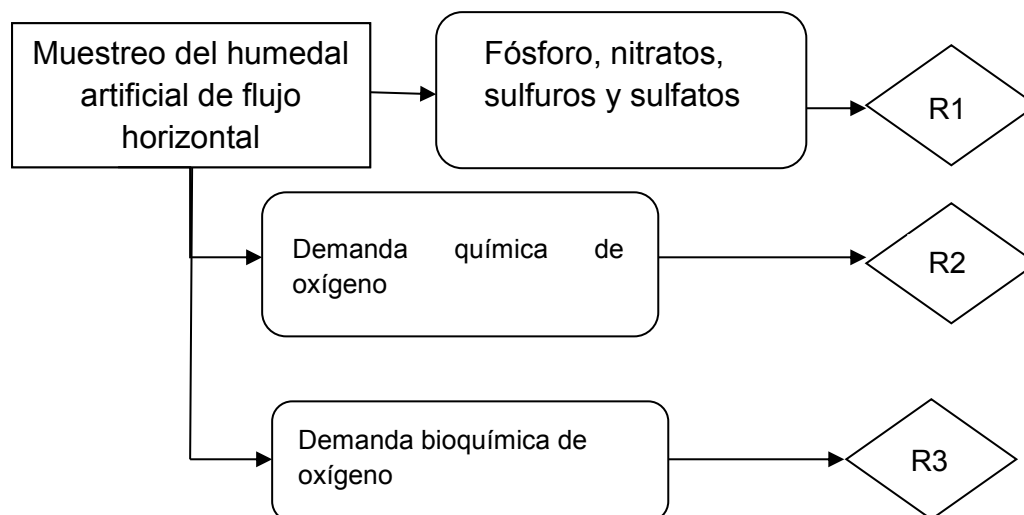
	Valor de Huevos de Helminto		
	Influyente (h/L)	Filtro percolador (h/L)	Efluente (h/L)
1	4	4	3
2	4	3	2
3	4	4	3
4	4	3	3
5	4	3	3

Tabla A-15. Seguimiento de huevos de helminto de las muestras tomadas en el Influyente, filtro percolador y efluente del humedal, durante el periodo de estudio (Continuación)

	Valor de Huevos de Helminto		
6	4	3	3
7	4	3	3
8	4	4	3
Promedio	4	3	3
CDE	0	0	0
CV	0	0	0

Anexo 11. Disposición de los residuos generados en esta investigación

La disposición de los residuos generados en esta investigación



R1 = Corresponde a los desechos de las mediciones en muestras de influente, filtro percolador y efluente del humedal (pH, temperatura, CE, ST, SVT, SDT, SSV y SST) que, como es el agua proveniente del humedal se neutralizaban y se vertían a la tarja al igual que las cenizas, para que llegaran diluidos a la planta de tratamiento de aguas residuales de C.U.

R2 = Corresponde a los productos de la digestión con dicromato de potasio y sulfatos de mercurio y plata en ácido sulfúrico, por lo que se consideran peligrosos y se envían a la Unidad de Gestión Ambiental, UGA, de la Facultad de Química para su disposición controlada

R3 = Corresponde a los productos de la medición en las botellas a presión. Tiene la misma composición que R1, por lo que se vertían también en la tarja neutralizados. El hidróxido de litio ya convertido en carbonato era introducido a la estufa para regenerarlo como hidróxido liberando la pequeña cantidad de CO₂ en la atmósfera capturada en las mediciones de DBO₅ de cada botella.