



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE SAN ANDRÉS TUXTLA**

TITULACION INTEGRAL

TESIS PROFESIONAL.

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE
ESCORRENTÍAS URBANAS EN HUMEDALES CON DIFERENTE
VEGETACIÓN”.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA
MAYANIN DE LOS ÁNGELES USCANGA JÁUREGUI

ASESOR INTERNO
DRA. VIOLETA ALEJANDRA BASTIÁN LIMA

DIRECTOR EXTERNO
DRA. MARIA ELIZABETH HERNANDEZ ALARCON

SAN ANDRÉS TUXTLA, NOVIEMBRE 2023



27292

Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave

Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla



Acta de Examen Profesional

Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla

En la Ciudad de San Andrés Tuxtla, Ver., a los 28 días del mes de NOVIEMBRE de 2023, siendo las 13:00 HORAS, se reunieron en la Sala de Titulación del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, clave 30EIT0001U los integrantes del Jurado:

Presidente (a): DRA. VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA
Secretario (a): M.C.I.B. SOLEDAD ESTHER MALDONADO BRAVO
Vocal: M.C.T.A. TONATIUH SOSME SANCHEZ

Y de acuerdo a las disposiciones reglamentarias en vigor sobre la Titulación Integral, se procedió a efectuar el Acto de Recepción Profesional a el (la) C. MAYANIN DE LOS ANGELES USCANGA JAUREGUÍ No de control 171U0344 egresado(a) del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, pasante de la carrera de INGENIERIA AMBIENTAL.

Tomando en cuenta los integrantes del Jurado, el contenido del Trabajo Profesional, cuyo tema es: 1.- TESIS PROFESIONAL "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE ESCORRENTIAS URBANAS EN HUMEDALES CON DIFERENTE TIPO DE VEGETACION" y la réplica del mismo, dictaminó que fuera APROBADA.

El (la) Presidente (a) del Jurado le hizo saber al sustentante el resultado obtenido, el Código de Ética Profesional y le tomó la Protesta de Ley. Dándose por terminado el Acto a las 14:00 horas, se asentó la presente en el Libro para Actas de Examen Profesional por Titulación Integral No. VI a las 41 fojas, autorizado por la H. Junta Directiva del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, con fecha 05 de JUNIO de 2023 y una vez escrita, leída y aprobada la firmaron para constancia las personas que en el acto intervinieron.

Para los usos legales correspondientes se expide la presente en la Ciudad de San Andrés Tuxtla, Veracruz, a los 28 días del mes de NOVIEMBRE del año 2023.

PRESIDENTE(A)

VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA
DOCTORA EN DESARROLLO REGIONAL
CEDULA PROFESIONAL: 2045733

SECRETARÍA(A)

SOLEDAD ESTHER MALDONADO BRAVO
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA
BIOSFERICA
CEDULA PROFESIONAL: 5628018

TONATIUH SOSME SANCHEZ
MAESTRO EN CIENCIAS EN TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS
CEDULA PROFESIONAL: 10637564



"2023: 200 años de Veracruz de Ignacio de la Llave, cuna del Heroico Colegio Militar 1823-2023"

Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla

Asunto: Constancia
San Andrés Tuxtla, Ver. a 29 de noviembre de 2023

**A QUIEN CORRESPONDA:
PRESENTE**

Por medio de la presente se hace constar que la **Dra. María Elizabeth Hernández Alarcón**, fue designada y fungió como **Directora Externa** de la Tesis de la alumna **Mayanin de los Ángeles Uscanga Jáuregui** con número de matrícula 171U0344 de la carrera de Ingeniería Ambiental. La tesis se titula "**Evaluación de la eficiencia de tratamiento de escorrentías urbanas en humedales con diferente tipo de vegetación**", la cual ha sido presentada y aprobada el 28 de noviembre de 2023. Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

"Transformarse para trascender."

**M.I.A. Octavio Obil Martínez
Director Académico**



CCP.
Archivo consecutivo
OOM/lcsx**





FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Lugar: San Andrés Tuxtla, Veracruz Fecha: 16/10/2023

Asunto: Liberación de proyecto para la Titulación integral.

LIC. MARIELA BERNAL VILLEGAS
Jefe del Departamento de Estudios
Profesionales del ITSSAT

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado:	USCANGA JAUREGUI MAYANIN DE LOS ANGELES
Carrera:	INGENIERÍA AMBIENTAL
No. de Control:	171U0344
Nombre del Proyecto:	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE ESCORRENTIAS URBANAS EN HUMEDALES CON DIFERENTE TIPO DE VEGETACIÓN
Producto:	1.-TESIS PROFESIONAL

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

MCIA JESSICA ALEJANDRA REYES LARIOS
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

 D.D.R. VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA	 M.C.I.B. SOLEDAD ESTHER MALDONADO BRAVO	 M.C. TONATIUH SOSME SÁNCHEZ
Nombre y firma del asesor	Nombre y firma del revisor*	Nombre y firma del revisor*

* Solo aplica para el caso de tesis o tesina.

Carr. Costera del Golfo S/N, KM 140+100
Loc. Matcapan, Mpio. San Andrés Tuxtla, Ver.
C.P. 95804 A.P. 110
Tel: 01(294)9478100 ext. 131
9478107



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES



Autorización de Impresión para Titulación Integral

San Andrés Tuxtla, Ver. 06 de noviembre del 2023

OPCION: 1.-TESIS PROFESIONAL

INTEGRANTES

Nombre del Estudiante	No. de Control	Carrera	Plan de Estudios
USCANGA JAUREGUI MAYANIN DE LOS ANGEL	171U0344	INGENIERÍA AMBIENTAL	IAMB-2010-206

De acuerdo con el Reglamento de Titulación Vigente y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo a su trabajo profesional para la obtención del título a nivel licenciatura, comunico a Usted que este departamento concede la autorización para que proceda a la impresión del proyecto denominado:

"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE ESCORRENTÍAS URBANAS EN HUMEDALES CON DIFERENTE TIPO DE VEGETACIÓN"

Atentamente

LIC. MARIELA BERNAL VILLEGAS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE
SAN ANDRÉS TUXTLA

DEPARTAMENTO
DE ESTUDIOS
PROFESIONALES

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por darme la fuerza, consuelo, fe, así como la inteligencia para realizar este proyecto tan significativo en mi vida.

A mi hermana, que, aunque no esté presente en cuerpo, siempre me impulsó a perseguir mis sueños, motivándome a ser mejor, y nunca limitándome para que alcance mis propias metas, Yumi esto va para ti.

A mi madre por siempre recordarme lo que cuestan los sueños, por nunca cortarme las alas, así mismo por apoyarme incondicionalmente a cada paso que doy en la vida y siempre hacerme fuerte cuando lo necesito.

A mi Papá Joel por poner los cimientos de la persona que soy hoy, por ayudarme a crecer, a fortalecerme y no dejarme nunca de la mano en momentos donde solo deseaba tirar la toalla.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para la realización del estudio de Licenciatura en el Instituto de Ecología, A.C.

Al Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) por permitirme el acceso a sus instalaciones y por su apoyo en la realización del trabajo presentado.

A la Red De Manejo Biotecnológico De Recursos del INECOL, especialmente a la Dra. María Elizabeth Hernández Alarcón, ya que, sin su apoyo, colaboración y su disposición a compartir sus conocimientos, nada de lo que realicé hubiera sido posible.

Así mismo, agradezco infinitamente a la Biól. Patricia Bello, el Biol. Alejandro Hernández, el Biol. Iván San Gabriel, la Dra. Leticia Mongue, La Lic. María Eugenia Ramírez con los que tuve la oportunidad de trabajar a lo largo de mi estadía y que me acogieron como un integrante más del equipo, brindándome lo mejor de sí mismos para lograr convertirme en el mejor profesional posible.

Especial agradecimiento al Biol. Alejandro Hernández, por su apoyo en campo y laboratorio que hicieron posible este trabajo.

Mi inmensa Gratitude a la Dra. Violeta Alejandra Bastián Lima, por confiar en mí, así como en mi trabajo, en motivarme a ser un profesional de calidad al mismo tiempo que un buen ser humano, por ser como una madre más que vela y busca lo mejor para mí.

De igual manera, la M.C. Soledad Esther Maldonado Bravo por ser mi mentora, amiga y creyente firme de que puedo llegar tan lejos como desee, por ver en mí ese potencial y exhortarme a seguir aprendiendo continuamente para llegar tan lejos como quiera, pero siempre con los pies en la tierra y con mucho trabajo.

Al Dr. Tonatiuh Sosme Sánchez, por ser un amigo a lo largo de mi trayecto profesional, por abrir las puertas necesarias para verme crecer, desarrollarme y convertirme en un ingeniero de calidad como también a impulsarme a seguir mis sueños.

INDICE

ABSTRACT	VIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
GENERALIDADES	2
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 HIPÓTESIS	4
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 GENERAL.....	4
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	4
1.5 JUSTIFICACIÓN	5
CAPÍTULO II	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	8
2.2 MARCO TEÓRICO	10
2.2.1 DEFINICIÓN DE HUMEDALES	10
2.2.2 LA CONTAMINACIÓN DE AGUA EN GENERAL	11
2.2.2.1 FUENTES PUNTUALES.....	11
2.2.2.2 FUENTES NO PUNTUALES	11
2.2.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA DE LOS HUMEDALES URBANOS...	12
2.2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS	13
2.2.4.1 TRATAMIENTO PRIMARIO.....	13
2.2.4.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO	14
2.2.5 HUMEDALES COMO TRATAMIENTO	15
2.2.5.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS	15
2.2.5.2 TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	17
2.2.5.2.1 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	17
2.2.5.2.2 HUMEDALES DE FLUJO HORIZONTAL	18
2.2.5.2.3 HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL.....	19
2.2.5.2.4 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL	19
2.2.5.2.5 HUMEDALES FLOTANTES.....	21

2.3 MARCO CONCEPTUAL	22
2.3.1 HUMEDALES CREADOS	22
2.3.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS	22
2.3.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS Y CREADOS	22
2.3.3.1 SUELO.....	22
2.3.3.2 PLANTAS.....	24
2.3.3.2.1 Typha domingensis	25
2.3.3.2.2 Juncus effusus	27
2.3.3.3 AGUA.....	28
CAPÍTULO III	30
METODOLOGÍA	30
3.1 IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	31
3.1.1 SITIO DE ESTUDIO.....	31
3.1.2 COMPONENTES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO	31
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	34
3.2.1 SISTEMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE MESOCOSMOS	34
3.3 MUESTREO DE AGUA	38
3.4 ANÁLISIS DE AGUA	38
3.4.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....	39
3.4.2 AMONIO	40
3.4.3 NITRATOS Y FOSFATOS	40
3.4.4 COLIFORMES (FECALES Y PRESENCIA DE E. COLI)	40
3.5 PORCENTAJE DE REMOCIÓN	41
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	42
CAPÍTULO IV	43
PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL TRABAJO	44
4.1.1 AMONIO	44
4.1.1.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE NH ₄ ⁺	44
4.1.1.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE NH ₄ ⁺	45

4.1.2.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE DQO	45
4.1.2.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE DQO	46
4.1.3 COLIFORMES FECALES	47
4.1.3.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES	47
4.1.3.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES	48
4.1.4 NITRATOS.....	48
4.1.4.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS.....	48
4.1.4.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE NITRATOS.....	49
4.1.5 SULFATOS.....	50
4.1.5.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS	50
4.1.5.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE SULFATOS	51
4.1.6 BIOMASA	52
4.1.6.1 PESO SECO DE BIOMASA AÉREA.....	52
4.1.6.2 PESO SECO BIOMASA DE RAÍZ.....	53
4.2 RESULTADOS	53
4.3 CONCLUSIONES	56
4.4 RECOMENDACIONES	57
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	58
ANEXO 1	63
ANEXO 2	64
ANEXO 3	65
ANEXO 4	66

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Clasificación del tratamiento de aguas residuales según su nivel de complejidad.	15
2.2	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	18
2.3	Humedal subsuperficial de flujo vertical	19
2.4	Humedal construido de flujo superficial	20
2.5	Esquema de un humedal de flujo superficial	20
2.6	Humedal Flotante	22
2.7	Esquema de una Planta Emergente.	25
2.8	Descripción del género Typha.	26
2.9	Estructura del género Juncus effusus	27
3.1	Ubicación Del Municipio De Xalapa y el INECOL Dentro Del Estado De Veracruz.	31
3.2	Ubicación Del Humedal Molino de San Roque	32
3.3	Ubicación del Río Sordo.	33
3.4	Diagrama de flujo de construcción de HC's	33
3.5	Sistema de Mesocosmos con Distintos Tratamientos	34
3.6	Sistema hidráulico empleado.	36
3.7	Medidas del Contenedor	36
3.12	Lectura del Software Past.	42
4.1	Variación de concentración de amonio durante 9 semanas	44
4.2	Porcentaje de Remoción de Amonio	45
4.3	Variación de concentración de DQO durante 9 semanas	46
4.4	Porcentaje de Remoción de DQO	46
4.5	Variación de concentración de Coliformes Fecales durante 9 semanas	47
4.6	Porcentaje de Remoción de Coliformes Fecales	48
4.7	Variación de concentración de Nitratos durante 9 semanas	49
4.8	Porcentaje de Remoción de Nitratos	50
4.9	Variación de concentración de Sulfatos durante 9 semanas	51
4.10	Porcentaje de Remoción de Sulfatos	52
4.11	Comparativa de peso seco promedio/planta.	52

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Principales procesos físicos – químicos y biológicos en la depuración de aguas residuales con humedales	16
3.1	Tratamientos dentro del diseño y construcción del Humedal Construido de flujo superficial con el uso de vegetación Macrófitas emergentes	34
3.2	Materiales para la arquitectura del sistema hidráulico.	35
3.3	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos para el agua	39
3.4	Material de la técnica de nitrógeno amoniacal	40
3.5	Material de la técnica de coliformes fecales	41

5.1	Comportamiento de la Vegetación y TRH	54
5.2	Comportamiento del % de remoción y TRH	55

LISTA DE ECUACIONES

No. Ecuación		Página
1	$V = A \times h$	37
2	$TRH = V/Q$	37
3	$Q = V/TRH$	37
4	$\% \text{ Remoción} = ((C \text{ afluente} - C \text{ efluente}) / C \text{ efluente}) \times 100$	41

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

HFS	Humedal De Flujo Superficial
HMSR	Humedal Molino De San Roque
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
ANOVA	Analysis of Variance
SFCW	Surface Flow Constructed Wetlands
CW	Constructed Wetlands
HRT	Hydraulic Retention Time
INECOL	Instituto de Ecología
ONU	Organización de las Naciones Unidas
HC	Humedal Construido
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems
MPIS	Max Plank Institute System
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ME	Macrófitas Emergentes
MA	Macrófitas Artificiales
T°	Temperatura
NO₃--N	Nitrógeno Amoniacal
RAMSAR	Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional
EPA	Environment Protection Agency
M	Metros
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
Cm	Centímetros
[cm] ^3	Centímetros Cúbicos
[cm] ^2	Centímetros Cuadrados
Mm	Milímetros
mL	Mililitros
mL/s	Mililitros por segundo

L/día	Litros por Día
A	Área
H	Altura
EC.	Ecuación
Q	Caudal
V	Volumen
GESAMP	Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection
CENTA	Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CONAMA	Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
Hg	Mercurio
Ni	Níquel
Pb	Plomo
As	Arsénico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
UV	Ultravioleta
HAF	humedales artificiales flotantes
%	Porcentaje
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
MSM	Metros sobre el mar
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
°C	Grados Centígrados
L	Litros
S/P	Sin Plantas
PVC	Policloruro de Vinil
(Cr₂O₇)²⁻	ion de dicromato
Cr³⁺	Cromo III
mg/L	Miligramo por Litro
μL	Microlitro
Pzas.	Piezas
NO₂⁻,	Nitrito
NO₃⁻,	Nitrato
(SO₄)⁻²	Sulfato
C	Concentración
NMP	Número Más Probable
Gr	Gramos

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la remoción de nutrientes en humedales construidos de flujo superficial (HFS) a escala de mesocosmos, se empleó dicha tecnología de tratamiento con la intención de obtener conocimiento para conocer que plantas nativas de la zona de Xalapa, Veracruz, pueden ser la mejor opción para mejorar la calidad del agua mediante humedales construidos (HC's) y así prevenir la degradación de humedales naturales por descargas directas de fuentes no puntuales como las escorrentías urbanas.

Se utilizó un sistema con 2 tratamientos con diferentes plantas (*Typha domingensis* y *Juncus effusus*) que constaron de tres replicas cada uno, así como un blanco sin plantas, en los cuales el suelo extraído del humedal Molino de San Roque (HMSR) se usó como medio de soporte para el crecimiento de las plantas y la biopelícula.

El afluente en los mesocosmos fue captado y bombeado del río Sordo que fluye cercano al INECOL, siendo distribuida al sistema a través de un tanque de almacenamiento junto con tubería de PVC y mangueras con válvulas individuales para cada mesocosmos.

Se probaron dos tiempos de retención (TRH) de 1 y 2 días. En cada caso fue monitoreado de manera semanal en un lapso de 3 meses, evaluados mediante un diseño factorial 2³.

Finalmente se demostró que el porcentaje de remoción de nutrientes es alto en los tratamientos con plantas, ya que van desde un 80-90% de remoción a comparación de los tratamientos sin plantas; así mismo, estadísticamente mediante la prueba ANOVA no se encontró diferencia significativa entre las diferentes especies de plantas (*Typha domingensis* vs *Juncus effusus*) que se utilizaron para el experimento.

ABSTRACT

This Project evaluated nutrients removal in surface flow constructed wetlands (SFCW) at mesocosm scale. This treatment technology was used with the intention of obtaining knowledge to know which native plants in Xalapa, Veracruz, can be the best option to improve water quality through constructed wetlands (CW's) and thus prevent the degradation of natural wetlands, by direct discharges from non-point sources such as urban runoff.

We used a system with 2 treatments with two different plant species (*Typha domingensis* y *Juncus effusus*) consisting of three replicates each one, as well a blank without plants, in which the soil extracted from the Molino de San Roque wetland (HMSR) was used as a support medium for the plant and biofilm growth.

The affluent in the mesocosms was captured and pumped from the Sordo River that runs near INECOL, being distributed to the system through a storage tank together with PVC piping and hoses with individual valves each mesocosms.

Two hydraulic retention times (HRT) of 1 and 2 days were evaluated. In each case it was checked weekly over a period of 3 months, evaluated using a factorial design 2^3 .

Finally, it was obtained that the percentage of nutrient removal is high in the treatments with plants since they range from 80-90% removal compared to the blank, and that statistically by the ANOVA evaluate no significant difference was found between the species used for the experiment.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua, por distintas fuentes, es una problemática internacional que deriva en afectaciones a los ecosistemas, así como a la comunidad en general ya que tiene impactos en la salud pública.

El Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) realiza un proyecto de rehabilitación de humedales urbanos, los cuales reciben escorrentías urbanas con agua de mala calidad, por lo que requiere ser tratada. Los humedales construidos son una opción adecuada al contexto ecológico, social y económico del país. La población aledaña a cuerpos de agua como humedales en un entorno urbano, desconoce la importancia de cuidar la calidad de agua que entra en ellos y las opciones que hay para mejorarla. Entre los parámetros de diseño de los humedales se encuentra el tipo de flujo de agua y la vegetación. En este proyecto se implementaron mesocosmos de humedales construidos con diferente diseño para tratar las escorrentías urbanas.

Se emplearon tinajas de plástico para construir los prototipos de humedales creados y se utilizaron dos especies de plantas nativas (*Typha domingensis* y *Juncus effusus*) de humedales urbanos de Xalapa. Se utilizaron 3 réplicas por cada especie y un tratamiento sin plantas. Los humedales fueron de flujo superficial y se utilizó suelo como sustrato. Se alimentaron con agua recolectada de las escorrentías de la colonia Lomas de Seminario de Xalapa, que van a parar en el Río Sordo y los experimentos se llevaron a cabo en el invernadero de área de Ingeniería Ecológica, en el campus III del INECOL.

Se hicieron análisis de agua a la entrada y salida de los humedales y se analizó la concentración de coliformes fecales mediante el método de filtración, utilizando el medio Chromocult sartorius. La concentración de amonio se analizó por espectrometría UV visible mediante el método de Nessler. Para el análisis de nitratos y sulfatos se empleó la técnica de cromatografía líquida.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las escorrentías urbanas son fuentes no puntuales de contaminación, las cuales arrastran compuestos presentes en las calles y estacionamientos como los residuos de hidrocarburos, además cuando el drenaje pluvial no está separado del drenaje de aguas negras, durante la temporada de lluvias estos se mezclan aumentando la carga de nutrientes y bacterias coliformes, así mismo, el recubrimiento de zonas urbanas ha generado pérdidas estructurales en el suelo y alteraciones en el ciclo hidrológico, prescindiendo de las fuentes naturales de purificación e infiltración del recurso hídrico; esto ocasiona que no exista una buena calidad de agua y que traigan consigo contaminación al cuerpo receptor. Es por ello por lo que se requiere un tratamiento de dichas fuentes no puntuales de contaminación. Los humedales construidos son canales con sustrato y plantas por donde el agua fluye y a través de procesos biológicos y físicos, los contaminantes son removidos del agua [1]. Comparados con los sistemas convencionales de tratamiento, los humedales naturales tienen varias ventajas, ya que son de menor costo de construcción y mantenimiento [2].

Considerando los escenarios e impactos del cambio climático, derivado de los modelos proyectados para los próximos años se prevé un incremento en las precipitaciones, y lo que provocaría que sitios que no sufren de inundaciones, puedan presentarlas; caso similar con lo que sucede en Xalapa, Ver, en épocas de lluvia.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aún con la presencia de la norma que establece los límites máximos permitidos de las descargas de aguas residuales municipales en México, la contaminación de cuerpos de aguas por este tipo de efluentes es todavía un problema a nivel nacional que requiere solución. Y aun menos atención se les ha puesto a las fuentes no puntuales de contaminación como las escorrentías urbanas, las cuales contaminan lagos, humedales y ríos urbanos. Aparte de los daños ecológicos que la contaminación de agua causa, también se pone en riesgo la salud pública y el

abastecimiento de agua limpia para la población y el desarrollo del país.

Los humedales construidos son una opción adecuada al contexto ecológico, social y económico del país. Tomando en cuenta el hecho de que los humedales urbanos han sido rellenados, imposibilitando así que cumplan con los servicios ambientales que poseen y aunado a que las poblaciones aledañas a estos desconocen la importancia de cuidar el agua que entra en ellos y las opciones que hay para mejorar su calidad. Se han tomado diversos parámetros de diseño de los humedales, entre los cuales se encuentra el tipo de flujo de agua y la vegetación. En este proyecto se implementarán mesocosmos de humedales construidos con diferente diseño para tratar las escorrentías urbanas.

1.3 HIPÓTESIS

La utilización de las especies *Typha domingensis* y *Juncus effusus* y la variación del flujo de agua tendrá un efecto en la eficiencia de tratamiento de escorrentías urbanas en humedales construidos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL.

Evaluar la eficiencia de tratamiento de escorrentías urbanas en humedales con diferente tipo de vegetación y tiempo de retención hidráulica.

1.4.2 ESPECÍFICOS.

- Diseñar e implementar, mesocosmos de humedales construidos empleando las especies *Typha domingensis* y *Juncus effusus* con diferentes flujos de agua.
- Evaluar la eficiencia de remoción de bacterias coliformes, iones (nitratos y sulfatos), DQO y amonio en los mesocosmos de humedales construidos.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad enfrentamos una problemática grave debido al desmedido crecimiento de la población y urbanización a nivel global, factores que agregan presión a un ya desmedido uso de recursos naturales, haciendo un llamado de atención a la población del valor que tienen los ecosistemas, sus funciones y los servicios que nos ofrecen [3].

A nivel mundial, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) proporciona el dato conciso de que solo el 20% de las aguas servidas reciben un tratamiento apropiado [4]. Ante este escenario tan poco favorable, la búsqueda e implementación de diversas alternativas para el tratamiento de las aguas anteriormente mencionadas es de suma importancia.

De acuerdo con lo anterior, Arcos et al., 1999 [5] consideraron que desde 1976 en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña presentan vivencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y a partir de 1986 se comienza a insertar los sistemas de humedales construidos.

Algunas pruebas se han enfocado en la comparación de escorrentías en una misma superficie estando o no urbanizadas, con las conclusiones de que por lo menos las obras públicas deben permitir un 50% de espacio no pavimentado [6].

Los HC's son una de las alternativas propuestas, porque funcionan como ecosistemas empleados para manejar el desarrollo biológico en condiciones semicontroladas, así mismo cumplen con los requerimientos en temas económicos, de aplicación y funcionamiento, energéticos, paisajistas y sociales [7].

Dentro de su estructura, los humedales artificiales son uno de los Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) más empleados para la gestión de los contaminantes en escorrentías [8]., por la eliminación de las concentraciones de estos, la implementación de especies que sean adaptables al medio en presencia de polución y que con ello aporten una mejora en la biodiversidad del lugar [9].

Las especies *Typha domingensis* y *Juncus effusus* fueron las seleccionadas en este proyecto, ya que, como lo mencionan [10], las primeras investigaciones científicas relacionadas con el uso humedales artificiales para el tratamiento de aguas,

remontan desde 1946 con el procedimiento denominado – Max Plank Institute System (MPIS) implementado por Seidel el cual está basado en diferentes etapas consecutivas. Las plantas que generalmente son empleadas son el *Phragmites australis* (carrizo), la *Scirpus sp.* (sripe), *Iris sp.* (Iris) y *Typha sp.* (quenuilla), La tecnología de humedales construidos se ha aplicado a varios tipos de efluentes, como las aguas residuales domésticas. Sin embargo, las escorrentías urbanas son aguas más diluidas, por lo que se requiere la optimización del diseño de los humedales. Es por eso la pertinencia de este trabajo que busca la evaluación de las especies *Typha domingensis* y *Juncus effusus* en la implementación del diseño de humedales construidos en el tratamiento de escorrentías urbanas.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

La problemática de la mala calidad del agua a nivel mundial ha traído consigo que distintos autores busquen soluciones más ecológicas, bajas en costos y con un menor mantenimiento para que dicho recurso sea tratado y así evitar la propagación de la contaminación en cuerpos receptores, este es el caso del uso de humedales construidos.

Chen et al., 2021 [11] evaluaron los cambios anuales en la acumulación de nitrato y explicó sus posibles mecanismos. Se observó que a bajas temperaturas la tasa de producción de nitrato de amonio predominó sobre la tasa de reducción de nitratos y el nitrato se acumuló en el afluente; los resultados indicaron que la temperatura del agua y el potencial de reducción de oxidación fueron los principales factores que afectaron a la acumulación de nitratos.

En cambio, autores como Qi et al., 2022 [12] mejoraron la eficiencia de eliminación de DQO y N a escala piloto, así como el crecimiento de las macrófitas. Los resultados sugirieron que las macrófitas emergentes marchitas podrían ser una fuente de carbono para las bacterias desnitrificantes y así aumentar la eficiencia de remoción de NO_3-N y Nitrógeno Total. Sin embargo, la aplicación de únicamente macrófitas emergentes en sistemas de humedales causó problemas secundarios como la contaminación derivada al aumento de DQO, que fue mitigado en gran medida por el uso combinado de las macrófitas emergentes y artificiales.

Por su parte, Sandoval et al., 2016 [13] optaron por el diseño de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas, empleando plantas ornamentales, las cuáles sobresalieron las Heliconas y las especies *zantedeschia* y *canna sp.*; también se demostró que los policultivos tienen un mayor porcentaje de remoción orgánico e inorgánico, además que el paisaje tiene una mayor biodiversidad y al mismo tiempo se puede obtener un beneficio económico.

Fan et al., 2021 [14] emplearon el uso de *calamus*, un macrófito emergente como una alternativa de fuente de carbono, todo esto debido al proceso de descomposición de su biomasa; se observó que existieron cambios en la eliminación del nitrógeno mediante la adición de biomasa en el sistema, pero al disminuir la T del agua se redujo la actividad microbiana, por lo que la velocidad de descomposición fue más lenta. La relación COT/NT comprobó que esta especie es propicia para ser fuente de carbono por desnitrificación.

Autores como Wu et al., 2018 [15] emplearon *Typha angustifolia* como fuente de carbono exógena para la eliminación de nitrógeno en humedales construidos; se observó que la dosis y el modo en el que se añade afecta directamente a la eficiencia de remoción y la adición de la hojarasca propició que se liberara materia orgánica debido a la descomposición de esta, por lo que el Oxígeno Disuelto disminuyó de manera gradual derivado de esto, por lo cual a las bacterias desnitrificantes se les brindó un ambiente propicio para su crecimiento y reproducción, lo que mejoró el proceso.

Gou et al., 2019 [16] rediseñaron un modelo ortogonal aplicado en 2016, donde sus parámetros fueron afectados para evaluar el rendimiento hidráulico, como resultados obtuvieron que la profundidad del agua, el espacio entre plantas y la distribución de las entradas y salidas fueron los principales factores que afectaron la eficiencia de la eliminación de contaminantes. Estos parámetros de diseño mostraron una influencia significativa en el rendimiento hidráulico y un efecto insignificante en el rendimiento del tratamiento.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 DEFINICIÓN DE HUMEDALES

Los humedales incluyen diversos ecosistemas por la variedad de ambientes y características que los componen, sin embargo, comparten algo en especial son zonas cubiertas por agua.

La Convención RAMSAR define a los humedales como “*las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*”, además que los clasifica en tres categorías: marinos y costeros, continentales y artificiales [17].

Otra definición es de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, citado por Fariña y Camacho, 2012 [18] establecen que:

(...) humedales son ecosistemas que dependen de la inundación o saturación de la superficie del sustrato, sea esta constante o temporal, la cual determina las características físicas, químicas y biológicas del ecosistema. Además, por ser una definición operativa la Academia establece como características de diagnóstico del ecosistema el estado de los suelos (inundados) y la presencia de vegetación hidrófita.

En el Decreto N° 771 de 1981 [19] definen a los humedales como:

(...) las zonas húmedas que dividen en áreas de ciénagas, pantanos, áreas de musgos o agua, sean estas naturales o artificiales, permanentes o temporales, de aguas estáticas o corrientes, frescas, con helechos o saladas, incluyendo zonas de agua de mar cuya profundidad no exceda de seis metros durante la marea baja.

Según Brinson, 2000 [20], los define como ecosistemas que se crean cuando debido a inundaciones provocadas por agua producen que en el suelo los procesos dominantes sean los anaeróbicos que fuerzan a la biota, en especial a las plantas arraigadas, haciendo que sufran un proceso de adaptación para tolerar la inundación y por ende lograr su supervivencia.

2.2.2 LA CONTAMINACIÓN DE AGUA EN GENERAL

2.2.2.1 FUENTES PUNTUALES

Las fuentes puntuales representan a las actividades de origen antropogénico cuyos desechos son vertidos de manera directa a cuerpos de aguas receptores y el sitio de vertimiento se distingue fácilmente. Además, que estos efluentes deben estar regulados, así como contar con un permiso para sus descargas, lo cual facilita su monitoreo para así vigilar el cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable.

De acuerdo con el *reporte GESAMP, 2001* [21], las fuentes fijas de contaminación más reconocidas corresponden a plantas industriales, desechos municipales y sitios de extracción, explotación y construcción como excavaciones (explotación agrícola, aprovechamientos forestales, minería, etc.). Los contaminantes presentes en las fuentes industriales son por lo general nutrientes (Fosfatos y Nitratos), metales pesados (Cd, Cr, Hg, Ni, Pb y As), compuestos orgánicos específicos, radionúclidos y propiedades físico-químicas específicas como pH, salinidad, demanda de oxígeno, dureza, etc.

Los componentes de las fuentes fijas ya mencionadas son microorganismos patógenos, nutrientes y carbono orgánico y se están combinados con aceites, grasas y productos químicos derivados de las industrias, los que entran en las corrientes de desechos domésticos a través de los sistemas de alcantarillado y la escorrentía pluvial. Los desechos industriales contienen además cantidades altas de materia orgánica provenientes de las plantas procesadoras de alimentos y bebidas y de la industria del cuero y de la madera.

2.2.2.2 FUENTES NO PUNTUALES

Las fuentes no puntuales también conocidas como fuentes difusas se generan por distintas actividades humanas en la que los contaminantes son derivadas de ellas y contenidos en su descarga, no cuentan con un punto fijo de entrada a los cuerpos receptores de agua, lo que provoca que su control y vigilancia sea más complejo derivado a que este tipo de fuente involucra el transporte (Agua pluvial y/o Esguimientos) y transformación de desechos a través de varios medios (deposición atmosférica, aplicación de un contaminante en el suelo y la transformación química en suelos, involucrando los tres sustratos ambientales (aire,

suelo y agua) así que no es posible regular de manera directa las emisiones de fuentes de contaminación difusa, sino que se regulan por medio de la implementación y evaluación de actividades en la cuenca [22].

En este caso las fuentes más representativas corresponden a la agricultura, por el uso de pesticidas e insecticidas, así como el aporte de residuos de insumos agrícolas y restos de vegetales ya que veces se produce la contaminación de acuíferos. La actividad forestal intensiva, en especial las plantaciones, también es una fuente difusa de contaminantes y produce, al igual que la actividad agrícola, cargas de nutrientes, pesticidas y sedimentos. También el agua pluvial que arrastra contaminantes derivados del lavado de estacionamientos, calles, carreteras, autopistas y césped que son drenadas en las escorrentías urbanas y tienen como destino final el alcantarillado y/o cuerpos de agua receptores, pero algunos pueden desembocar directamente en los espejos de agua, especialmente en regiones en desarrollo y suburbanas. El principal efecto de estas actividades es el incremento en la movilización de sedimentos, nutrientes y material particulado [21].

Bravo-Inclán, 2013 [23] resume algunas características propias de estas fuentes:

- Son fuentes de contaminación pequeñas, pero que colectivamente son significativas a lo largo de una cuenca.
- Son el resultado de actividades ligadas al uso del suelo.
- La calidad del agua es evaluada por cuencas hidrológicas.
- Tienen una gran influencia del agua pluvial.
- La extensión de las emisiones de contaminantes se relaciona con ciertos eventos climáticos incontrolables, así como por condiciones geográficas y geológicas, y pueden diferir mucho de lugar en lugar y de año en año.
- Los contaminantes más importantes son sólidos suspendidos, nutrientes (fósforo y nitrógeno), microorganismos fecales y compuestos tóxicos.

2.2.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA DE LOS HUMEDALES URBANOS

Las problemáticas ambientales van en aumento a nivel mundial, en el caso específico del agua se calcula que alrededor del 40% de la población mundial no cuenta con sistemas de saneamiento y el mayor impacto se ve reflejado en países

en desarrollo, ya que estos descargan cerca del 90% de sus aguas residuales a cuerpos de agua receptores (ríos, lagos y zonas costeras), logrando con esto que las fuentes de abasto sean insuficientes y la contaminación en el agua agudice esta situación [24].

Valencia y Figueroa, 2015 [25] indicaron que, en la actualidad, la problemática ha ido en aumento, debido a las actividades antropogénicas.

Olguin et al., 2005 [26] Mencionan que una parte fundamental de la potenciación de los daños ambientales y de salud en el país son a causa de la falta de educación ambiental por parte de la ciudadanía y la falta de aplicación de tecnologías medio ambientales entorno a las zonas urbanas y rurales.

Entorno a los humedales, las poblaciones que se asientan en sus alrededores, y en el caso de las metrópolis, el crecimiento exponencial de la sociedad y la urbanización no planificada provocan el deterioro y por ende la pérdida de estos [25].

RAMSAR, 2010 [17] establece que las principales presiones sobre los humedales son el cambio en el uso del suelo (urbanización, deforestación, rellenos, etc.), alteraciones en el ciclo hidrológico (por extracción, intercepción, desvíos, etc.), extracciones (pesca, maderas, pastos, etc.), contaminación (agrícola, industrial y domestica), por la introducción de especies distintas al hábitat natural y el cambio climático.

2.2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

2.2.4.1 TRATAMIENTO PRIMARIO

También se denomina primera sedimentación. Allí se remueven compuestos orgánicos flotantes o suspendidos. En este proceso se busca reducir el DBO en un 30 a 40% y tiene una duración de 1.5 3 horas [27].

En este caso como mencionan Clemente et al., 2013 [28], el objetivo básico es eliminar las materias gruesas y/o visibles que contiene el agua residual. El vertido de esas materias a los cuerpos receptores produce un impacto estético. Si pasan a etapas posteriores a la depuración se generan problemas y es poco eficaz en el funcionamiento de sus procesos.

En esta etapa se tratan de eliminar los siguientes contaminantes:

a) Residuos sólidos o basura que entra en un colector.

Se evitan problemas que este material grueso podría provocar en siguientes pasos, por ejemplo, un atascamiento.

b) Partículas discretas sedimentables o arenas.

Las arenas producen abrasión sobre los mecanismos. Sedimentarán en los canales u otros lugares perjudicando el flujo.

c) Grasas, flotantes y espumas.

En cierto momento del proceso acceden a la superficie y se adhieren en ella. Dificultan la aireación de la masa de agua, fundamental en los procesos biológicos aerobios.

Las operaciones que se dan en esta etapa del tratamiento son: desbaste, desarenado y desengrasado, aunque en algunos casos también se pueden incluir pre-aireación, tamizado, pre-decantación, etc.

2.2.4.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Según Morelli et al., 1996 [29], este proceso tiene el objetivo de reducir los sólidos suspendidos, así mismo, reduce la turbidez y la DBO, ya que, los sólidos suspendidos son parte de la materia orgánica, convirtiendo la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables floculentos que son separados por sedimentación en tanques de decantación. Los procesos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores. Asimismo, dentro de este grupo se incluyen a las lagunas de estabilización y aireadas, así como el tratamiento biológico empleando oxígeno puro y el tratamiento anaeróbico. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia remocional de la DBO entre el 85% y 95%.

En este caso *The World Health Report 1997* [30], menciona que los Humedales son empleados para proporcionar tratamiento secundario y/o terciario como se muestra a continuación en la Fig. 2.1.

Primario	Secundario	Terciario
Cribado mecánico	Lodos activados	Nitrificación
Desarenado	Aireación extensiva	Des nitrificación
Sedimentación primaria	Lagunas aireadas	Precipitación química
Pulverización	Filtro percolador	Desinfección
Eliminación de grasa y aceite	Biodiscos	Filtración directa
Homogenización de flujo	Tratamiento anaeróbico/UASB	Oxidación química
Neutralización	Filtro anaeróbico	Remoción biológica de fosforo
Tanques Imhoff	Lagunas de estabilización	Humedales artificiales
	Humedales artificiales	Acuicultura
	Acuicultura	

Fig. 2.1 Clasificación del tratamiento de aguas residuales según su nivel de complejidad.

2.2.5 HUMEDALES COMO TRATAMIENTO

2.2.5.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS

La necesidad del hombre por resolver la gestión del tratamiento de aguas por la problemática medio ambiental de la calidad del agua ha provocado un aumento en el uso de humedales construidos (HC's) como una nueva alternativa, eficiente y sostenible para el tratamiento del recurso [3].

Para USEPA 1988 [31], "Un humedal se construye fundamentalmente para disminuir la contaminación y manejar los residuos, sobre un humedal natural". Como indica la EPA estos consisten en un lecho de estructura estratificada y un instrumento afluente que introduce a las aguas a tratar de forma distribuida y un instrumento efluente para recolección, para recoger y descargar el efluente tratado en el lecho. Las plantas se colocan en el sustrato o lecho de manera estratégica. Los microbios se adhieren a las raíces, en este caso el nivel del agua debe ser entre 5 y 15 cm para asegurar el fujo.

Como mencionan Choi et al., 2018 [7], los HC's son ecosistemas diseñados para imitar los procesos biológicos que ocurren de manera natural en un entorno con condiciones semi controladas.

Autores como Arias, 2004 [32], lo define como áreas inundadas por aguas superficiales o subterráneas y con duración o profundidad suficiente para mantener

especies de plantas predominantes, adaptadas a crecer en un sustrato saturado y con un lecho poroso (gravas, arenas) y sedimentos finos (arcillas, limos) con vegetación emergente como espadañas, carrizos, juncos y enneas las cuales aprovechan la interacción con los microorganismos y la atmósfera para la remoción de contaminantes.

Inicialmente los HC's se usaban para el tratamiento de aguas municipales y domésticas. En la actualidad su uso se extendió para la depuración de efluentes agrícolas, industriales, drenaje, lixiviados, aguas contaminadas de ríos y lagos, de zonas urbanas y esorrentías [33]. Estos sistemas consisten en estanques con niveles bajos en los que se implementan diferentes especies adaptadas a la vida en agua y en los que la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico como se muestra en la Tabla 2.1., [34].

Tabla 2.1 Principales procesos físicos – químicos y biológicos en la depuración de aguas residuales con humedales.

Contaminante	Proceso de depuración
Materia Orgánica	Sedimentación
	Asimilación
	Mineralización
Sólidos en suspensión	Floculación
	Sedimentación
	Filtración
	Degradación
Nitrógeno	Amonificación
	Volatilización del amonio
	Nitrificación
	Desnitrificación
	Asimilación vegetal
Fósforo	Adsorción
	Sedimentación
	Precipitación química
	Asimilación vegetal
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual
	Radiación UV
	Antibióticos naturales
	Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación
	Inmovilización
Metales pesados	Fijación del sedimento
	Adsorción por las plantas

Fuente: [35].

2.2.5.2 TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

El diseño de humedales tiene como característica canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar el paso de contaminantes a los ecosistemas naturales cercanos como capas impermeables de arcilla o plástico y estructuras para el control del flujo de la salida en cuanto a su dirección, flujo, tiempo de retención y nivel del agua. Dependiendo del tipo de sistema, podría contener o no un medio inmóvil poroso como piedra, grava o arena [36].

Lahora, 2002 [35] , mencionó que el uso de estos sistemas se ha aplicado al tratamiento de una gran cantidad de aguas residuales, incluyendo aguas de escorrentías urbanas, municipales, agrícolas, industriales y de drenaje ácido de minas.

Teniendo en cuenta el tipo de circulación del agua, los humedales construidos se han clasificado en dos tipos, humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial, a continuación, se describen.

2.2.5.2.1 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

En este tipo de humedales el agua fluye horizontal o verticalmente en un extremo del lecho, a unos pocos centímetros debajo de la superficie, teniendo un movimiento en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno, entre las raíces de las plantas y sin estar expuesto a la atmósfera. Al final y en el fondo del lecho, el agua tratada se evacua por medio de tuberías.

De igual manera, se caracterizan porque su lecho contiene un medio poroso en donde están plantadas macrófitas emergentes.

Para estos humedales se deben diseñar de tal manera que el nivel del agua se encuentre debajo del medio granular, no excediendo los 0,6 m y para asegurar la dinámica del agua deben ser construidos con una leve pendiente en el fondo, todo esto con el fin de minimizar los olores, la atracción de vectores y un impacto negativo en la salud pública de las poblaciones aledañas al humedal [37].

Como menciona García y Corozo, 2008 [38], estos humedales se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales.

2.2.5.2.2 HUMEDALES DE FLUJO HORIZONTAL

Fueron de los sistemas más utilizados en Europa y se originaron desde la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas generalmente consiste en una cama, ya sea de piedra, arena y/o grava, con macrófitas acuáticas sembradas, Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones al suelo [39].

En este caso el agua entra de forma permanente, empezando desde la parte superior del extremo y recogida por un tubo de drenaje en la zona contraria inferior y circula horizontalmente a través del medio granular, aunque el agua residual no entra directamente al medio principal, sino que hay una zona de amortiguación que es principalmente formada por grava de gran tamaño y también pasan por los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad de agua es de entre 0,3 y 0,9 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 % (Fig. 2.2). Estos se caracterizan por funcionar todo el tiempo inundado (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 Gdbo/m² Día [38].

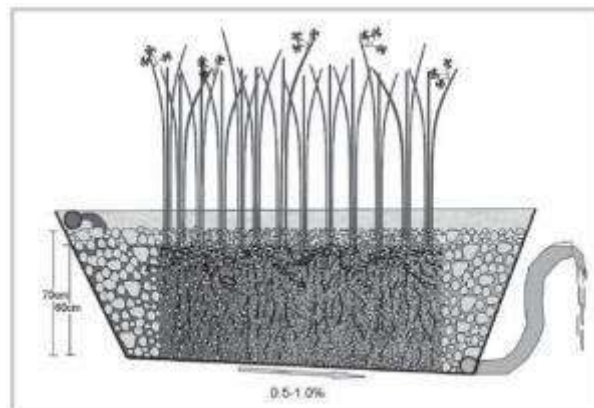


Fig. 2.2 Humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Fuente [39].

El sistema de recogida consiste en un tubo cribado, rodeado con grava que sea igual al del inicio. El diámetro de la grava de entrada y salida está entre 50 mm a 100 mm.

La zona de sembrado está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 3 mm a 32 mm.

Es muy importante que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga un nivel abajo a la superficie (5-10 cm) [40].

2.2.5.2.3 HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

Para García y Corozo, 2008 [38] este tipo de humedales se desarrolló en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados. Generalmente los sistemas verticales y horizontales se acoplan para que sucedan de forma gradual los procesos de nitrificación y desnitrificación y se consiga así eliminar nitrógeno. Estos sistemas son cargados de manera intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno [39]. También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua (Fig. 2.3).

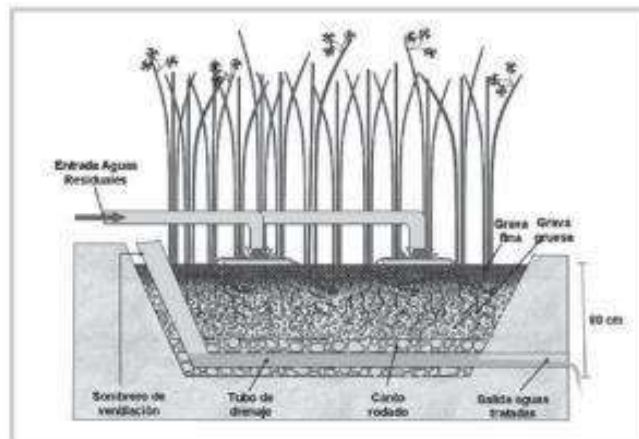


Fig.2.3 Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Fuente [41].

El agua se infiltra verticalmente a través de un sustrato inmóvil (arenas, gravas) y se recoge en una red de drenaje que está en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para conservar y aprovechar al máximo las condiciones aerobias. La vegetación que sale se planta también en este medio granular. Para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior.

2.2.5.2.4 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL

Este tipo tiene características semejantes a los humedales naturales y se basan en una laguna o canales de poca profundidad a través de los cuales circula el agua a una velocidad baja sobre la superficie.

Crites y Tchobanoglou, 2000 [40] relacionaban que en estos casos el agua está sujeta directamente a la atmósfera y circula principalmente a través de los tallos y hojas de las plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de los efluentes que ya han recibido tratamiento por medio de una depuradora (Fig. 2.5).

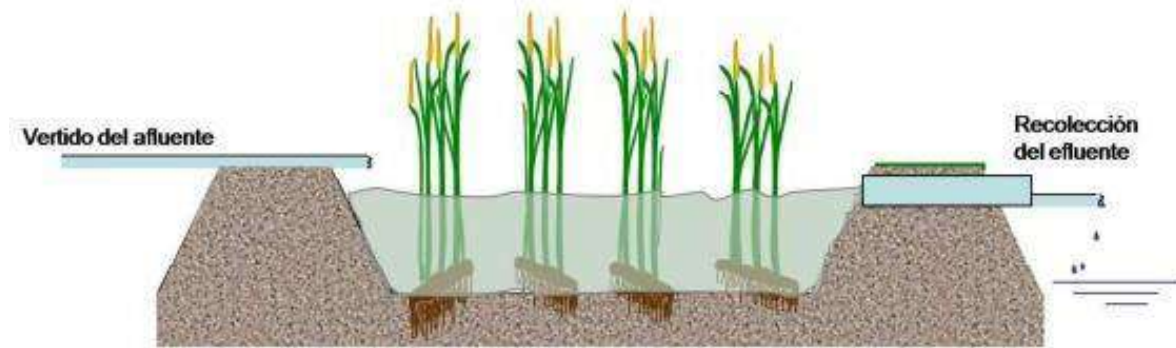


Fig. 2.5 Humedal construido de flujo superficial.
Fuente [38].

Este tipo de sistemas los constituyen generalmente canales o tanques con una barrera natural o artificial para prevenir la filtración del agua. En algunos casos se diseñan de forma que haya retención completa del agua residual que se aplica a través de filtración y la evapotranspiración. Las bacterias pegadas a las plantas tratan el agua residual en lo que esta fluye a través de la vegetación y por medio de procesos físicos y químicos. La profundidad del lecho va desde 0.45 a 1 m y tiene una pendiente característica de 0 a 5%, como se observa en la Fig. 2.6.

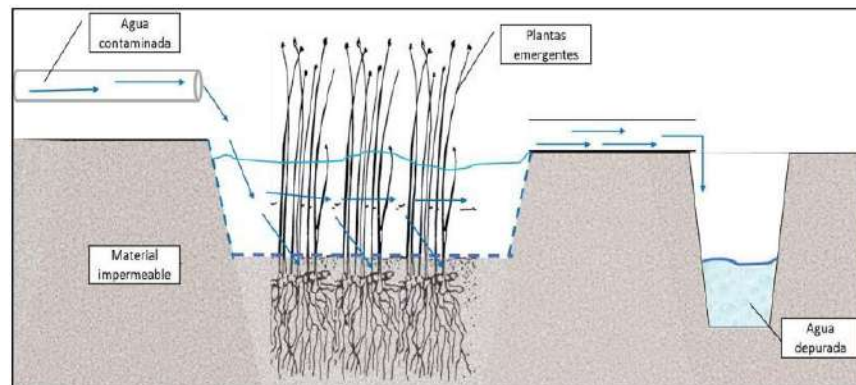


Fig. 2.6 Esquema de un humedal de flujo superficial.
Fuente [41].

por su capacidad de contener distintas especies de fauna como los peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen [38].

2.2.5.2.5 HUMEDALES FLOTANTES

A diferencia de los sistemas anteriormente mencionados, existen sistemas híbridos y los humedales artificiales flotantes (HAF), estos últimos son conocidos como islas flotantes que son ocupados como soluciones a la contaminación de ciertos ríos urbanos [42].

Los HAF son innovación a partir de los humedales artificiales, que consisten en la plantación de plantas terrestres o acuáticas usando el principio de la hidroponía. Estos sistemas tienen cuatro funciones principales: Ser hábitat para peces y aves, Purificar el agua, Ser barreras para proteger la zona litoral, y Promover el paisajismo (Fig. 2.7).

Zhang et al., 2014 [43] mencionan que esta alternativa se ha utilizado en distintos continentes (América, Asia y Europa). En algunos países en vías de desarrollo, con clima tropical preferentemente, se han empleado para el tratamiento de aguas residuales domésticas, efluentes industriales, aguas residuales agrícolas, aguas de ríos y lago, efluentes de lodos, escorrentía e incluso aguas residuales de hospitales y laboratorios.

La efectividad de este sistema se basa en el clima, ya que, es mayor en zonas tropicales y subtropicales [44], además se estima que, en un aumento en la temperatura, derivado del cambio climático, se incrementa la remoción de contaminantes en los humedales.



Fig. 2.7 Humedal flotante.

2.3 MARCO CONCEPTUAL

2.3.1 HUMEDALES CREADOS

Son ecosistemas creados para dar solución de manera ecológica para el tratamiento de aguas y/o prevención de inundaciones en áreas urbanas, así como contribuir a la biodiversidad, ya que, son grandes gestores ambientales para conservar y mejorar la poca diversidad presente en hábitats acuáticos, logrando así tener las condiciones y/o servicios ambientales de un humedal natural [45].

2.3.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS

Son humedales artificiales que se emplean para el tratamiento de aguas (superficiales, residuales municipales, domésticas, efluentes de refinерías, drenajes o lixiviados en verdaderos) por contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, así como el exceso de nutrientes [46].

2.3.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS Y CREADOS

2.3.3.1 SUELO

En relación con lo que mencionaban [47] el suelo para ellos podía ser variado y ser desde la arena, grava, roca, sedimentos y restos de materia vegetal que estuviese aglomerada en los humedales. Teniendo como referencia que debe contar con una permeabilidad suficiente para permitir la interacción del agua y la atmosfera. Lo que conlleva a que se utilicen materiales de tipo granular debido a su diámetro y poros finos.

El medio granular debe estar limpio, homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la capa de microorganismos en la radícula. Diámetros medios alrededor de 5 – 8 mm ofrecen excelentes resultados [38].

Como cita [37] uno de los sustratos más utilizados en Estados Unidos y Europa es la grava, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo.

En el medio granular ocurren varios procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos [38].

Una característica de suma importancia de este medio es su propiedad de conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular en él [38].

CENTA 2004 [48], mencionaba que el sustrato tiene un papel de soporte a la vegetación y permite la fijación de los microorganismos, que van a intervenir en gran parte de los procesos de eliminación de los contaminantes.

Según [49], las propiedades que tiene el sustrato son:

- Hidráulicas

La estructura del sustrato va a determinar las propiedades hídricas del humedal. Arias, 2004 [32] indicaba que el tamaño del sustrato afecta directamente al flujo del humedal y por consecuencia al caudal del afluente que se utiliza. Igualmente mencionaba por ejemplo que, si el lecho granular está formado por arcilla y limo en grandes cantidades, como consecuencia se obtiene una mayor capacidad de absorción y filtración, ya que el diámetro de los poros es pequeño, pero presenta una alta resistencia hidráulica y requiere de velocidad de flujo baja, limitando al caudal.

- Químicas

Las partículas del sustrato absorben parte de los microorganismos inmersos en el agua residual. Existe el caso que cuando cualquier efluente doméstico llena los poros del sustrato se formará un escenario donde habrá una falta de oxígeno donde

se llevarán a cabo reacciones que ayudarán a la eliminación de contaminantes como por ejemplo nitrógeno y metales.

- Área superficial

El área del sustrato está relacionada de manera directa con el lecho microbiano debido a que a mayor área existirá una mayor probabilidad de adsorción de los microorganismos al sustrato y en consecuencia una mayor degradación de contaminantes.

Cuando las aguas residuales entran en el medio, éste permite hacer una buena eliminación de los sólidos suspendidos y de la parte orgánica. Mientras el medio de filtración tenga capacidad de absorción, podrá permitir la acumulación de fósforo, si las condiciones son favorables [50].

2.3.3.2 PLANTAS

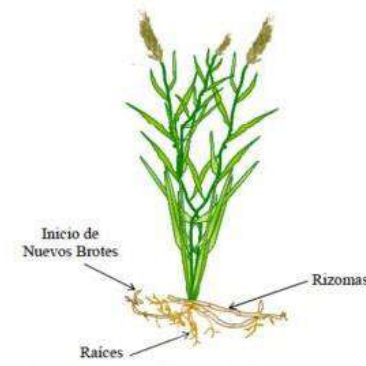
La elección de la vegetación que se usa en un humedal debe enfocarse a las características de donde se va a realizar el proyecto. Las especies deben ser colonizadoras activas, con un largo importante de ribosomas. Deben tener biomasa considerable por unidad de superficie para tener una buena producción de nutrientes. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la capa de bacterias. Deben tener un transporte de oxígeno eficiente hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación. Se usan las especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales de los sistemas experimentales, deben ser especies con una alta productividad, tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales y se deben utilizar especies propias de la flora local [35].

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son:

Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de una capa de bacterias. Dichos microorganismos crecen unidos a las raíces de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de estas se crean micro ecosistemas con presencia de oxígeno donde tienen lugar procesos microbiológicos, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación [35].

A través de distintos estudios se ha determinado que el tipo de vegetación más común en humedales artificiales son las macrófitas.

Las macrófitas son capaces de transportar oxígeno desde los tallos y hojas hacia sus raíces y rizomas (Fig. 2.7) por lo que los procesos de depuración de materia orgánica son básicamente anaerobios, no ocurriendo por tanto la nitrificación – Desnitrificación [35].



Fuente: (García, J., Corzo, A., 2008).

Fig. 2.7 Esquema de una Planta Emergente.

Las plantas durante su crecimiento utilizan cierta cantidad de nitrógeno y de fósforo y de alguna manera consumen y concentran en sus tallos y hojas ciertos metales pesados [50].

El oxígeno necesario para que se lleven a cabo los procesos fisicoquímicos y bacteriológicos de depuración, es a causa de las plantas, que forman por fotosíntesis o en una toma de aire e inyectan hasta la zona de las radículas con lo que proporcionan oxígeno a los microorganismos presentes en la rizosfera, favoreciendo la eliminación de algunos contaminantes por actividad microbiana, además de la degradación de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes [51].

A continuación, se describe la biología de las especies utilizadas en el estudio.

2.3.3.2.1 *Typha domingensis*

En base a lo descrito por Persoon y citado por Heywood, 1968 [52], esta planta se clasifica dentro de la clase liliopsída (monocotiledóneas); subclase commelinidae, orden typhales, familia typhaceae. La cual posee un solo género “*typha*” (Fig. 2.7), este se compone de macrófitas emergentes que crecen aproximadamente dos metros o más y poseen tallos largos que de manera general están sumergidos en la base, las hojas nacen de la parte subterránea del tallo en filas de láminas lineales,

aéreas, elongadas, gruesas y esponjosas.

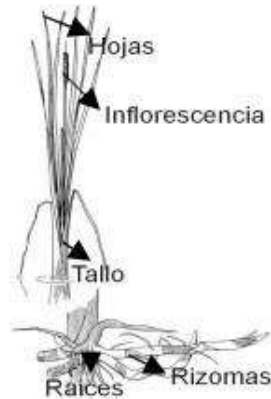


Fig. 2.8 Descripción del género *Typha*.

Rzedowski et al., 2005 [53], la describen como una hierba acuática, enraizada y emergente que alcanza una altura de 2.5 m.

Sus hojas las describen del tamaño anteriormente mencionado o excediendo esta medida, de forma asimétrica, pero con algunas excepciones donde si muestran simetría, conteniendo gran cantidad de glándulas mucilaginosas oscuras, organizadas en líneas longitudinales.

En el caso de la inflorescencia, cola de gato o salchichón es una espiga cilíndrica de color café claro.

Generalmente presentan polinización por el viento y la inflorescencia, posee flores unisexuadas con segmentos del perianto conformados por numerosos pelos delgados o escamosos alargados. El androceo posee de 2 – 5 estambres libres o con filamentos fusionados, que poseen anteras lineares unidas en la base. El gineceo posee un solo carpelo unilocular, con una sola semilla [54].

Mientras que Pezeshki et al., 1996 [55], mencionan que la edad de vida máxima alcanzada por ramets de *typha domingensis* es de 88 semanas, se reproducen por crecimiento vegetativo con ramets conectados por un rizoma y/o a través de semillas dispersadas por el viento.

Esta especie se encuentra tanto en aguas dulces y ligeramente salinas como por ejemplo pantanos, lagos, ríos y ciénegas. De acuerdo con su localización se incluyen zonas templadas y tropicales desde el Ártico hasta el sur del continente

americano [54].

2.3.3.2.2 *Juncus effusus*

Como menciona CONABIO 2009 [56], esta planta se clasifica dentro de la clase Liliopsída, orden Poales, familia Juncaceae. La cual posee el género “Juncus”. Es una hierba perenne, de 25-128 cm, que crece en matas densas, con tallos brillantes, lisos, verde más bien claro, de hasta 4 mm de diámetro. Las hojas, son unas vainas que van desde el tallo en la parte inferior, como muestra en la siguiente imagen (Fig. 2.9). Son plantas que necesitan vivir en contacto con el agua constantemente y en exposiciones a pleno sol. Es muy común en cualquier zona encharcada, borde de arroyos, fuentes, marjales, acequias, bordes de pantanos y ríos.



Fig. 2.9 Estructura del género *Juncus effusus*

En base a Menéndez [57], Cuenta con flores solitarias, subsésiles, la mayoría se encuentran en el extremo de las ramas, con tres bractéolas involucrales, algunas laterales, con 2 bractéolas involucrales de 0.5 -1 mm, ovadas, agudas o acuminadas, agrupadas en varios racimos que surgen de un mismo punto, aparecen desde finales de primavera en verano, en la mayoría de los tallos; tienen 6 piezas, (tépalos), rígidas y membranosas, 6 estambres y un ovario, que produce un fruto en cápsula ovoide de color castaño; parecen crecer en el tallo puesto que son

sobrepasadas por una bráctea pinchuda con su mismo aspecto. Producen un fruto de color marrón en forma de cápsula oval. Tépalos de 1.7-2.5 mm, iguales o los externos de longitud algo mayor, ovados o lanceolados, rígidos, acuminados, con un color verde-grisáceo, con márgenes escariosos más anchos en la mitad inferior. 3 estambres, rara vez más; filamento de 0.5-0.7 mm, antera de 0.4-0.7 mm, generalmente casi igual que el filamento. Inflorescencia de 0,8-10 cm, pseudolateral, en antela 2-4 veces ramificada, formada por cimas irregulares, multiflora, laxa o compacta, con 25 o más flores y una sola bráctea foliácea de 4.5-34 cm, que parece la prolongación del tallo.

Tiene una cápsula de aproximadamente 1.5-2.3 mm, con frecuencia más corta que los tépalos, a veces igualándolos o de longitud algo mayor, ovoide o elipsoidal, trígono, obtusa, truncada o ligeramente retusa, amarillenta o pardusca, brillante, sin pico. Sus semillas tienen un tamaño de 0.4 - 0.5 mm, oblicuamente ovoides, finamente reticuladas, amarillentas o ferrugíneas. Se reproducen mediante germinación de las semillas o división del rizoma [57].

2.3.3.3 AGUA

La parte hídrica es una parte fundamental en la creación de humedales, ya que donde se acumule una capa de agua sobre una superficie de terreno y donde también cuente con una capa del subsuelo para prevenir filtración del agua en este. Dichas condiciones pueden ser generadas para crear un humedal casi en cualquier sitio, alterando la superficie de terreno para que sea capaz de recolectar agua y pueda sellarse para la retención del agua.

Este componente es fundamental para el diseño en un humedal construido porque contiene todas las funciones propias de los humedales naturales y porque es el principal factor del éxito o fracaso del diseño e implementación [58].

Más, sin embargo, la hidrología de un humedal construido no es muy diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en aspectos importantes:

- El cambio en la hidrología tiene efecto en la eficacia de los tratamientos implementados.

- Con relación al área superficial y su poca profundidad, la relación sistema-atmósfera actuó de manera recíproca a través de la lluvia y la evapotranspiración.
- La cantidad de vegetación afecta a la hidrología, debido a que obstruyen la distribución de flujo volviendo a este sinuoso en el movimiento del agua a través de tallos, hojas, raíces y rizomas, así como también bloquea la exposición al viento y a la radiación ultravioleta del sol.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

3.1.1 SITIO DE ESTUDIO

Para desarrollar este trabajo de investigación, se construyó un sistema prototipo de humedales construidos con flujo superficial a escala de mesocosmos considerando los componentes que tiene un humedal natural, es decir, suelo, agua y vegetación. Estos se implementaron en el invernadero ubicado en Campus III del Instituto de Ecología, A.C. en la ciudad de Xalapa, Veracruz en las coordenadas geográficas de latitud 19.540000 y longitud - 96.927500 (Fig. 3.1). El clima es húmedo variado, teniendo una temperatura máxima de 34.3°C y una mínima desde los 5 hasta los 10°C por las mañanas y presenta una temperatura media anual de 18°C. La altitud de la ciudad oscila desde los 1250 hasta los 1560 msnm. Su precipitación pluvial media anual es de 1509 msnm [59].



Fig. 3.1 Ubicación Del Municipio De Xalapa y el INECOL Dentro Del Estado De Veracruz.

3.1.2 COMPONENTES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO

El sustrato utilizado fue el suelo arcilloso que se obtuvo del humedal urbano Molino de San Roque (HMSR) (Fig. 3.2), mientras que las especies utilizadas para este proyecto fueron macrófitas emergentes presentes en dicho humedal *typha domingensis* y *juncos effusus*. Se consideró que fueran estas, debido a que son

plantas que son nativas de la ciudad, además que presentan adaptación a las condiciones climáticas, estas plantas se han empleado en estudios anteriores para el tratamiento de aguas mediante humedales, ya que, son de rápida y abundante propagación y resistentes a altas temperaturas; propiciando un cambio de temperatura en el agua, así como en el sustrato. Al momento de recolectar las plantas, se priorizó tener el cuidado de extraer la planta de manera completa, esto para propiciar un mejor desarrollo en el sistema y se proliferan mejor.



Fig. 3.2 Ubicación Del Humedal Molino de San Roque.

En relación con el afluente, se tomó la decisión que fuera extraído del Río Sordo, ya que, debido a la localización de los mesocosmos era necesario tener un cuerpo receptor cercano y este atraviesa al INECOL (Fig. 3.3), además que cumplen con la característica que cuenta con escorrentías urbanas todo esto desde la colonia Lomas del Seminario.



Fig. 3.3 Ubicación del Río Sordo.

Todo este proceso se llevó a cabo como se muestra en la Figura 3.4.

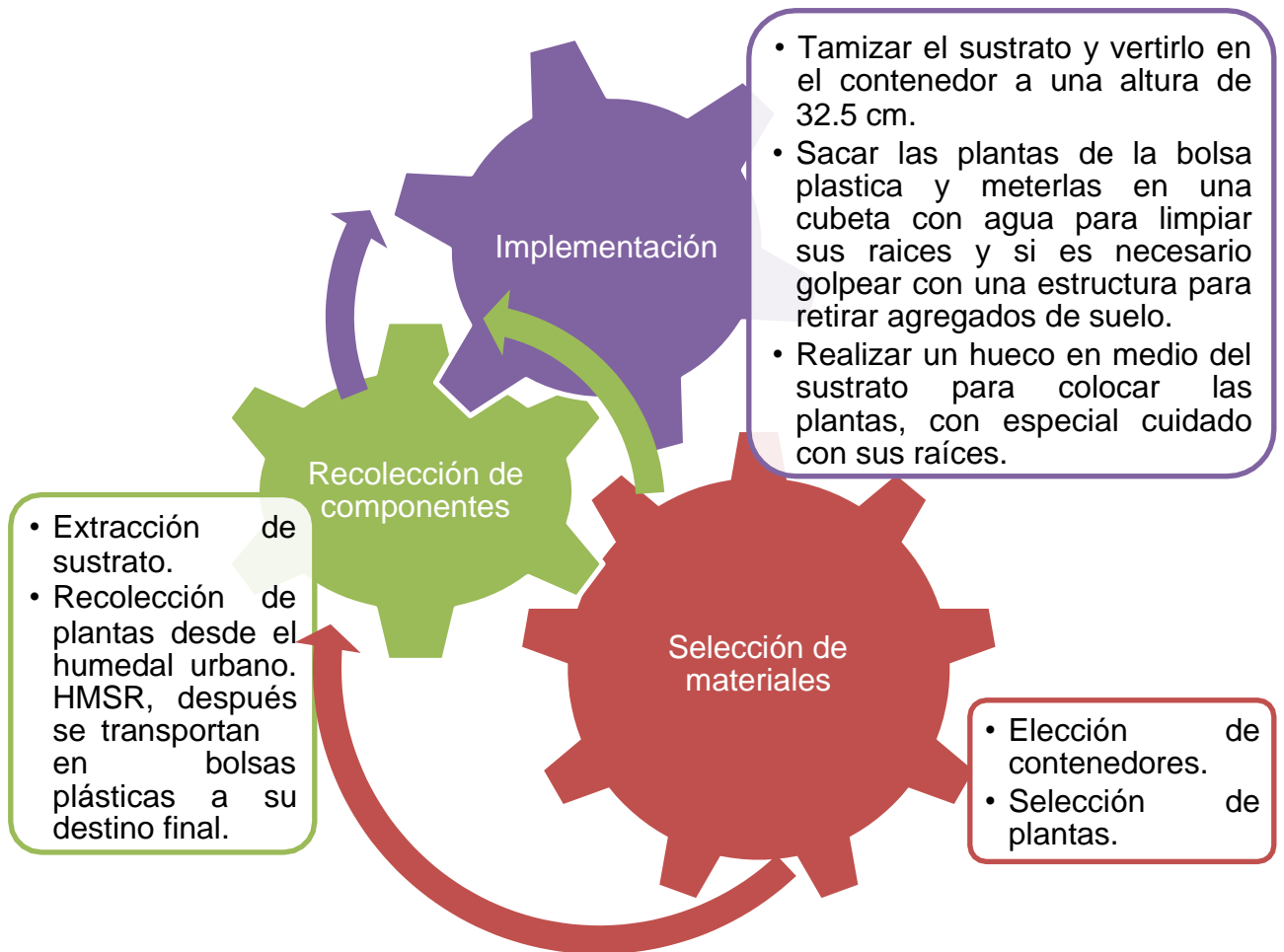


Fig. 3.4 Diagrama de flujo de construcción de HC's.
Fuente: Elaboración propia.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se consideró el uso del diseño experimental que planteó Marín-Muñiz, 2016 [60], donde se empleó un diseño factorial de tipo 2³, donde los factores de estudio fueron el tipo de macrófitas emergentes *Typha domingensis* y *Juncus effusus*, así como un control donde no hay plantas, solo sustrato, aplicando así dos tratamientos con tres repeticiones que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tratamientos dentro del diseño y construcción del Humedal Construido de flujo superficial con el uso de vegetación Macrófitas emergentes.

Tratamiento N°	Descripción
1	Especie <i>Typha Domingensis</i>
2	Especie <i>Juncus Effusus</i>
Control	Sin Plantas (S/P)

Lo descrito con anterioridad se implementó, obteniendo lo que se observa en la Figura 3.5.

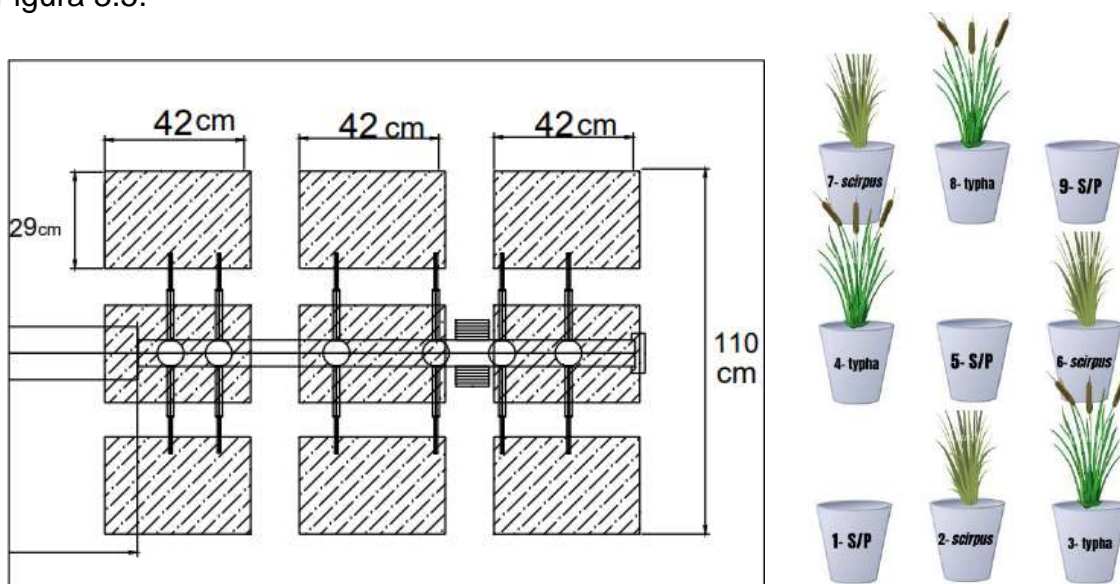


Fig. 3.5 Sistema de Mesocosmos con distintos tratamientos.

Fuente: Elaboración propia.

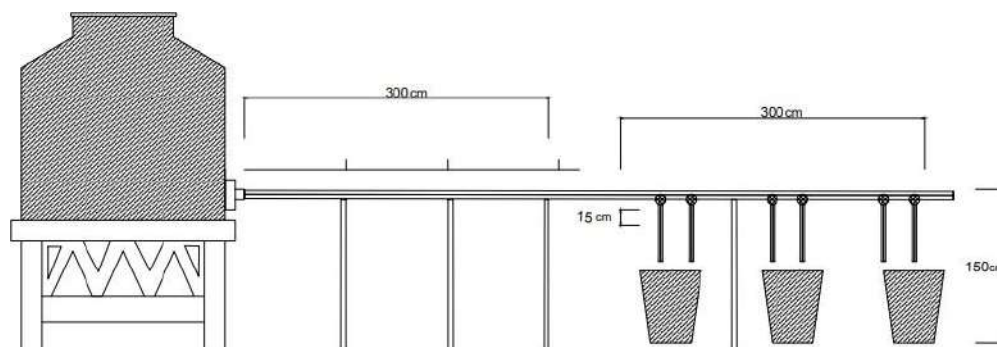
3.2.1 SISTEMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE MESOCOSMOS

Para el sistema de mesocosmos, se construyó un sistema hidráulico que consistió en los materiales descritos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Materiales para la arquitectura del sistema hidráulico.

Material	Cantidad
Tubo de PVC de 35 mm de diámetro	6 m
Coples para-PVC de ½ “	4 pzas
Pegamento para-PVC	1 pza
Trozos de Manguera verde de jardinería de ½ “	9 pzas
Equipo de venoclisis	9 pzas
Liga de hule de látex de equipo médico.	1 m
Llaves de plástico	7 pzas
Conexión “y” de PVC de ½ “	2 pzas
Rotoplas de 1100 L	1 pza

Con el sistema hidráulico, los tratamientos obtuvieron un flujo constante, permitiendo el control del agua al sistema (Fig. 3.6); además se empleó un tanque de almacenamiento de 1100 L. Por gravedad, el agua atraviesa una extensión 600 cm de tubo PVC de 35 mm de diámetro; de los cuales los últimos 150 cm de tubería es donde se aplicó el sistema, en el cual se emplearon 7 llaves de plástico, de las cuales 2 emplearon conexión “y”; se añadieron mangueras verdes de jardinería de ½ pulgada con una longitud de 15 cm, así como equipo de venoclisis para controlar el flujo de agua por cada HC.



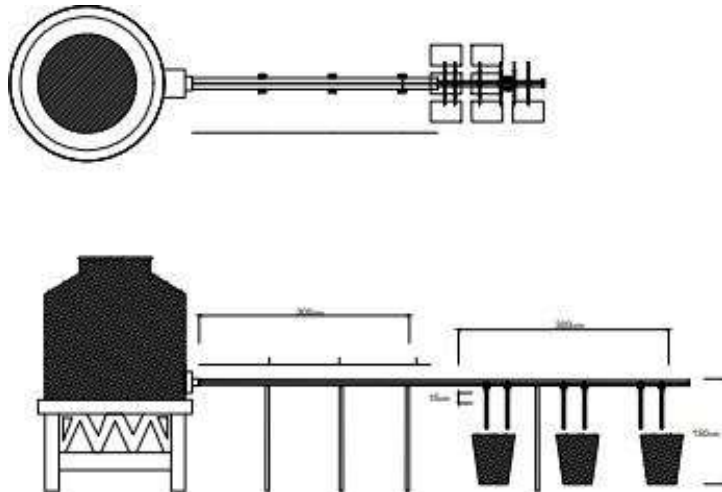


Fig. 3.6 Sistema hidráulico empleado.
Fuente: Elaboración propia

Antes de poner en funcionamiento el sistema se determinó el caudal que debería tener el sistema, considerando los tiempos de retención (TRH) de 1 y 2 días respectivamente. Ramírez 1999 [61] consideró que a mayor tiempo de retención mayor será el porcentaje de remoción, pero con aguas con carga alta de nutrientes. Sin embargo, las escorrentías son aguas más diluidas y por tanto el criterio se modifica, así mismo las veces que fueron necesarias para bombear agua.

Se tomó en cuenta, la capacidad de los contenedores para determinar el área de este (Fig. 3.7):



Fig. 3.7 Medidas Del Contenedor.
Fuente: Elaboración Propia

Cada HC tenía una columna de agua de 10 cm, y el área del contenedor fue de 747.75 cm^2 utilizando la EC. 1, se tiene un volumen de 7477.5 cm^3 .

$$V = A \times h \quad (1)$$

Las unidades de volumen se expresaron en litros, tomando el factor de conversión $(\frac{0.001 \text{ L}}{\text{cm}^3})$, lo que da por resultado 7.4775 L.

Para calcular el tiempo de retención se aplicó la EC. 2.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Despejando el caudal, la ecuación se modificó como la EC. 3

$$Q = \frac{V}{TRH} \quad (3)$$

Se empleó un-TRH de 1 día, dando como resultado $7.4775 \frac{\text{L}}{\text{día}}$; dicho resultado se multiplicó por la cantidad de contenedores del sistema obteniéndose un gasto diario del sistema de **$67.2975 \frac{\text{L}}{\text{día}}$**

El valor anteriormente calculado, se multiplicó por los días de la semana y este a su vez por las semanas que contiene un mes, obteniéndose como resultado un gasto semanal de $471.0825 \frac{\text{L}}{\text{semana}}$ y un gasto mensual de $188.33 \frac{\text{L}}{\text{mes}}$. Para un-TRH=2 días, se disminuyó el flujo a la mitad teniendo un flujo aproximado de $3.75 \frac{\text{L}}{\text{día}}$, y para calcular el gasto semanal y mensual se llevo a cabo el mismo procedimiento empleado para un-TRH= 1 día.

El gasto semanal y mensual del sistema permitió establecer el número de veces que se tendría que bombear agua en un periodo de 3 meses, para obtener un flujo constante. Con esos datos, se estableció que los bombeos fueran 2 veces por mes, es decir cada dos semanas.

Otras operaciones que se realizaron para darle mantenimiento a los humedales fueron las siguientes:

- Se removieron hojas o basura que pudiese provocar taponamiento de las mangueras.

- Las entradas y salidas de los mesocosmos fueron limpiadas para eliminar obstrucciones por la acumulación de algas u hojas que pudieran afectar los análisis y el flujo del agua durante su tratamiento.
- Al equipo de venoclisis se limpiaban las mangueras y se adhirió cinta negra de aislar para evitar el crecimiento de algas.
- Para corroborar que el flujo fuera constante (5.20 ml/s) se procede a medir diariamente con una probeta plástica de 10 ml cada HC, contando un minuto con cronómetro y así verificar que todo el sistema tuviera dicho flujo.
- El efluente de cada mesocosmos se recibía en botes plásticos para coleccionar el agua que caía y así evitar inundar el sitio donde estaba el sistema, así que diariamente se les drenaba el agua para que volvieran a coleccionar de manera constante y diaria.

3.3 MUESTREO DE AGUA

Las muestras se recolectaban a la entrada y a la salida de cada humedal, utilizándose frascos de vidrio para el análisis de coliformes y frascos de plástico para los análisis químicos, previamente rotulados y lavados en etanol, así como en ácido, enjuagándolos con agua destilada y agua desionizada, respectivamente. Cuidando que los envases no tocaran las paredes para no contaminarlos todo esto utilizando guantes tanto para análisis fisicoquímicos, así como microbiológicos.

Se llevó a cabo el muestreo para fisicoquímicos una vez cada semana, por un periodo de 3 meses, en caso contrario los microbiológicos el tiempo que se ocupaba para estos fue de 2 veces al mes.

Las muestras coleccionadas fueron acomodadas en un cesto de plástico para ser llevadas al laboratorio de Ingeniería Ecológica y Bioquímica de Humedales, depositándolas en el refrigerador situado en esta área, para su posterior análisis en un periodo no mayor a 48 hrs.

3.4 ANÁLISIS DE AGUA

Para determinar la eficiencia de los mesocosmos, se tomó en consideración al afluente y efluente, con ello se realizaron los siguientes análisis bajo sus respectivos métodos como se observa en la Tabla 3.3, basándose en los estándares recomendados en APHA 1998 [62], así como los kits de reactivos analíticos

HACH®.

Tabla 3.3 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos para el agua.

		Referencia
<i>DQO</i>	Método 8000, Método de digestión de reactor	Método Estándar APHA, 1998.
<i>Amonio</i>	Método 8038, Método Nessler (0 a 2,50 mg/l NH ₃ -N)	Método Estándar APHA, 1998.
<i>Fosfatos</i> <i>Nitratos</i>	Cromatografía Iónica	M. E. Hernández-Alarcón y J. L. Marín-Muñiz, 2018. [63]
<i>Coliformes (Totales, Fecales y E. Coli)</i>	Método de filtrado de membrana	Método Estándar APHA, 1998

3.4.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Dicho método se fundamentó en calentar la muestra en un tiempo de 2 horas por medio de un digestor de reactor, con un agente oxidante potente, dicromato de potasio. Los compuestos orgánicos oxidables reaccionan, reduciendo el ion de dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) a un ion crómico verde (Cr^{3+}). El reactivo DQO también contiene iones de plata y de mercurio. La plata es un catalizador y el mercurio se utiliza para formar complejos de las interferencias de cloruro, Para que se hiciera una cuantificación por métodos espectrofotométricos, utilizando los kits de reactivos analíticos HACH®.

Los materiales que se usaron fueron:

- Tubos de ensaye
- Pipeta de vidrio de 10 mL
- Dispositivo de succión de Bomba de pipeta para 10 mL
- Micropipeta de 0.5- 5 μ L
- Puntas para micropipeta
- Gradilla

El proceso que se realizó se muestra en la Fig. 3.8 del anexo 1.

3.4.2 AMONIO

Esta técnica se fundamentó en el color, ya que se formó uno amarillo proporcional a la concentración de amoniaco, debido a que al usar el estabilizador mineral este formó complejos con la dureza en la muestra. El agente de dispersión de alcohol polivinílico mientras tanto ayudó a la formación del color en la reacción del reactivo Nessler con iones de amonio. El material utilizado es el siguiente (Tabla 3.4):

Tabla 3.4. Material de la técnica de Nitrógeno Amoniacal.

Material	Cantidad
<i>Falcón de 50 mL</i>	Pzas. necesarias
<i>estabilizador mineral</i>	3 gotas
<i>agente de dispersión de alcohol polivinílico</i>	3 gotas
<i>reactivo Nessler</i>	1 mL
<i>Micropipeta de 100-1000 µL</i>	1 pza.
<i>Puntas para micropipetas de 5 µL</i>	Pzas. Necesarias

El procedimiento fue el que se observa en la Fig. 3.9, del anexo 2.

3.4.3 NITRATOS Y FOSFATOS

Esta metodología tuvo sus bases en hacer pasar la muestra junto a una fase móvil a través de una columna llena de material absorbente, ya que, cada compuesto en la mezcla interactúa de manera diferente, lo cual provoca velocidades de flujo distintas, esto condujo a la separación de componentes a medida que salen de la columna, todo este funcionamiento estuvo conectado a un procesador digital y un software. Los compuestos separados se visualizan como picos con el número de picos correspondiente al número de componentes separados en la mezcla.

El proceso fue automatizado debido al cromatógrafo líquido, pero los pasos a seguir se describen en la Fig. 3.10 del anexo 3.

3.4.4 COLIFORMES (FECALES Y PRESENCIA DE E. COLI)

Este método tuvo como principio hacer pasar un volumen apropiado de la muestra problema a través de un filtro de membrana de un tamaño de 0.45 micras, donde

en la superficie de dicho filtro quedarán los microorganismos presentes en la muestra, es especialmente útil al evaluar grandes volúmenes de muestras o al realizar diariamente muchas pruebas de coliformes.

Para la realización de esta técnica se utilizaron los materiales descritos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Material de la técnica de Coliformes fecales.

Material	Cantidad
<i>Membranas de filtración de 0.45 micras</i>	Pzas. Necesarias.
Cajas Petri con medio de cultivo Chromocult sartorius.	Pzas. Necesarias.
Matraz Kitasato	1 pza.
Pinzas estériles	2 pzas.
Micropipeta de 0.5-5 µL	1 pza.
Micropipeta de 100-1000 µL	1 pza.
<i>Puntas para micropipetas de 5 µL</i>	Pzas. Necesarias.
<i>Puntas para micropipetas de 100 µL</i>	Pzas. Necesarias.
Envases esterilizados	Pzas. Necesarias.
Probeta graduada de 100 ml	1 pza.
<i>Puntas para micropipetas de 100 µL</i>	Pzas. Necesarias.
Alcohol	100 ml.
Agua destilada	6L.
Mecheros	2 pzas.

El procedimiento es el descrito en el diagrama de flujo que se muestra en la Fig. 3.11 del anexo 4.

3.5 PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Con los resultados de la cuantificación de los parámetros fisicoquímicos (DQO, $NH_3 - N$, NO_2^- , NO_3^- , $(SO_4)^{-2}$), así como los microbiológicos (Coliformes totales) del afluente (agua que ingresa) de igual manera que el efluente (agua que sale) de cada mesocosmo se empleó la ecuación 4:

$$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{(C \text{ afluente} - C \text{ efluente})}{C \text{ afluente}} \right) \times 100. \quad (4)$$

Donde: C representa la concentración del parámetro.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico seleccionado fue una ANOVA (Analysis of Variance) debido a que este tipo de método es empleado cuando el objetivo sea estudiar el comportamiento de una variable de respuesta (variable continua aleatoria) medida en condiciones definidas por diversos factores (variables de clasificación) [64].

Se optó por un-ANOVA de dos vías en este estudio, ya que, se deseaba analizar de manera simultánea el efecto de dos tratamientos diferentes (uno con plantas y sin plantas), de manera separada y encontrar si existía interacción entre ellos.

Para esto fue utilizado el software PAST, que es un software estadístico libre para el análisis de datos científicos con funciones de manipulación de datos, trazado, estadística uní y multi variante, series temporales y análisis espaciales.

FIXED-EFFECTS TWO-WAY ANOVA					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
TRH:	22003.2	1	22003.2	80.14	5.296E-13
Plantas:	14643.6	2	7321.82	26.67	3.25E-09
Interaction:	2173.55	2	1086.77	3.958	0.0238
Within:	18122.1	66	274.577		
Total:	56942.5	71			

Tanto el TRH como el tratamiento con plantas afecto significativamente la remocion de amonio

El % de remocion de amonio es significativamente mayor cuando tienes el tiempo de retención de 2 días comparado con el de 1 dia

la remocion de amonio fue significativamente mayor el los tramientos con plantas respecto al que no tiene plantas pero entre los generos de plantas utilizadas no hubo diferencias significativ

Fig. 3.12 Lectura del Software Past.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE
RESULTADO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL TRABAJO

En este apartado se muestran gráficamente los resultados obtenidos a lo largo de 9 semanas derivados de los análisis del afluente y efluente de los HC a escala de mesocosmos instalados en el invernadero de área de Ingeniería Ecológica, en el campus III del INECOL, con temperatura media de 24.36°C, en los cuales se empleó un TRH=1 día para 4 semanas con flujo de 7.4775 L/día y un TRH=2 días para las semanas restantes con flujo de 3.75 L/día, para el análisis estadístico de los datos obtenidos se utilizó el software PAST para un ANOVA de dos vías y determinar la influencia de dos factores los cuales fueron: el porcentaje de remoción de los tratamientos empleados y la eficacia de remoción entre especies.

4.1.1 AMONIO

4.1.1.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE NH_4^+

Durante las primeras cuatro semanas en las que los mesocosmos operaron con un TRH de 1 día, la concentración de amonio (NH_4) la entrada varía de 1.2 – 4.3 mg/L y cuando operó con un-TRH de 2 días, varió entre 4.4 - 6.7 mg/L (Fig. 4.1). A la salida de los mesocosmos en los tratamientos con plantas, la concentración varía de 0.1 - 1.9 mg/L cuando operó a un-TRH de 1 y 0.1 – 1.1 mg/L a un-TRH de 2 mientras que en los tratamientos sin plantas fue muy similar a la entrada en consideración al TRH =1, sin embargo, cuando se cambió el TRH a 2 hubo una disminución en la concentración que varió desde 0.3-2.9 mg/L.

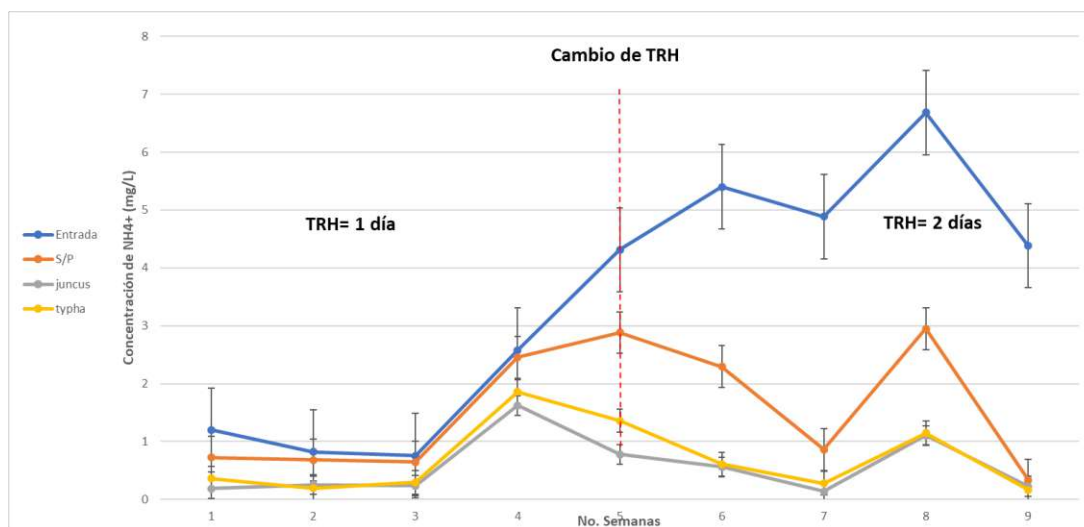


Fig. 4.1 Variación de concentración de amonio durante 9 semanas.

4.1.1.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE NH₄⁺

En relación con el análisis de varianza de dos vías, el tratamiento con plantas si tuvo un efecto significativo ($P= 3.2 \times 10^{-9}$) en la media del porcentaje de remoción de amonio, así como el TRH ($P= 5.296 \times 10^{-13}$) en la remoción del parámetro mencionado, ya que el % de remoción de amonio es significativamente mayor cuando el TRH= 2 a comparación con un-TRH=1.

El promedio de remoción de amonio en los HC a escala de mesocosmos (Fig. 4.2). Para el tratamiento sin plantas ($P=2.62 \times 10^{-7}$ y $P=2.52 \times 10^{-8}$) fue más baja (20-70%) en consideración a los tratamientos con plantas (60 -90 %) sin que existiera una diferencia significativa entre los géneros de plantas en estudio ($P=0.0238$).

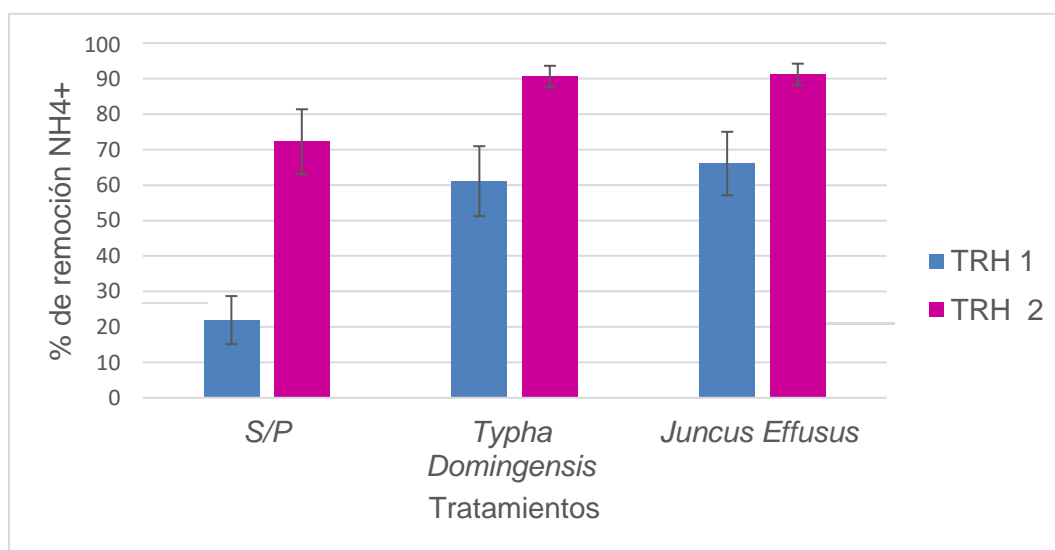


Fig. 4.2 Porcentaje de remoción de NH₄⁺.

4.1.2 DQO

4.1.2.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE DQO

Durante las cuatro semanas que operaron con un-TRH de 1 día, la concentración de DQO a la entrada del mesocosmos vario de 230-270 mg/L y cuando opero a un-TRH de 2 días, vario entre 170-270 mg/L (Fig. 4.3).

A la salida de los mesocosmos con plantas, la concentración varía de 50-180 mg/L cuando operó a un-TRH de 1 y 10- 180 mg/L a un-TRH de 2 mientras que en los tratamientos sin plantas fue muy similar a la entrada.

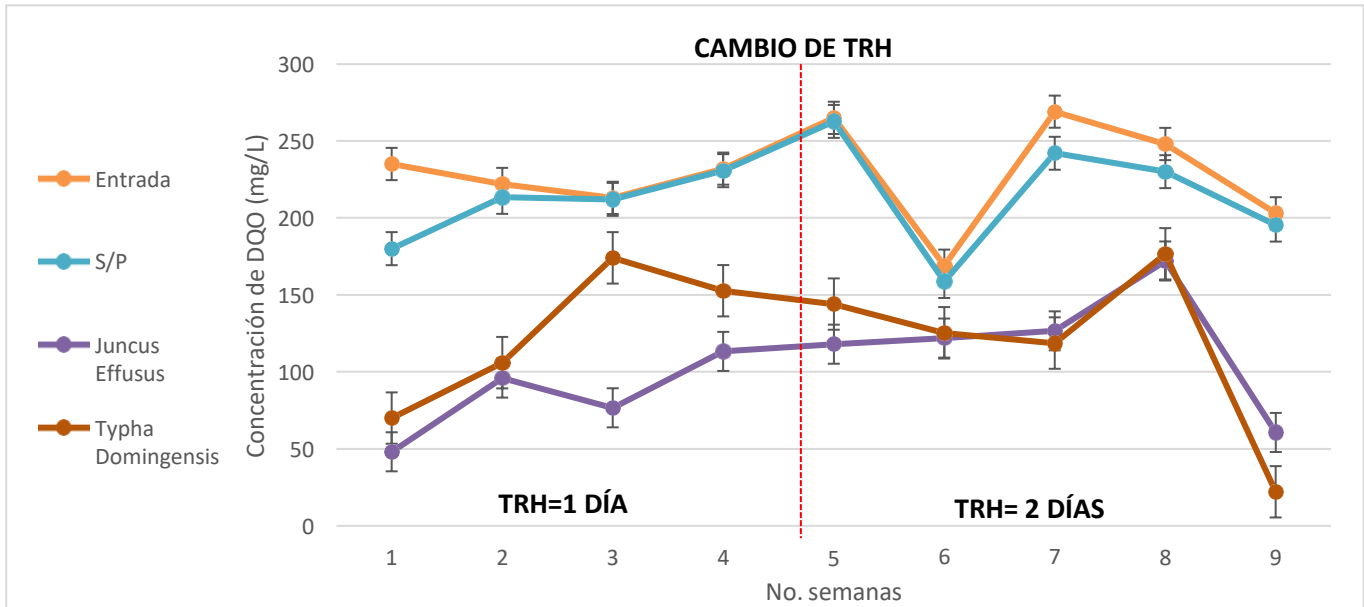


Fig. 4.3 Variación de concentración de DQO durante 9 semanas.

4.1.2.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE DQO

De acuerdo con el análisis de varianza de dos vías, el tratamiento con plantas si tuvo un efecto significativo ($P= 0.001914$) en el promedio de la remoción de DQO, pero el TRH, no afectó significativamente ($P=0.4732$) la remoción de este parámetro. El promedio de la remoción de DQO en los mesocosmos de HC (Fig. 4.4).

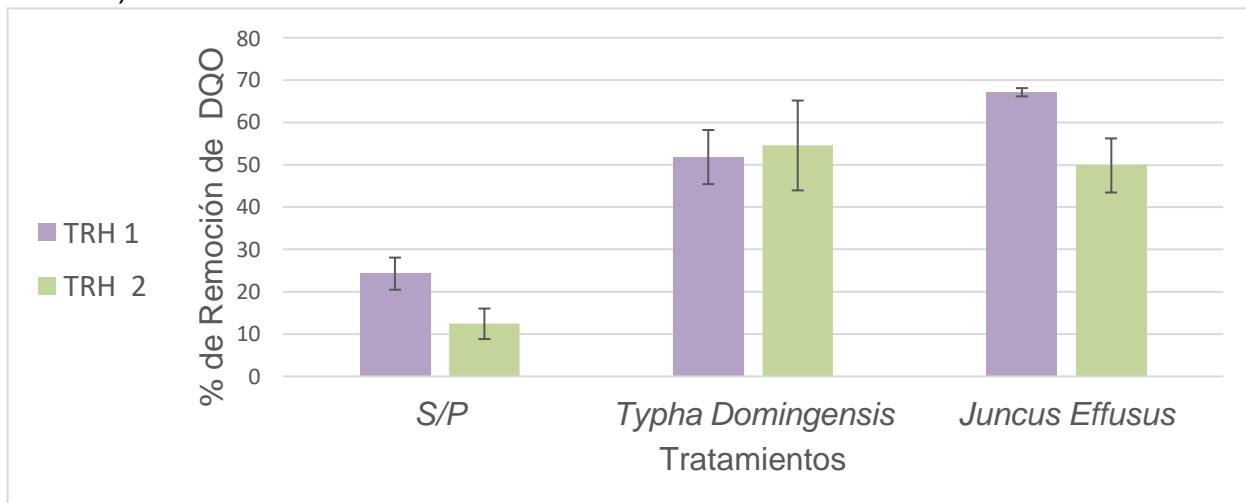


Fig. 4.4 Porcentaje de Remoción de DQO.

El promedio de la remoción de DQO en los tratamientos sin plantas fue significativamente ($P=0.00705$ y $P=0.00404$) más baja (10-25 %), que el % de remoción de DQO en los tratamientos con plantas (50-68 %) sin que hubiera diferencias entre los géneros de plantas estudiados ($P=0.6636$).

4.1.3 COLIFORMES FECALES

4.1.3.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES

Durante las dos semanas en la que los mesocosmos emplearon un TRH= 1, se puede apreciar que en la entrada varió de 5000 a 10000 NMP/100 mL, mientras que para un TRH= 2, hubo un incremento que varió desde 20000- 72000 NMP/100 mL (Fig. 4.5), para el caso de los tratamientos con plantas a la salida de los mesocosmos para un TRH=1 varió de 1000 a 4500 NMP/100 mL, mientras que para un TRH= 2 varió de 1000 a 5800 NMP/100 mL, en relación al tratamiento sin plantas se comportó de manera similar a la entrada, mostrando una variación de 1000 – 8000 para un TRH=1 y 20000- 25000 NMP/100 mL.

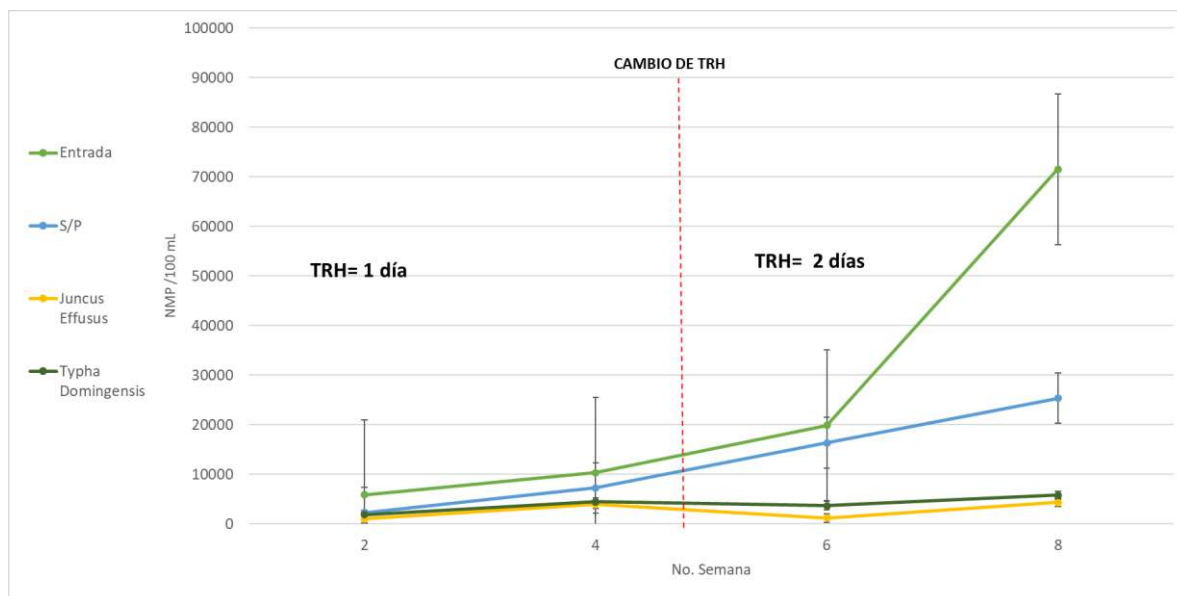


Fig. 4.5 Variación de concentración de Coliformes Fecales durante 9 semanas.

4.1.3.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES

En base al análisis de varianza de dos vías, el uso de tratamientos con vegetación si tuvo un efecto significativo ($P= 0.003457$) en la media de remoción de coliformes fecales, pero el TRH no influyó de manera significativa ($P= 0.164$) en la remoción de dicho parámetro. La media de remoción de coliformes fecales en los mesocosmos de HC (Fig. 4.6).

La media de la remoción de coliformes fecales en los tratamientos sin plantas fue significativamente ($P=0.01497$ y $P=0.004635$) más baja (60%) que el por ciento de remoción de coliformes fecales en tratamientos con plantas (79-95%) sin que hubiera diferencias entre los géneros estudiados ($P= 0.6454$).

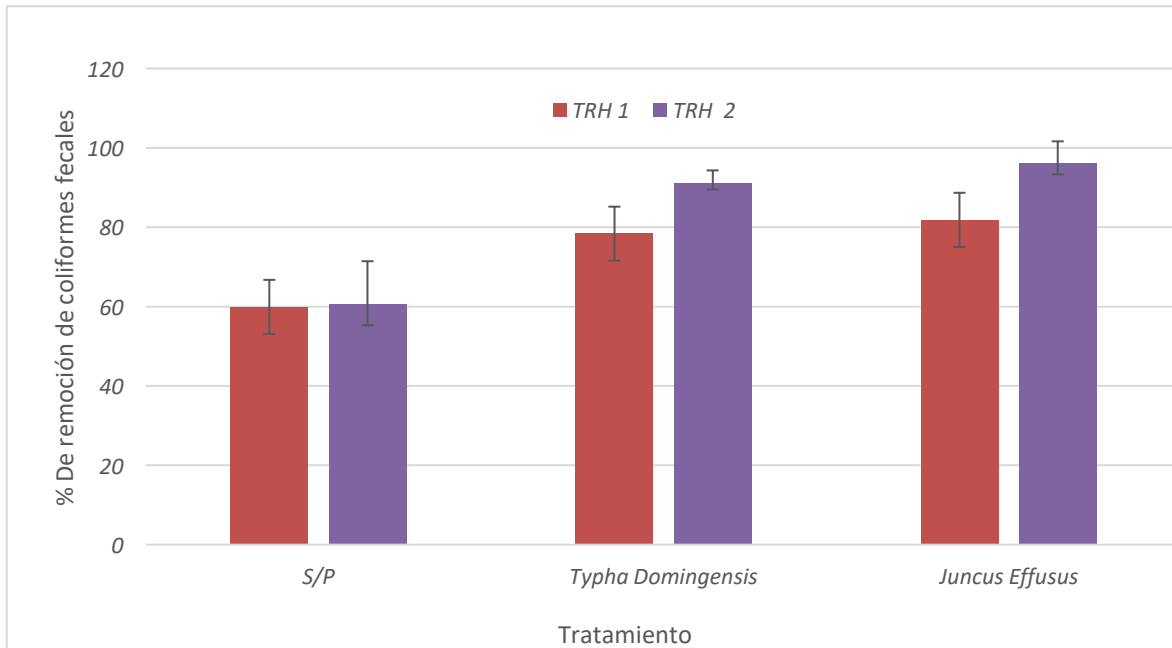


Fig. 4.6. Porcentaje de Remoción de Coliformes Fecales.

4.1.4 NITRATOS

4.1.4.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

En las primeras cuatro semanas empleando un TRH=1 se puede observar que la entrada varió de 2-13 mg/L, existiendo un incremento para un TRH=2, ya que varió de 4-21 mg/L (Fig. 4.7), mientras que a la salida de los mesocosmos con plantas para un TRH de 1 día varió entre 0-4 mg/L y en el caso de un TRH de 2 días fue de

0-7 mg/L, a diferencia del tratamiento sin plantas que para un TRH= 1 mostró una de 1.5 - 6 mg/L y para un TRH=2 fue de 5-13 mg/-L.

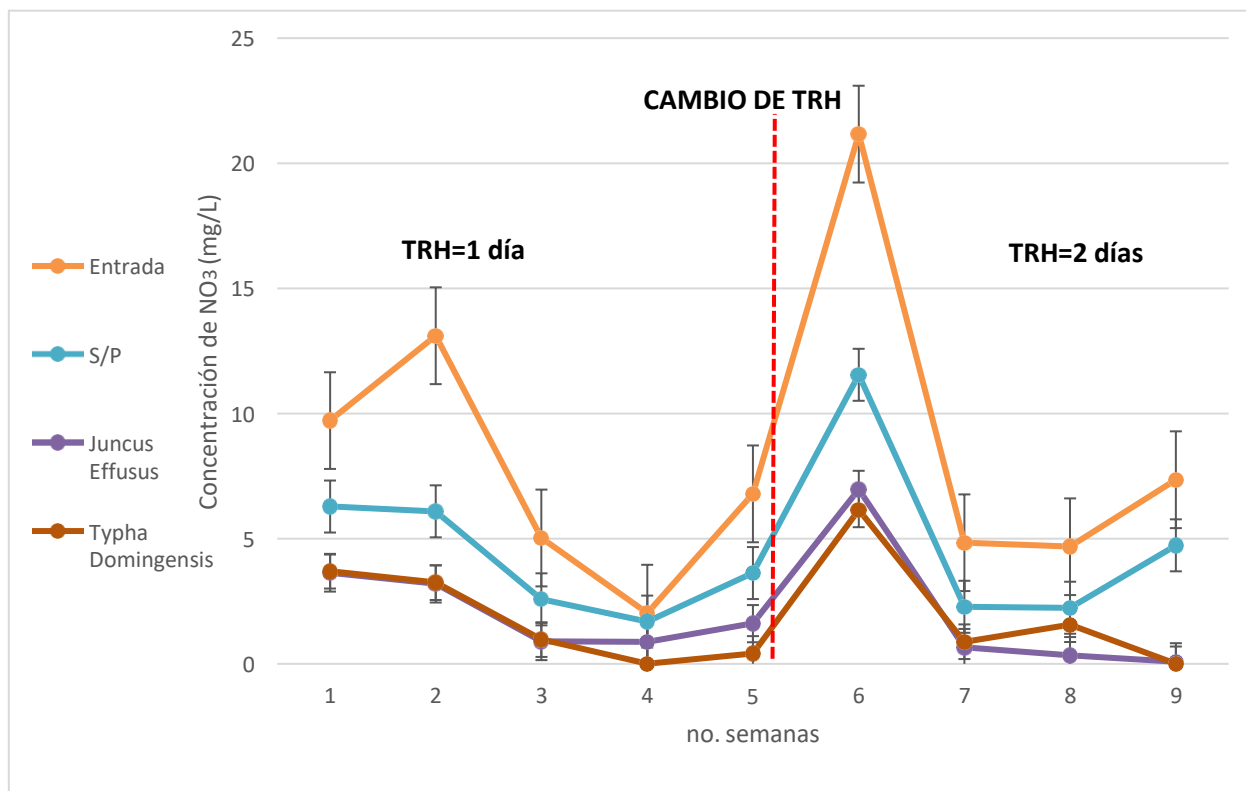


Fig. 4.7 Variación de concentración de Nitratos durante 9 semanas.

4.1.4.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE NITRATOS

Con relación al análisis de varianza de dos vías, el tratamiento con plantas si tuvo un efecto significativo ($P= 5.581 \times 10^{-14}$) en el promedio de la remoción de nitratos (NO_3), pero el TRH, no afecto significativamente ($P=0.4534$) la remoción de este parámetro. El promedio de la remoción de nitratos en los mesocosmos de HC (Fig. 4.8). El promedio de la remoción de nitratos en los tratamientos sin plantas fue significativamente ($P=0$ y $P=3.829 \times 10^{-11}$ más baja (45-47 %), que el % de remoción de nitratos en los tratamientos con plantas (74-86 %) sin que hubiera diferencias entre los géneros de plantas estudiados ($P=0.09859$).

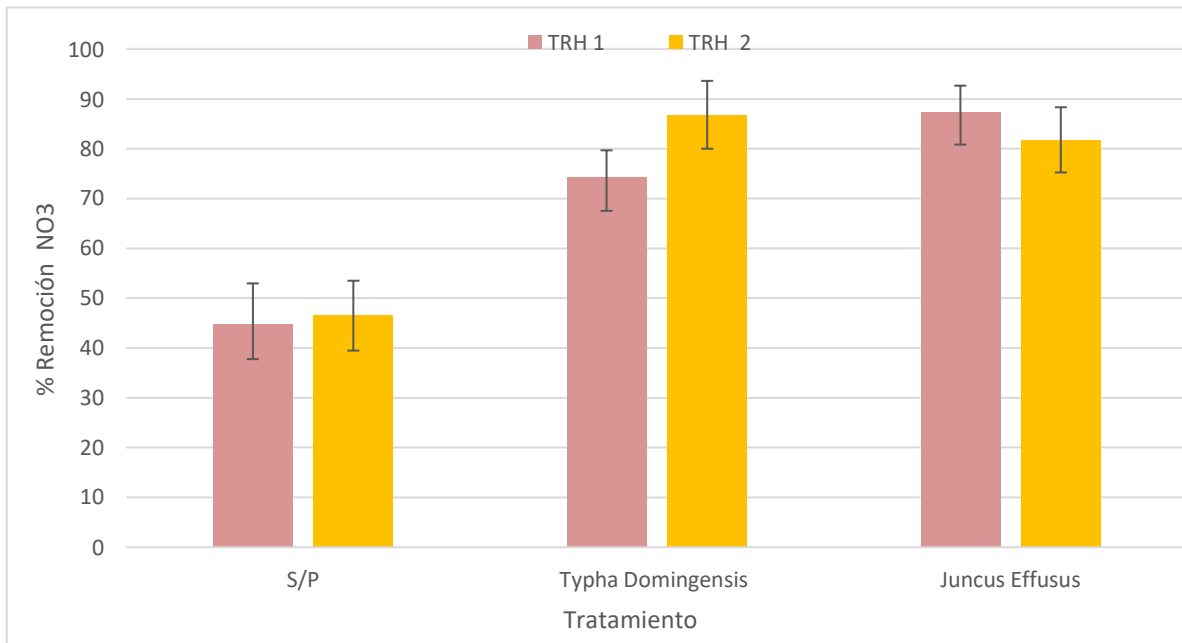


Fig. 4.8 Porcentaje de Remoción de Nitratos.

4.1.5 SULFATOS

4.1.5.1 VARIACIONES TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS

Cuando se empleó un-TRH=1 se puede observar que la entrada varió de 19-59 mg/L, existiendo un incremento para un-TRH=2, ya que, varió de 2-85 mg/L (Fig. 4.9), mientras que a la salida de los tratamientos con plantas para un-TRH de 1 día varió entre 9-22 mg/L y en el caso de un-TRH de 2 días fue de 11-35 mg/L, a diferencia del tratamiento sin plantas que para un-TRH= 1 mostró una de 10-31 mg/L y para un-TRH=2 fue de 18-42 mg/L.

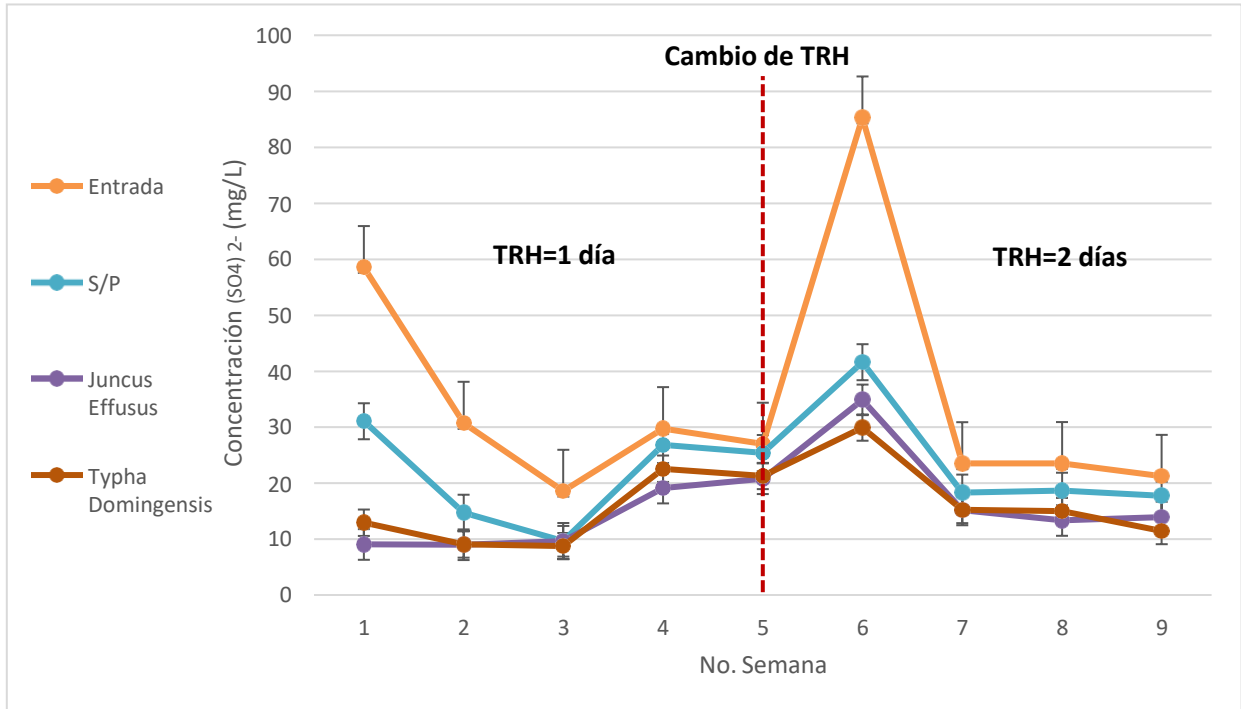


Fig. 4.9 Variación de concentración de Sulfatos durante 9 semanas.

4.1.5.2 EFECTO DE LA VEGETACIÓN Y TRH SOBRE LA REMOCIÓN DE SULFATOS

De acuerdo con el análisis de varianza de dos vías, en el tratamiento con plantas si tuvo un efecto significativo ($P= 0.01271$) en el promedio de la remoción de sulfatos (SO_4)²⁻, pero el TRH, no afecto significativamente ($P=0.4225$) la remoción de este parámetro. El promedio de la remoción de sulfatos en los mesocosmos de HC (Fig. 4.10). El promedio de la remoción de (SO_4)²⁻, en los tratamientos sin plantas fue significativamente ($P=0.02661$ y $P=0.02766$) más baja (33-39 %), que él % de remoción de (SO_4)²⁻, en los tratamientos con plantas (44-50 %) sin que hubiera diferencias entre los géneros de plantas estudiados ($P=0.9314$).

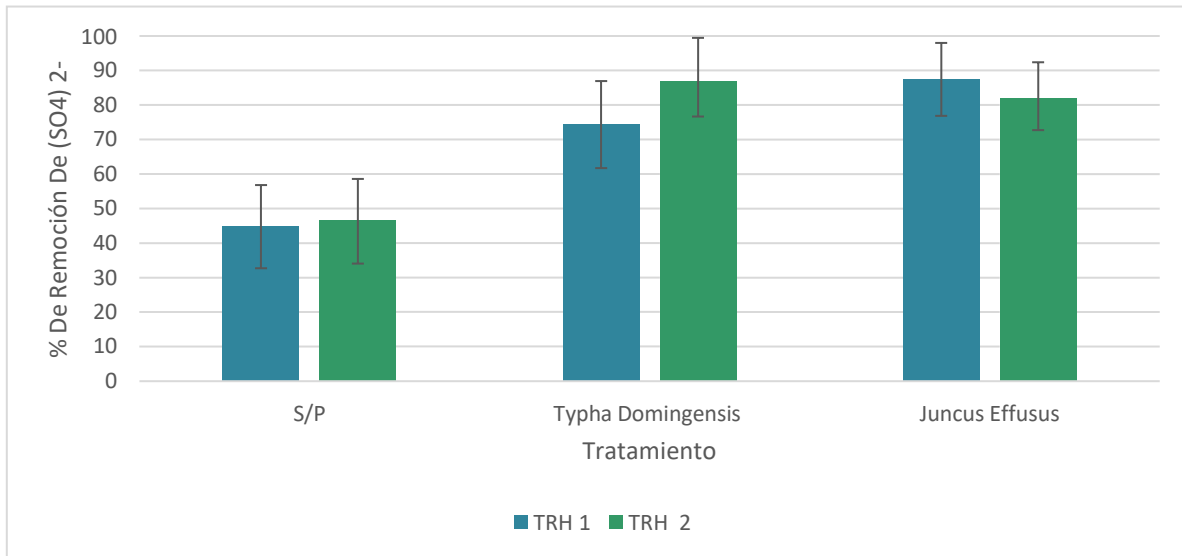


Fig. 4.10 Porcentaje de Remoción de Sulfatos.

4.1.6 BIOMASA

4.1.6.1 PESO SECO DE BIOMASA AÉREA

De acuerdo con el análisis de varianza de dos vías, el peso seco aéreo fue significativamente diferente ($P= 0.005412$) entre las dos especies estudiadas. El peso seco promedio de la biomasa aérea en los mesocosmos de HC (Fig. 4.11). Siendo typha domingensis significativamente más pesada (41 gr), que el peso seco de juncus Effusus (2 gr.)

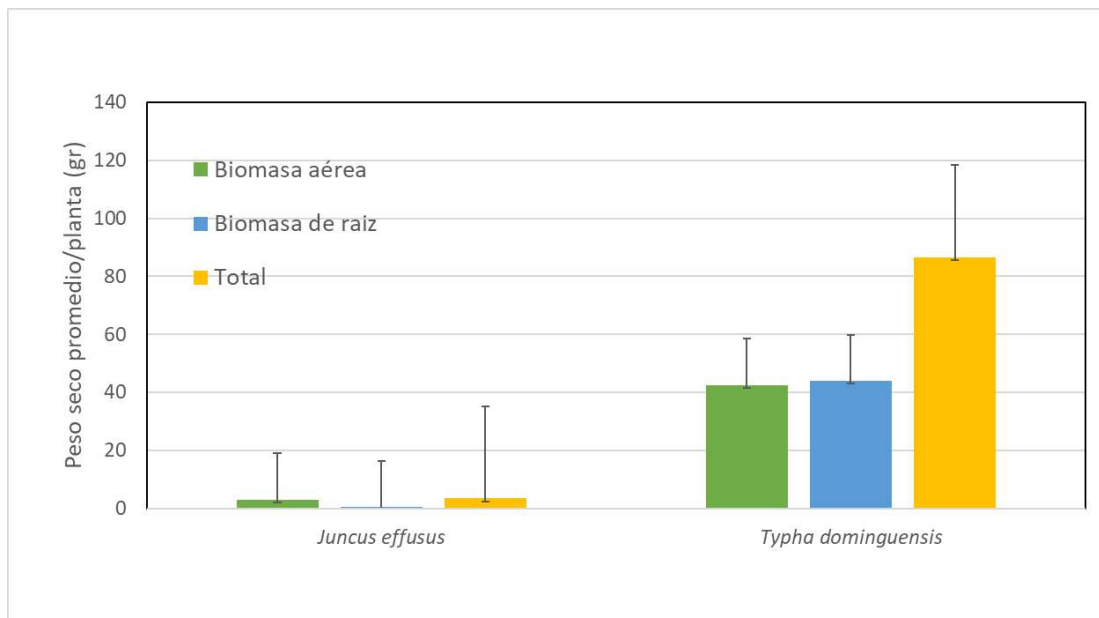


Fig. 4.11 Comparativa de peso seco promedio/planta.

4.1.6.2 PESO SECO BIOMASA DE RAÍZ

En relación con el análisis de varianza de dos vías, el peso seco de raíz fue significativamente diferente ($P= 0.001704$) entre las dos especies estudiadas. El peso seco promedio de la biomasa de raíz en los mesocosmos (Fig. 4.11). Siendo *Juncus Effusus* más baja (0.5 gr), que el peso seco de *typha domingensis* (43 gr.)

4.2 RESULTADOS

Este proyecto tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de tratamiento en escorrentías urbanas a través de humedales construidos; con parámetros de diseño específicos como lo fueron las especies y el TRH, para demostrar cómo es reducida la carga de nutrientes por medio de distinta vegetación y flujo de agua.

Para la elaboración de este sistema hidráulico se implementó un sistema similar a lo hecho por Guo et al. (2019), empleando un sistema de humedales construidos con 9 combinaciones donde se tomaron como referencia algunos parámetros establecidos por el autor ya mencionado, como lo son, la profundidad, el diseño de entrada y salida del sistema, el caudal, espacio entre plantas las especies elegidas y el TRH.

En comparación con investigaciones similares (Wu et al (2018), Qi et al. (2022), Fan et al. (2021)), en este estudio se empleó el uso de macrófitas emergentes (*Typha domingensis* y *Juncus effusus*) para el tratamiento de escorrentías urbanas en caso contrario a lo planteado por Sandoval et al. (2016) se optó por cultivar de manera individual a las especies seleccionadas, demostrando que, esta vegetación es eficaz para conseguir un rango de remoción del 53- 93 % sin importar la especie aplicable, ya que, no cuentan con diferencias significativas entre sí en el análisis estadístico, además que, como estos autores mencionan el uso de plantas emergentes afecta de manera positiva al sistema de humedales, ya que actúan como fuentes de carbono debido al desprendimiento de hojarasca y/o poda de la vegetación a utilizar, esto propicia un aumento de la materia orgánica degradada, lo

cual ayuda a los microorganismos presentes en el sitio a proliferarse y llevar a cabo procesos de degradación de contaminantes.

Según Chen et al. (2020) otro factor a tomar en cuenta es la temperatura, debido a que, al disminuir esta, hay un aumento de contaminantes en el afluente, lo cual hace que los procesos de degradación sean más lentos y con un índice de degradación menor, ya que la microbiota presente, puede inhibirse derivado de este fenómeno, lo cual se representa en las gráficas de concentración del capítulo IV, en la semana 6-8 donde hubo un aumento de amonio y una disminución de nitratos.

Con base a los resultados obtenidos con relación a la concentración se obtuvo que, para el caso de Nitratos, DQO, Coliformes Fecales, Amonio y Sulfatos cuando se emplea un-TRH= 1 día los comportamientos son constantes entre la entrada y un tratamiento sin plantas, mientras que los tratamientos con plantas disminuyen de manera constante, pero al pasar a un-TRH= 2 días existe una disminución en la concentración.

En el caso del efecto de la vegetación y el TRH en el porcentaje de remoción se comportó como se aprecia en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Comportamiento de la Vegetación.

Factor	Sin plantas	Tratamiento con plantas
<i>Amonio</i>	20-70%	60-90%
<i>DQO</i>	10-25%	50-68%
<i>Coliformes Fecales</i>	60%	79-95%
<i>Nitratos</i>	45-47%	74-86%
<i>Sulfatos</i>	33-39%	44-50%

Con base a el ANOVA realizado, el comportamiento de la vegetación en los tratamientos probados, afectó de manera significativa. En relación a el control, es importante destacar que la disminución de la carga de nutrientes pudo deberse a la naturaleza del sustrato.

Al comparar a las especies empleadas en este trabajo de investigación, estadísticamente se comprobó que no hubo diferencias significativas entre estas, es decir ambas mostraron una actividad similar. Cabe señalar que al aumentar los tiempos de retención de 1 a 2 días se obtuvieron mayores tasas de remoción como lo muestra la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Comportamiento del % de remoción y TRH.

Factor	Tratamiento	TRH=1 día	TRH=2 días
Amonio	S/P	20%	72%
	plantas	60%	90%
DQO	S/P	12%	25%
	plantas	53%	60%
Coliformes Fecales	S/P	59%	60%
	plantas	80%	93%
Nitratos	S/P	45%	48%
	plantas	80%	83%
Sulfatos	S/P	41%	44%
	plantas	76%	82%

De acuerdo con el análisis de peso seco (promedio)/ planta (gr), como era de esperarse; La biomasa tanto aérea como de raíz fue significativamente diferente, ya que, en el caso de *Typha domingensis* es más pesada que *juncus effusus* (Fig. 4.11, en el capítulo IV). Sumando así una relación de 82-gr para *Typha domingensis* y 2.5 gr para *Juncus effusus*.

4.3 CONCLUSIONES

1. El uso de humedales construidos a escala de mesocosmos es propicio para tratar aguas residuales pluviales y escorrentías urbanas,
2. La vegetación, y el TRH tienen influencia en la remoción de contaminantes.
3. Emplear macrófitas emergentes en humedales construidos en Xalapa es adecuado debido a que estas plantas se adaptan de manera rápida al medio y al sustrato, además que son reproducibles en condiciones controladas.
4. La biomasa de las especies aumentó siendo *typha domingensis* la que mayor peso generó tanto en follaje como de raíz.
5. El uso de *Typha domingensis* y *Juncus effusus* brinda porcentajes de remoción en distintos factores del 50% hasta 95 % logrando altas tasas de remoción.
6. El % de remoción del control es significativamente más bajo a los tratamientos con plantas, debido a que solo contiene sustrato y aunque en algunos parámetros presenta una ligera disminución de contaminantes, esto no es suficiente para obtener tasas altas de remoción.
7. Al comparar a las especies entre sí, estadísticamente, se puede comprobar que no hay diferencias significativas entre ellas.
8. En este proyecto un-TRH= 2 días resultó más eficiente en relación a los porcentajes de remoción que fueron de 60-95%.

4.4 RECOMENDACIONES

- La implementación de este modelo de humedal en otras zonas del país va a depender de la geografía del terreno, el cual dictará la forma general y configuración del humedal; la temperatura del lugar va de acuerdo con la estación, así en invierno la altura de los humedales generalmente tiene que ser incrementada para almacenar más calor en la columna de agua; la disponibilidad de las plantas para evitar la necesidad de aclimatación.
- Los datos de campo provenientes de los modelos matemáticos analizados para los sistemas de agua superficial servirán para comprobar el modelo propuesto.
- El uso de plantas nativas debe hacerse con cuidado cuando se recolectan, ya que, pueden generarles estrés y hacer que estas mueran. También cuando se establecen en los contenedores hay que plantar algunos individuos de más, para tener suficiente material biológico para el trabajo experimental.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. M.E. Hernández. Ecological engineering for controlling water pollution in Latin America En: Ecological Dimensions for Sustainable Socio-Economic Development. A., Y. Arancibia, R D Sotelo, J.W. Day, y E. Reyes, (Ed.) ISBN: 978-1-84564-756-8. WIT Press UK. 2013.
2. J. Vymazal. Removal of nutrients in diverse types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*:48-45.2007.
3. S.T. Magwaza, L.S. Magwaza, A.O. Odindo, A. Mditshwa. Hydroponic technology as decentralized system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *Science of the Total Environment* 698:134154, 2020.
4. Organización de las Naciones Unidas (ONU). *Wastewater Management, A UN-Water Analytical Brief*. Editions UN-Water, 2015.
5. R. Arcos, E. Cantellano, M. Alejo, R. García & R. Solís. Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Sta. María Nativitas Texcoco edo. De México. Facultad de estudios superiores, 1999.
6. I. Rodríguez. *Guía Virtual Nueva Cultura del Agua. Fundación Nueva Cultura del Agua*, 2013. Consultado en <https://fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/el-agua-en-el-medio-urbano/diseño-urbano-sensible-al-agua?&imprimir=1>.
7. J. Choi, F.K.F. Geronimo, B. Park, J. Hong, L. H. Kim. Formulation of design guidelines for the cost-effectiveness of constructed wetlands in improving water quality. *Desalination and Water Treatment* 101:108-115,2018.
8. J. N. Carleton, et al. Performance of a constructed wetlands in treating urban stormwater runoff. In: *Water Environment Research*, Vol. 72, pp. 295-304. 2000.
9. M. Scholz and B. Lee. Constructed wetlands: a review. In: *International journal of environmental studies*, Vol. 62, pp. 421-447, 2005.
10. L. Londoño, y C. Marín. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en Humedales Artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Escuela de Tecnología Química, 2009.
11. X. Chen, P. Luo, F. Liu, S. Zhang, H. Li, R. Xiao, & J. Wu. Cold temperature increases nitrate accumulation in pilot-scale surface flow constructed wetlands with high rates of nitrogen removal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 308(107250), 107250. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107250>, 2021.
12. Y. Qi, D., Xiuting, G. Yumei, L. Jianwen, Z., Xiaoliang, C. Chen, Z. Dehua. Increasing chemical oxygen demand and nitrogen removal efficiencies of surface-flow constructed wetlands in macrophyte-dominant seasons by adding artificial macrophytes., *Bioresource technology*, 348(126755), p. 126755. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126755>, 2022.
13. L.C. Sandoval-Herazo, J.L. Marín-Muñiz, A. Alvarado-Lassman, R., Castelán

- Cabaña, D. Ramírez López. Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver., Congreso Interdisciplinario de Ingenierías 2395-9649. 1. 43, 2016.
14. C. Fan, S. He, S. Wu, y J. Huang, "Improved denitrification in surface flow constructed wetland planted with calamus", *J. Clean. Prod.*, vol. 291, núm. 125944, p. 125944, 2021.
 15. S. Wu et al., "Enhancement of nitrogen removal via addition of cattail litter in surface flow constructed wetland", *J. Clean. Prod.*, vol. 204, pp. 205–211, 2018.
 16. C., Guo et al. "Improved test to determine design parameters for optimization of free surface flow constructed wetlands", *Bioresource technology*, 280, pp. 199–212. Doi: 10.1016/j.biortech.2019.02.020, 2019.
 17. Ramsar, Designación de sitios Ramsar: Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4a edición, vol. 17. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza), 2010.
 18. J.M. Fariña, y A. Camacho. Humedales costeros de Chile. Aportes científicos a su gestión sustentable. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile, 2012.
 19. Decreto N° 771 de 1981. Promulga la Convención sobre zonas húmedas de importancia internacional especialmente como hábitat de las aves acuáticas, suscrito en Irán el 2 de febrero de 1971. Ministerio de Relaciones Exteriores. Disponible en: <http://bcn.cl/21lq4> (agosto 2017).
 20. M. M. Brinson, "KEDDY, PAUL A. 2000. Wetland ecology: Principles and conservation. Cambridge University Press, xiv 1 614 p. US\$52.95, paper. ISBN 0-521-78367-4", *Limnol. Oceanogr.*, vol. 46, núm. 6, pp. 1581–1581, 2001.
 21. "Report of the 31st session of GESAMP, 2001", *GESAMP*. [En línea]. Disponible en: <http://www.gesamp.org/publications/report-of-the-31st-session>. [Consultado: 24-oct-2023].
 22. F. Arreguín Cortés y A. Martín Domínguez, "Desalinización del agua", 2000.
 23. L. Bravo-Inclán, P. Saldaña, J. Dávila & M. Carro. La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo. 10.13140/2.1.3336.7843, 2013.
 24. G. Langergraber y E. Muellegger, "Ecological Sanitation—a way to solve global sanitation problems?", *Environ. Int.*, vol. 31, núm. 3, pp. 433–444, 2005.
 25. M. P. Valencia Rojas y A. Figueroa Casas, "Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis", *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 14, núm. 26, pp. 29–42, 2015.
 26. E.J. Olguin, G. Sánchez-Galván, T., Pérez-Pérez y A. Pérez-Orozco. Surface adsorption, intracellular accumulation, and compartmentalization of Pb (II) in batch operated lagoons with *Salvinia minima* as affected by environmental conditions, EDTA and nutrients. *J. Ind. Microbial. Biot.* 32,

- 577–586, 2005.
27. S. Oakley, Preliminary Treatment and Primary Sedimentation, Michigan: UNESCO, 2018.
 28. A. R. Clemente, E. L. Chica Arrieta, y G. A. Peñuela Mesa, “Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes”, 2013.
 29. C. Morelli. Basic Principles of Water Treatment. Littleton, Colorado: Tall Oaks, 1996.
 30. “The World Health Report 1997--conquering suffering, enriching humanity”, World Health Forum, vol. 18, núm. 3–4, 1997.
 31. USEPA, Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, 1988.
 32. O. Arias. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial Universidad Politécnica de Cataluña, Madrid, España, 2004.
 33. A. Stefanakis. Introduction to Constructed Wetland Technology. 10.1002/9781119268376.ch0, 2018.
 34. M.D. Curt. Fito depuración en humedales. Conceptos generales, en: Fernández, J. (Ed.), Manual de Fito depuración. Filtros de macrófitas en flotación. EDITAN obra social, Fundación Global Nature, Universidad Politécnica de Madrid y Ayuntamiento de Lorca, Madrid, pp. 61-77., 2005.
 35. A. Lahora, Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería), 2002.
 36. A. Urzelai, et al., Potencial de fitorremediación de especies vegetales. Tratamiento de suelos contaminados con metales. LABEIN, centro tecnológico. Junio 2001.
 37. US – EPA. United States, Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. Office of Water Washington, D.C, 2000.
 38. J. García, A. Corzo. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, 2008.
 39. P., Kolb. Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit Zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur, 1998.
 40. R. Crites, G. Tchobanoglou. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Mc. Graw Hill, Santa fe de Bogotá, 2000.
 41. F. Zurita & M.T. Alarcón-Herrera. Humedales de Tratamiento: Alternativa de Saneamiento de Aguas Residuales Aplicable en América Latina. Registro Público: 03-2016-101013195800-01. México, pág., 105-121, 2016.
 42. N. Skoulikidis, Th, N. Pavlineri, and V. A. Tsihrintzis, “Constructed Floating Wetlands: state-of-the-art and potential application in a Greek fluvial ecosystem,” Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας, pp. 2010– 2013, 2015.

43. D. Q. Zhang, K. B. S. N. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, W. J. Ng, and S. K. Tan, "Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries - A review of recent developments (2000-2013)," *Journal of Environmental Management*, vol. 141. Academic Press, pp. 116–131, Aug-2014.
44. M. Wang, D. Q. Zhang, J. W. Dong, and S. K. Tan, "Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review," *Journal of Environmental Sciences (China)*, vol. 57. Chinese Academy of Sciences, pp. 293–311, Jul-2017.
45. L.M. Manzo, L.B. Epele, C.N. Horak, A.M. Kutschker, M.L. Miserendino, Engineered ponds as environmental and ecological solutions in the urban water cycle: A case study in Patagonia, *Ecological Engineering*, volume 154105915, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105915.2020>.
46. R. Kadlec, H. W. Bastiacens, & D. T. Urban. «Hydrological design of free water Surface treatment wetlands». In G. Moshiri (ed). *Constructed wetlands for water quality improvement*; Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp. 77-86, 1993.
47. O. Delgadillo; A. Camacho; L. Pérez & M., Andrade. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)*, 2010.
48. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, Centa, (2004). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. CNA. *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2004. CNA. México. 2004. SEMARNAT. Programa Anual de Trabajo 2005. Prioridades y metas. Sector Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. México. 2005
49. R. Miglio. *Sistema de tratamiento de aguas residuales con el uso de plantas acuáticas*, Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, Lima, Perú, 2003.
50. OPS, OMS. *Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades, sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de humedales artificiales*. Santa Fe de Bogotá, noviembre de 1999. (Centro nacional del agua "CENAGUA" Societé québécoise d'assainissement des eaux).
51. J. González. *Humedales artificiales para depuración*, 2010. Disponible en [http://www.cienciasmarinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%206.pdf]
52. B. Heywood. *Taxonomía vegetal*. Editorial Alhambra. Madrid, España. 1968.
53. G. C. Rzedowski, J. Rzedowski et al. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a. ed., 1a reimp., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro (Michoacán), 1406 pp, 2005.
54. L. Watson y M. Dallwitz. *The families of flowering plants: descriptions, illustrations, and information retrieval*. Version: 19 August 1999.
55. R. Pezeshki, R. DeLaune, H. Kludze, H. Choi. *Photosynthetic and growth responses of cattail (Typha domingensis) and sawgrass (Cladium*

- jamaicense) to soil redox conditions. *Aquatic Botany* 54: 25-35,1996.
56. CONABIO. Catálogo taxonómico de especies de México. 1. In Capital Nat. México. CONABIO, México City, 2009.
 57. E. L. Menéndez, "Autoatención de los padecimientos y algunos imaginarios antropológicos", [Org.mx. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/pdf/desacatos/n58/2448-5144-desacatos-58-104.pdf](https://www.scielo.org.mx/pdf/desacatos/n58/2448-5144-desacatos-58-104.pdf).
 58. J. Lara. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1999.
 59. INEGI. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Xalapa, Veracruz de Ignacio de la Llave. 2009. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30087.pdf
 60. J. L. Marín-Muñiz, "Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Por Medio De Humedales Artificiales Establecidos En El Municipio De Actopan, Veracruz, México", *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 15, núm. 2, pp. 553–563, 2016.
 61. A. Ramírez. *Ecología aplicada. Diseño y análisis estadístico*, Bogotá D.C: Fundación Universitaria de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. p. 325, 1999.
 62. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC.1998.
 63. M. E. Hernández-Alarcón y J. L. Marín-Muñiz, "Greenhouse gas emissions and treatment performance in constructed wetlands with ornamental plants: Case studies in Veracruz, Mexico", en *Artificial or Constructed Wetlands*, 1st Edition., Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2018]: CRC Press, 2018, pp. 163–177.
 64. J. Dagnino. *Análisis de varianza* *Revista Chilena de Anestesia*. Sociedad de Anestesiología de Chile. 2015. Disponible en: <https://revistachilenadeanestesia.cl/analisis-de-varianza/>

ANEXO 1

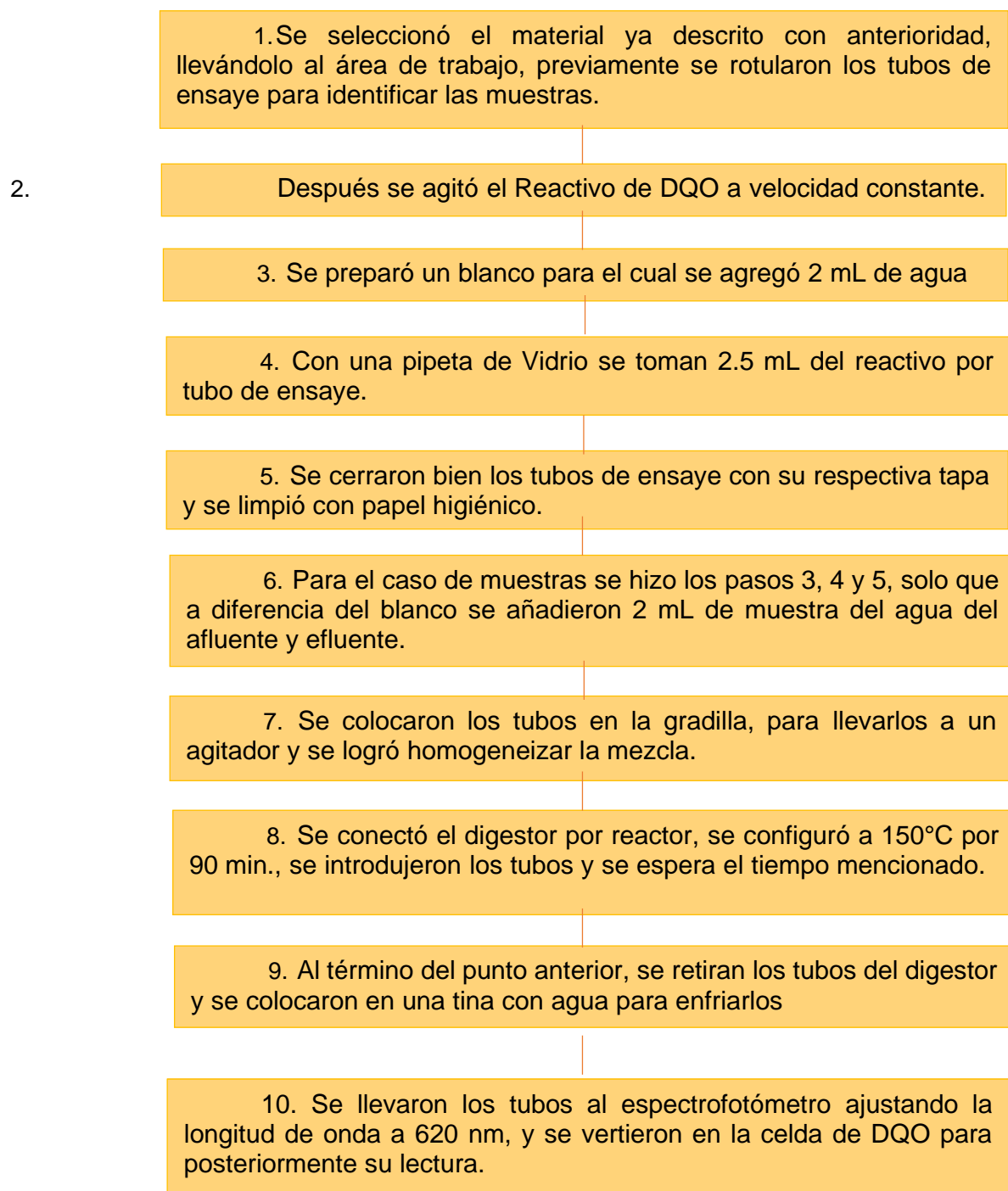


Fig. 3.8. Proceso del método de la Demanda Química de Oxígeno.

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 2

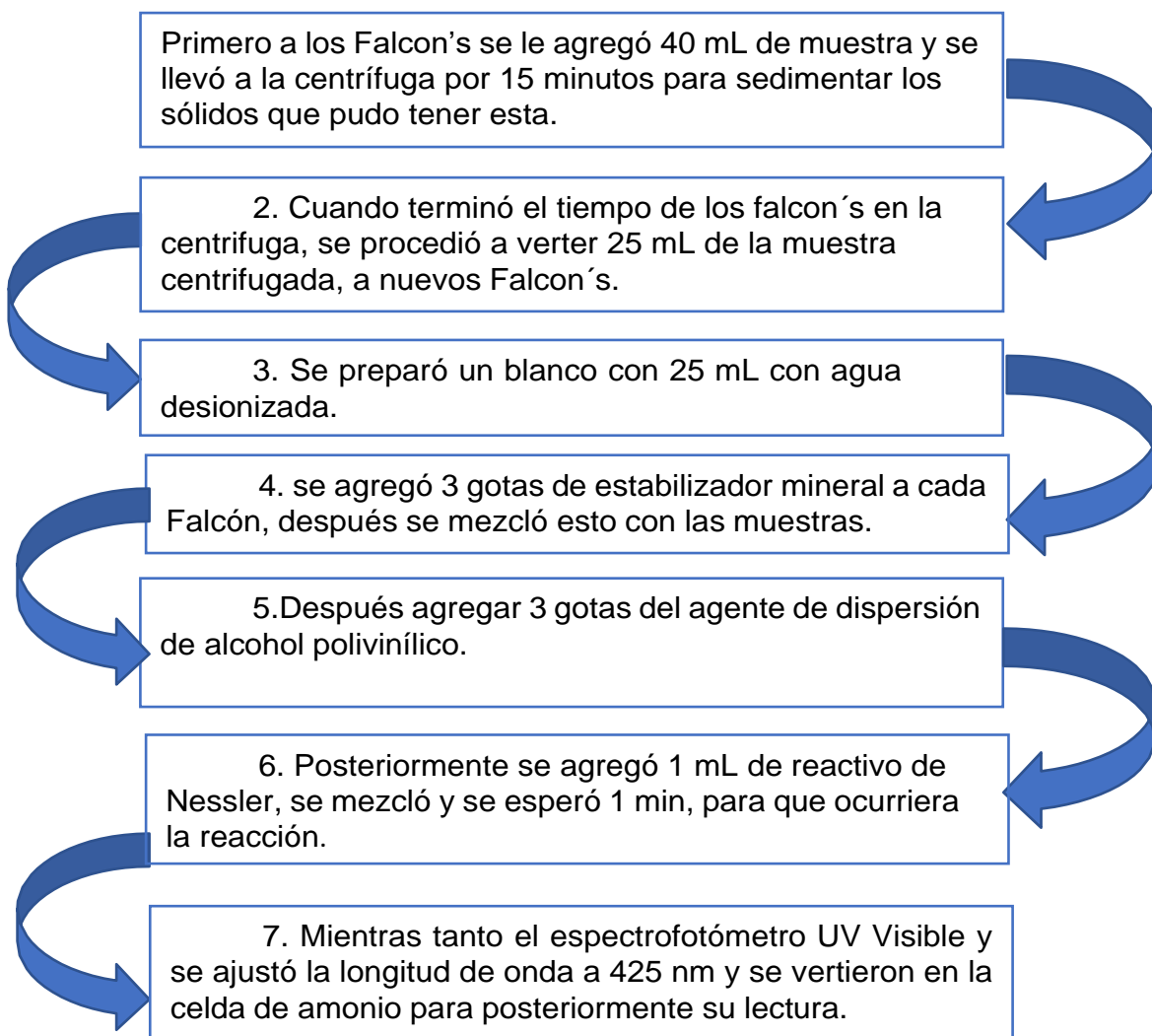


Fig. 3.9. Proceso del método de Nitrógeno Amoniacal.

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 3

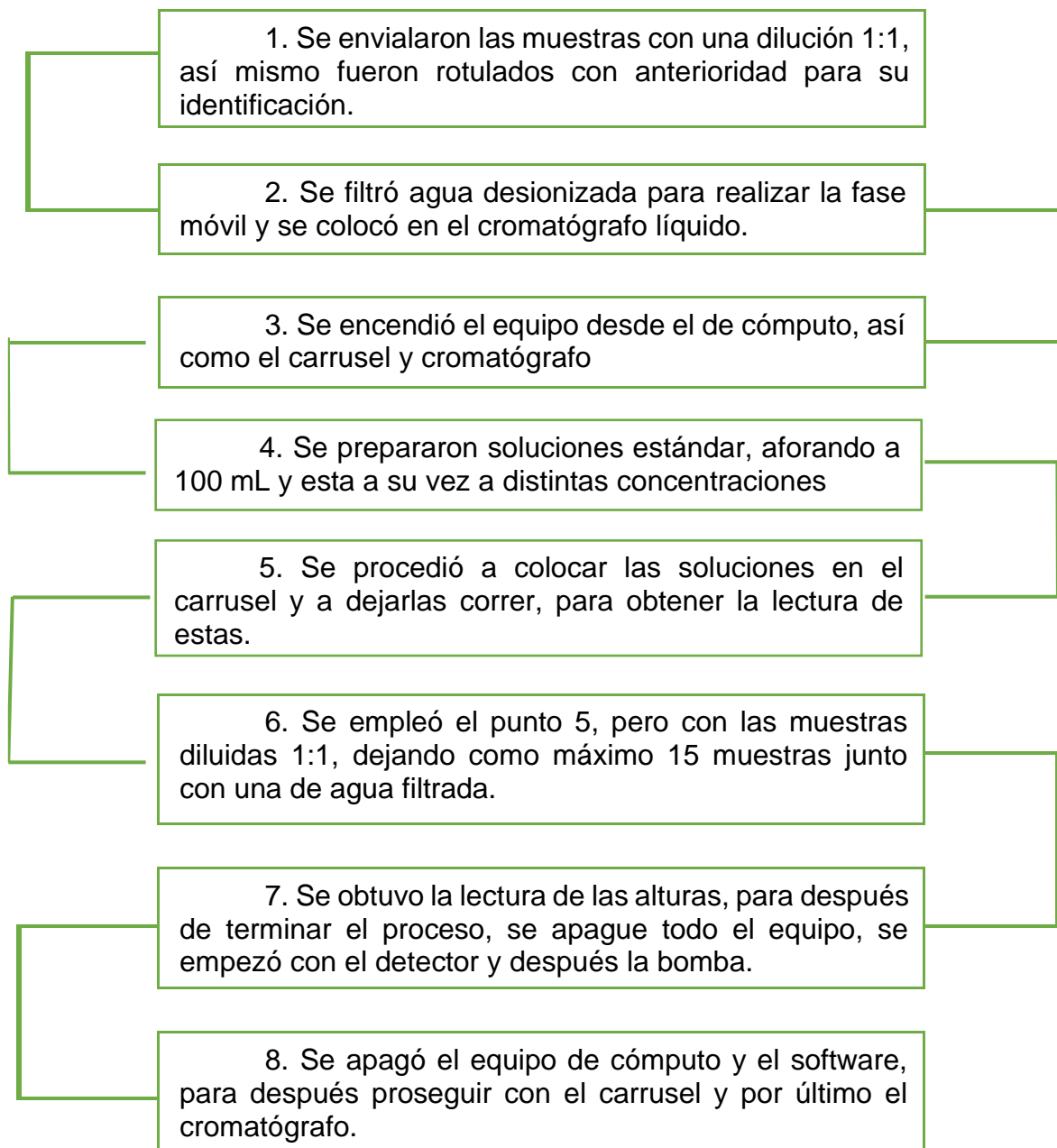


Fig. 3.10. Proceso del método de cromatografía líquida.
Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 4

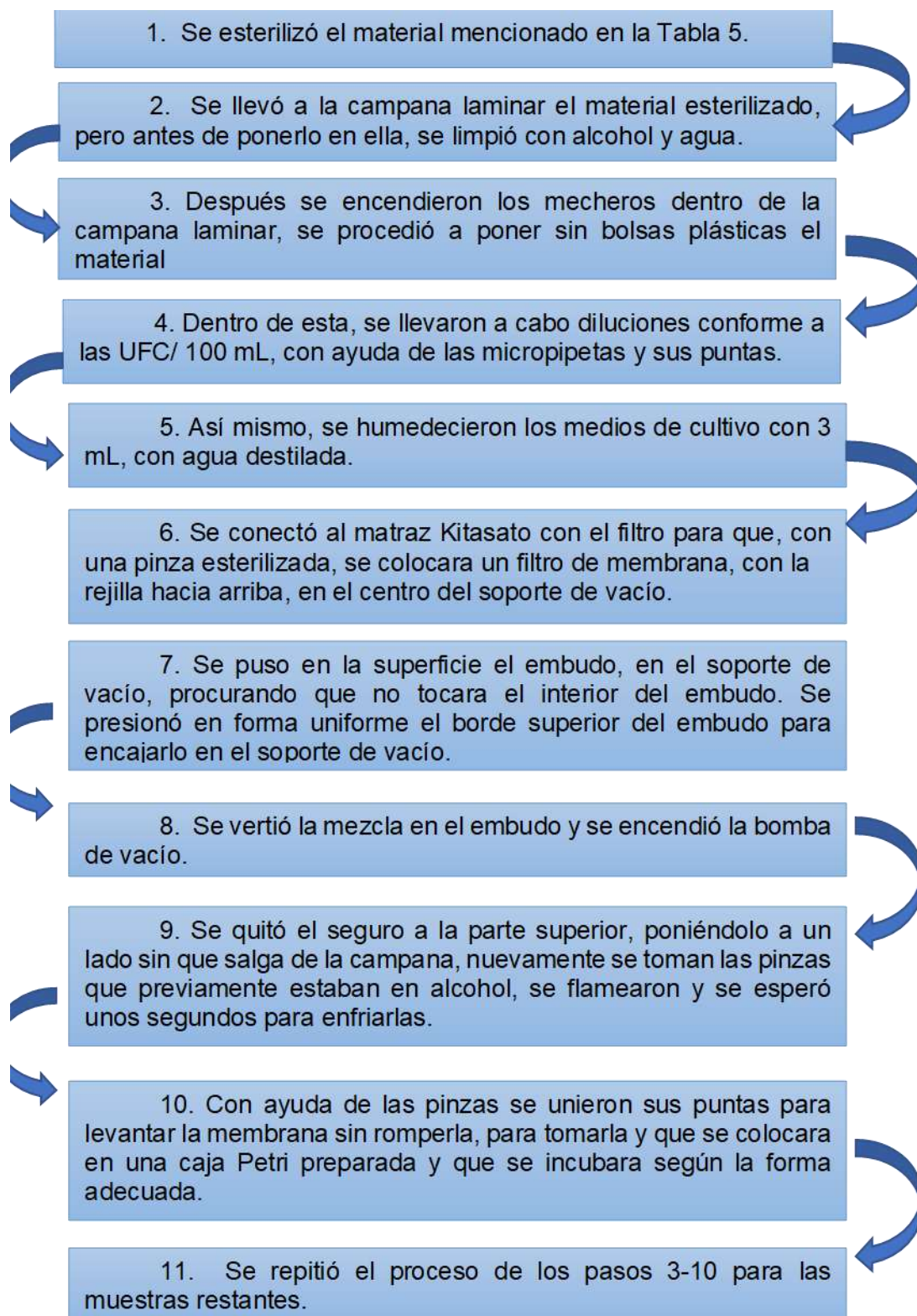


Fig. 3.11. Proceso del método de filtración por membrana mediante el medio de cultivo Chromocult sartorius.

Fuente: Elaboración Propia.