



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS
POR MEDIO DE HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS
EN YUCATÁN”**

TESIS

PRESENTADO POR:

ING. MARCO ANTONIO HERNÁNDEZ CARDONA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

Agradezco el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por medio de la beca que me fue otorgada para la realización de mis estudios de la Maestría en Ingeniería Opción Ambiental, la cual concluye con el desarrollo del presente trabajo de tesis.

RESUMEN

Una de las mayores causas de contaminación del agua subterránea en el Estado de Yucatán, México, es la descarga de aguas residuales domésticas al acuífero sin un adecuado proceso de tratamiento. En esta región, se utiliza mayormente un sistema primario de tratamiento denominado fosa séptica, el cual no es un proceso adecuado para eliminar los contaminantes a niveles por debajo de los límites establecidos en la legislación. En este estudio, se planteó y evaluó la aplicación de un sistema de humedales artificiales híbridos como solución a dicho problema. El sistema consistió en una fosa séptica que alimenta 3 humedales artificiales híbridos, cada uno compuesto por un humedal de flujo subsuperficial horizontal seguido de un humedal de flujo subsuperficial vertical. En los primeros dos sistemas se utilizaron las especies de plantas *Sagittaria lancifolia* y *Typha dominguensis*, respectivamente, y el tercero se dejó sin plantas para utilizarlo como control. El sistema se operó en modo batch, evaluando los tiempos de permanencia de 2 y 4 días. Las especies de plantas se aclimataron adecuadamente al sistema, lo cual se demostró a través de la medición de la altura de planta y porcentaje de cobertura; obteniendo valores mayores al 80% de la altura inicial y mayores al 85% de la cobertura total, para ambas especies. La especie *Sagittaria lancifolia* no se había estudiado antes en la región y resultó ser adecuada para la aplicación de este tipo de sistemas. Los sistemas de humedales artificiales híbridos cumplieron con su objetivo de eliminación de materia orgánica (más del 95% de remoción de la demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, y carbono orgánico total en los tres sistemas), nutrientes (más del 65% del nitrógeno total y más del 80% de fosfatos en los humedales con plantas) y de eliminación de patógenos (más del 99.99% de remoción de coliformes totales y *E. coli* en los tres sistemas). No hubo diferencias significativas entre los 3 sistemas, excepto en la concentración final de nitrógeno en forma de nitratos, la cual fue mayor en el sistema de control, y la remoción de fosfatos, la cual fue mayor en los humedales con plantas. Lo anterior prueba la influencia de las plantas en el desempeño de los humedales. El tiempo de permanencia óptimo fue el de 4 días ya que cumplió adecuadamente con los objetivos de eliminación de materia orgánica, nutrientes y

patógenos, generando una menor cantidad de nitrógeno en forma de nitratos en el efluente final, al compararlo con el tiempo de permanencia de 2 días.

ABSTRACT

One of the main sources of groundwater pollution in the State of Yucatan, Mexico, is the insufficient treatment of domestic wastewater, which is being discharged into the aquifer mainly after primary treatment in septic tanks. In this study, the performance of a hybrid constructed wetlands system for domestic wastewater treatment was evaluated. The system consisted of a septic tank that fed 3 hybrid constructed wetlands, each composed of a horizontal subsurface flow followed by a vertical subsurface flow constructed wetland. In the first and second hybrid wetlands, the plant species *Typha Dominguensis* and *Sagittaria lancifolia* were used, respectively, while the third one was left without vegetation for control. The plants achieved an adequate acclimatization to the system, measured by the plant height (increased of more than 80% of the initial height) and coverage percentage (increased of more than 85% of the wetland surface coverage). The species *Sagittaria lancifolia* had not been studied before for its application in the region and proved to be adequate for this type of systems. The system was operated in batch mode, using contact times of 2 and 4 days. The results showed that the hybrid constructed wetlands were very effective in the removal of organic matter (more than 95% removal of chemical oxygen demand, biological oxygen demand and total organic carbon in the 3 systems), nutrients (more than 65% of total nitrogen and 80% of phosphates in the systems with plants) and pathogens (99.99% removal of total coliforms and *E. coli* in the 3 systems). There were no significant differences between the 3 hybrid systems, except in the final concentration of nitrogen in the form of nitrates, that was higher on the control, and the removal of phosphates, that was higher in the wetlands with plants. The previous shows the plants influence in the constructed wetlands performance. The optimum contact time was 4 days, as it achieved the objectives of organic matter, nutrients and pathogens removal, generating a lower concentration of nitrogen in the form of nitrates in the final effluent, when compared to the contact time of 2 days.

CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	5
CAPÍTULO II	6
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	6
2.1 DEFINICIÓN DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	7
2.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	7
2.2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	9
2.2.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	12
2.2.4 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	13
2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	14
2.3.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR O PRETRATAMIENTO	14
2.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO	15
2.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO	15
2.3.4 TRATAMIENTO TERCIARIO	16
CAPÍTULO III	17
HUMEDALES ARTIFICIALES	17
3.1 DEFINICIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL	17
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	18
3.2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	19
3.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	20
3.3.1 VEGETACIÓN	20

3.3.2 SUSTRATO	22
3.3.3 MICROORGANISMOS.....	23
3.3.4 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN EL AFLUENTE	24
3.3.5 RECOLECCIÓN DEL EFLUENTE	25
3.4 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES	26
3.4.1 SÓLIDOS.....	26
3.4.2 MATERIA ORGÁNICA.....	26
3.4.3 NITRÓGENO.....	27
3.4.4 FÓSFORO	28
3.4.5 PATÓGENOS	29
3.5 DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES	30
3.5.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR.....	30
3.5.2 DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	30
3.6 EFICIENCIA DEL SISTEMA.....	32
3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	35
3.7.1 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES	36
3.7.2 MÉTODOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES	37
3.8 ESTADO DEL ARTE	38
3.8.1 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN EL MUNDO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	39
3.8.2 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN MÉXICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	41
3.8.3 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN LA REGIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	42

CAPÍTULO IV	44
METODOLOGÍA.....	44
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS .	44
4.1.1 UBICACIÓN DEL SISTEMA	44
4.1.2 CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	44
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	48
4.3 PLANTACIÓN Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN	49
4.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA	51
4.5 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN ...	53
4.6 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA	54
4.7 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	56
CAPÍTULO V	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	57
5.2 CRECIMIENTO Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN	58
5.2.1 ALTURA DE LA PLANTA	58
5.3 DESEMPEÑO DEL SISTEMA.....	62
5.3.1 DESEMPEÑO DEL TANQUE SÉPTICO.....	62
5.3.2 REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO	63
5.3.3 REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO	70
5.3.4 REMOCIÓN DE SÓLIDOS EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO.....	81
5.3.5 REMOCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDOS	86
5.3.6 DESEMPEÑO DEL SISTEMA EN COMPARACIÓN CON NORMATIVIDAD VIGENTE	91
5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	92

5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DISCUSIÓN	95
CAPÍTULO VI	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características Físicas del Agua Residual (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010)	7
Tabla 2 Constituyentes Químicos Del Agua Residual.....	9
Tabla 3 Constituyentes Biológicos del Agua Residual	12
Tabla 4 Características típicas del agua residual doméstica bruta (Metcalf & Eddy, 1985)....	13
Tabla 5 Principales Procesos de Tratamiento Preliminar	14
Tabla 6 Principales Procesos de Tratamiento primario.....	15
Tabla 7 Principales Procesos de Tratamiento Secundario.....	15
Tabla 8 Principales Procesos de Tratamiento Terciario.....	16
Tabla 9 Vegetación utilizada en estudios con humedales artificiales	21
Tabla 10. Límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para agua de consumo	33
Tabla 11. Límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga de agua residual	33
Tabla 12 Parámetros Fisicoquímicos y Biológicos a Determinar en Aguas Residuales.....	48
Tabla 13 Esquema de Riego de los Humedales en el Período de Aclimatación	50
Tabla 14 Parámetros de Operación del Sistema.....	52
Tabla 15 Frecuencia de Análisis de Parámetros Fisicoquímicos	54
Tabla 16 Resultados Generales de la Campaña de Caracterización del Agua Residual.....	57
Tabla 17 Crecimiento de Plantas en Humedales Horizontales y Verticales	59
Tabla 18 Porcentaje de Cobertura: Saggitaria lancifolia	60
Tabla 19 Porcentaje de Cobertura: Typha dominguensis.....	61
Tabla 20 Desempeño del Tanque Séptico	63

Tabla 21 Resultados del Monitoreo de la Materia Orgánica en los Sistemas de Humedales Híbridos: Tiempo de Permanencia de 2 días.....	64
Tabla 22 Resultados del Monitoreo de la Materia Orgánica en los Sistemas de Humedales Híbridos: Tiempo de Permanencia de 4 días.....	64
Tabla 23 Porcentajes de Remoción de Materia Orgánica alcanzados con el tiempo de permanencia de 2 días	65
Tabla 24 Porcentajes de Remoción de Materia Orgánica alcanzados con el tiempo de permanencia de 4 días	65
Tabla 25 Resultados del Monitoreo de Nutrientes en el Sistema de Humedales Híbrido: Tiempo de Permanencia 2 días (F=Fosa, H= Horizontal, V=Vertical)	70
Tabla 26 Resultados del Monitoreo de Nutrientes en el Sistema de Humedales Híbrido: Tiempo de Permanencia 4 días.....	70
Tabla 27 Porcentajes de Remoción de Nutrientes: Tiempo de permanencia 2 días	71
Tabla 28 Porcentajes de Remoción de Nutrientes: Tiempo de permanencia 4 días	71
Tabla 29 Concentraciones de Nitrógeno Total y Porcentajes de Remoción	76
Tabla 30 Resultados del Monitoreo del PO ₄	77
Tabla 31 Resultados del Monitoreo de Sólidos: tiempo de permanencia de 2 días.....	81
Tabla 32 Resultados del Monitoreo de Sólidos: tiempo de permanencia de 4 días.....	81
Tabla 33 Porcentajes de Remoción de Sólidos: Tiempo de permanencia de 2 días	82
Tabla 34 Porcentajes de Remoción de Sólidos: Tiempo de permanencia de 4 días	82
Tabla 35 Resultados del Monitoreo de Microorganismos Patógenos: Tiempo de Residencia 2 días	87
Tabla 36 Resultados del Monitoreo de Microorganismos Patógenos: Tiempo de Residencia 4 días	87
Tabla 37 Remoción en unidades logarítmicas alcanzada en el tiempo de permanencia de 2 días para patógenos	88
Tabla 38 Remoción en unidades logarítmicas alcanzada en el tiempo de permanencia de 4 días para patógenos	88
Tabla 39 Límites Permisibles (Proyecto de Modificación NOM-001-SEMARNAT-1996)	92
Tabla 40 Evapotranspiración promedio en el Sistema de Humedales Híbrido	94
Tabla 41 Coeficientes de Cultivo (Kc).....	94
Tabla 42 Resultados del Análisis ANOVA Multifactorial	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Disposición de Aguas Residuales en Mérida (SEDUMA,2014)	4
Figura 2 Clasificación de los Sólidos en el Agua Residual.....	8
Figura 3 Ejemplo de Estructuras de Distribución en el Afluente para Humedales Horizontales (EPA,2000)	25
Figura 4 Ejemplo de Estructuras de Distribución en el Afluente para Humedales Verticales (ONU,2008)	25
Figura 5 Metodología del Estudio	44
Figura 6 HSSFH Vistas: a) Planta b) Lateral c) Delantera d) Trasera	45
Figura 7 HSSFV Vistas: a) Planta b) Lateral c) Delantera d) Trasera	45
Figura 8 Diagrama del Sistema y Sentido del Flujo	46
Figura 9 Distribución del Medio de Soporte en el HSSFH.....	47
Figura 10 Distribución del Medio de Soporte en el HSSFV.....	47
Figura 11 División de los humedales en cuadrantes	50
Figura 12 Florecimiento de la especie <i>Sagittaria lancifolia</i>	59
Figura 13 Evolución de la Cobertura en el Humedal Horizontal: <i>Sagittaria lancifolia</i>	60
Figura 14 Evolución de la Cobertura en el Humedal Vertical: <i>Sagittaria lancifolia</i>	60
Figura 15 Evolución de la Cobertura en el Humedal Horizontal: <i>Typha dominguensis</i>	61
Figura 16 Evolución de la Cobertura en el Humedal Vertical: <i>Typha dominguensis</i>	61
Figura 17 Remoción de DQO en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)	66
Figura 18 Remoción de DQO en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)	67
Figura 19 Remoción de COT en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)	68
Figura 20 Remoción de NKT en el sistema de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)	73
Figura 21 Remoción de NH ₄ en el sistema de Humedales Artificiales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical).....	74
Figura 22 Comportamiento de NO ₃ en el Sistema de Humedales Artificiales Híbrido	75
Figura 23 Balance de Nitrógeno para el tiempo de permanencia de 2 días.....	76
Figura 24 Balance de Nitrógeno para el tiempo de permanencia de 4 días.....	77

Figura 25 Remoción del PO ₄ en el sistema de humedales artificiales híbrido	78
Figura 26 Remoción de ST en los sistemas de humedales artificiales Híbridos.....	83
Figura 27 Remoción de SST en los sistemas de humedales artificiales híbridos.....	84
Figura 28 Comportamiento de los SDT en los sistemas de humedales artificiales híbridos...	85
Figura 29 Remoción de CT en los sistemas de humedales artificiales híbridos	89
Figura 30 Remoción de E. coli en sistemas de humedales artificiales híbridos.....	90
Figura 31 Evapotranspiración en Humedales Horizontales y Estimada (mm)	93
Figura 32 Evapotranspiración en Humedales Verticales y Estimada (mm)	94

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se da a conocer el contexto en el que se llevó a cabo el estudio, se presenta la problemática que se tiene en el Estado de Yucatán, en cuanto a contaminación del agua subterránea y el ineficiente tratamiento del agua residual doméstica se refiere, y con ello se justifica la aplicación de los humedales artificiales híbridos para solucionarla de una manera eficaz. A su vez, se presentan los objetivos del estudio.

1.1 ANTECEDENTES

El agua es un recurso parcialmente renovable, que forma parte esencial para el desarrollo de cualquier nación. Es el compuesto químico más abundante del planeta y es indispensable para el desarrollo de la vida (Aguilar et al. 2009). La disponibilidad que se tiene de este recurso se ha ido mermando paulatinamente debido a la contaminación por diversos medios, tanto de las aguas superficiales como subterráneas, lo cual provoca un desequilibrio ambiental, económico y social.

En todo el mundo, especialmente en países en vías de desarrollo, altos niveles de contaminantes son descargados debido al desequilibrado crecimiento y una investigación inadecuada en infraestructura de tratamiento de agua residual. Los métodos convencionales de tratamiento se están quedando limitados para encarar las nuevas condiciones ambientales, así como para cumplir con las nuevas legislaciones que son cada vez más estrictas (Haiming et al. 2015).

En la actualidad se buscan nuevas estrategias que permitan obtener procesos de tratamiento de aguas residuales que causen un menor impacto ambiental. Esto se ha intentado realizar por medio de la utilización de procesos naturales que logren igualar o superar la eficacia de los procesos tradicionales a bajo costo. Un ejemplo de estas tecnologías verdes es la aplicación de sistemas de humedales artificiales para tratamiento de agua residual.

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de plantas macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de estas plantas produce una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo et al. 2010). Estos sistemas se han utilizado para el tratamiento de distintos tipos de residuos como:

- Aguas residuales domésticas
- Aguas residuales industriales
- Lixivados
- Metales pesados
- Hidrocarburos

En México, se han realizado estudios con humedales artificiales para el tratamiento de distintos tipos de agua residual, con objetivos variados. Torres et al. (2014) construyeron en Jalisco tres sistemas de humedales híbridos, el primero con un humedal de flujo subsuperficial seguido por una laguna de estabilización, el segundo con un humedal horizontal seguido de uno vertical y el tercero con un humedal vertical seguido de uno horizontal, con el objetivo de remover nitrógeno en el agua residual generada en el Centro Universitario de la Ciénega, utilizando la especie vegetal *Canna indica*; concluyendo que los sistemas híbridos son muy eficientes para la nitrificación y remoción de nitrógeno amoniacal, sin embargo, la remoción de nitrógeno total fue baja debido a que se presentó una baja tasa de denitrificación.

Particularmente en el estado de Yucatán, Tapia et al. (2009) evaluaron el funcionamiento de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales de granjas porcícolas, utilizando la especie de planta *Typha latifolia* y un medio de soporte de grava, obteniendo como resultados para un tiempo de contacto de 3 días del 64-78% de remoción de sólidos suspendidos (SS), 52-78% de remoción de demanda química de oxígeno (DQO), 57-74% de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 57-79% de remoción de nitrógeno total, 63-75% de remoción de nitrógeno amoniacal, 70-81% de remoción de nitratos, 0-28% de fósforo total y 3.3-4.2 unidades logarítmicas de coliformes totales. García (2007), en un estudio

desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UADY, utilizó una serie de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de agua residual doméstica, concluyendo que el tiempo de operación del humedal, la presencia de plantas y el tamaño de la partícula del medio de soporte son variables que intervienen directamente en la eficiencia de remoción de contaminantes.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La disposición de aguas residuales está íntimamente ligada a la calidad del agua para consumo humano. El uso excesivo, la falta de saneamiento, los efectos de las obras y los procesos productivos que se realizan, alteran el ciclo de agua, evitan su renovación natural y ponen en riesgo a todos los componentes del sistema hidrológico, con afectaciones a los recursos naturales, muchas veces irreversibles (SEDUMA, 2014)

El crecimiento de la población ha hecho que la demanda de agua potable aumente, por lo que la cantidad de agua residual generada también incrementa. Estas descargas generalmente van a cuerpos de agua como ríos, lagos o mares, o directo al subsuelo. Se estima que en el mundo se descargan en promedio entre 131 y 486 L/Habitante/día (Yuan et al. 2015). Muchas veces las aguas residuales se vierten en estos cuerpos sin un tratamiento previo adecuado. El acelerado crecimiento urbano de las ciudades más pobladas del Estado de Yucatán amenaza con invadir los campos de pozos de abasto de agua potable, por lo cual el agua residual doméstica se ha convertido en un foco importante de contaminación (SEDUMA, 2014).

En el estado de Yucatán, se obtiene el agua necesaria para realizar todo tipo de actividades del acuífero. Sin embargo, las características geológicas de la región (como el subsuelo cárstico y la alta permeabilidad) permiten que los contaminantes penetren fácilmente en el acuífero (Villasuso y Méndez, 2000). Una de las causas de la contaminación de origen antropogénico ha sido el tratamiento inadecuado de las aguas residuales domésticas, ya que muy pocas viviendas cuentan con algún sistema de tratamiento pertinente, por lo que dichas descargas se hacen a través de sistemas como fosas sépticas o pozos profundos directamente hacia el acuífero (SEDUMA, 2010).

Muchas viviendas de la región optan por el sistema de fosas sépticas. Sin embargo, este sistema es insuficiente ya que representa solamente un tratamiento primario, aunado a un pobre diseño e ineficiente mantenimiento del mismo (Novelo, 2007). En la ciudad de Mérida, 107,065 viviendas disponen sus aguas residuales mediante fosas sépticas, esto representa aproximadamente un 40% del total de 267,663 viviendas registradas. De igual manera, se indica que de las 107,065 viviendas que cuentan con fosa séptica, en el 60% nunca se han efectuado acciones de mantenimiento o limpieza de las mismas; es decir, 64,239 viviendas no cumplen con este proceso (SEDUMA, 2014). Adicionalmente, la modalidad predominante de disposición de agua residual es la de sumideros, con un 55.93% del total de las viviendas registradas, lo cual supone incluso un nulo tratamiento del agua residual producida. Lo anterior se presenta de manera gráfica en la Figura 1.

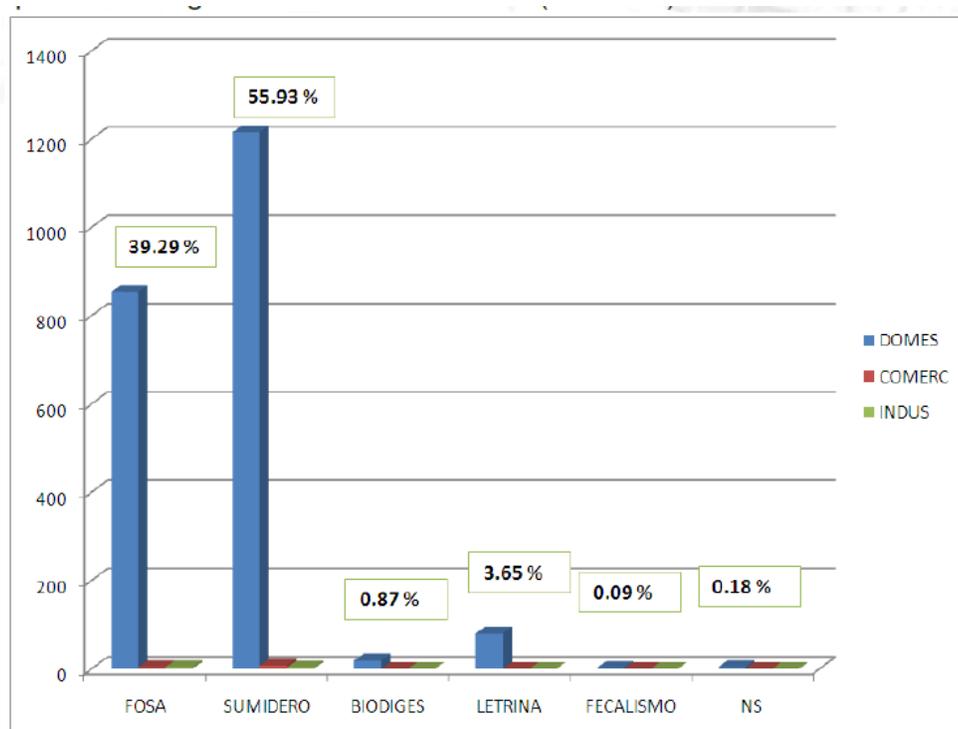


Figura 1 Disposición de Aguas Residuales en Mérida (SEDUMA,2014)

En resumen, la inadecuada disposición y tratamiento de las aguas residuales podría ser catastrófico para el medio ambiente e indiscutiblemente para la población de la Ciudad de Mérida y del Estado, por ello es necesario aplicar tecnologías que logren dar el adecuado tratamiento a dichos residuos para ser dispuestos de forma segura.

Si bien se han estudiado humedales artificiales en el país y en el Estado, no se ha aplicado en Yucatán un sistema híbrido que combine dos tipos de humedales para una mayor eficiencia. Para ello, en este estudio se plantea la aplicación de un sistema de humedales artificiales híbridos como forma de tratamiento para aguas residuales domésticas, que complemente el proceso de disposición a través de fosas sépticas, para lograr de esta manera la disposición segura de estos residuos, cumpliendo con la normatividad de la región y garantizando así su seguridad hídrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño de un sistema de humedal artificial híbrido de tratamiento de aguas residuales domésticas para casa individual.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar a escala semi-piloto una fosa séptica como método de pretratamiento y tres humedales artificiales híbridos, formados por un humedal horizontal de flujo subsuperficial y un humedal vertical de flujo subsuperficial cada uno; empleando las especies de planta *Typha Domingensis*, la ornamental *Saggitaria lancipholia* y un control (sin planta).
- Evaluar la aclimatación de las especies de plantas seleccionadas en los humedales artificiales híbridos, mediante los parámetros altura de la planta y porcentaje de cobertura.
- Evaluar el desempeño de los sistemas de humedales artificiales híbridos en términos de la remoción de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales, según la influencia de los factores tiempo de permanencia y especie de planta seleccionada.

CAPÍTULO II

AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

En este Capítulo se explica lo que es el agua residual doméstica, su origen y composición, sus características y los parámetros fisicoquímicos y biológicos que se utilizan para caracterizarla. Se presentan también los métodos de tratamiento primario, secundario y terciario más comunes para eliminar los contaminantes del agua residual doméstica.

2.1 DEFINICIÓN DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Las aguas residuales se pueden definir como:

“Aguas que no tienen valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella” (FAO, 2012).

Cuando la calidad del agua se ve afectada negativamente por alguna actividad antropogénica, ésta se convierte en agua residual. Se requiere de una canalización, tratamiento y desalojo adecuados para que estos residuos no se conviertan en problemas de contaminación; entendiendo contaminación como la alteración de las características químicas, físicas o biológicas del agua, por lo cual pierde su potabilidad para consumo diario o para uso en otras actividades (Rodríguez, 2006). Existen distintas fuentes de aguas residuales, de las cuales se pueden identificar cuatro fundamentales (Ramalho, 1990):

- Aguas domésticas o urbanas.
- Aguas residuales industriales.
- Escorrentías de usos agrícolas.
- Pluviales.

Las aguas residuales domésticas son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.) y consisten básicamente en residuos humanos que llegan

a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación. También son originadas por las descargas de establecimientos comerciales, públicos y similares (López Salazar, 2015).

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. Estos parámetros tienen distinta fuente de procedencia y muchos de ellos se relacionan entre sí. Los contaminantes en el agua residual son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, por lo cual se han desarrollado distintos métodos estandarizados para la evaluación de sus concentraciones (Ramalho, 1990).

2.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En la Tabla 1, se enlistan las características físicas más importantes del agua residual, así como su procedencia:

Tabla 1 Características Físicas del Agua Residual (*Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010*)

CARACTERÍSTICA	PROCEDENCIA
Color	Aguas residuales domésticas o industriales, degradación natural de la materia orgánica
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.

Los sólidos totales se definen como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua residual a un proceso de evaporación a entre 103 y 105°C. Los sólidos totales se dividen en sólidos suspendidos si se retienen en un filtro Whatman GF/C de fibra de vidrio con tamaño nominal de poro de 1.2 micrómetros. Se denominan sólidos coloidales y disueltos a la fracción que pasa dicho filtro. La fracción coloidal está compuesta por tamaños entre 0.001 y 1 micrómetro y los disueltos están compuestos por moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua.

La importancia de eliminar los sólidos suspendidos radica en que pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias cuando se vierte un agua residual a un medio acuático. Los sólidos disueltos se deben eliminar debido a su contenido orgánico e inorgánico.

A su vez, los sólidos totales pueden dividirse en sólidos volátiles y fijos, para hacer referencia a los componentes orgánicos e inorgánicos de los sólidos. El análisis de sólidos volátiles se emplea para determinar la estabilidad biológica de los lodos de aguas residuales, así como una medición de la biomasa presente (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010). La Figura 2 presenta la clasificación de los sólidos en el agua residual:

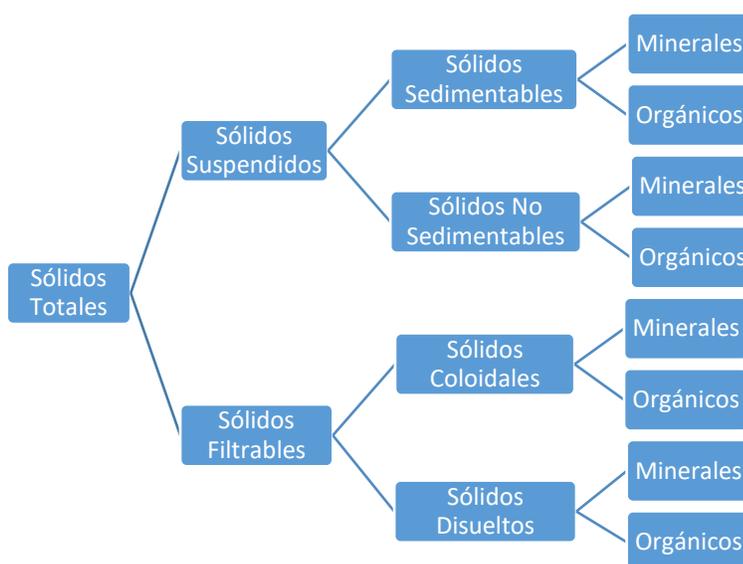


Figura 2 Clasificación de los Sólidos en el Agua Residual

Los olores son normalmente gases liberados durante el proceso de descomposición de materia orgánica. El olor es un indicador de la presencia de Sulfuro de Hidrógeno, el cual se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales. A bajas concentraciones, la influencia de los olores sobre el normal desarrollo de la vida humana tiene más importancia por la tensión psicológica que generan que por el daño que puedan producir al organismo. Los olores molestos pueden reducir el apetito, inducir a menores consumos de agua, producir desequilibrios respiratorios, náuseas y

vómitos, y crear perturbaciones mentales. En condiciones extremas, los olores desagradables pueden conducir al deterioro de la dignidad personal y comunitaria, interferir en las relaciones humanas, desanimar las inversiones de capital, hacer descender el nivel socioeconómico y reducir el crecimiento. Estos problemas pueden dar lugar al descenso de las rentas y el mercado de propiedades, los ingresos por impuestos, y las ventas (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010).

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que el agua de suministro, principalmente debido a la introducción de agua caliente en las casas e industrias. La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles. A su vez, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C (Ramalho, 1990).

2.2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Las principales características y constituyentes químicos del agua se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 2 Constituyentes Químicos Del Agua Residual

CONSTITUYENTE QUÍMICO	PROCEDENCIA
Materia Orgánica (DBO, DQO)	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas y aceites	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Pesticidas	Aguas residuales agrícolas
Cloruros	Aguas residuales domésticas, infiltraciones.
Metales Pesados	Vertidos Industriales
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales, aguas de escorrentía.

Materia Orgánica

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual son de naturaleza orgánica. Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%), y grasas y aceites (10%). Otro compuesto orgánico con importante presencia en el agua residual es la urea, principal constituyente de la orina. Si se descargan estos compuestos por medio de agua residual sin tratar, la estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y propiciar condiciones sépticas. Para determinar el contenido orgánico del agua residual se utilizan 3 métodos generalmente: DQO, DBO y Carbono Orgánico Total (COT) (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010).

La DQO corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar los componentes de un agua residual en las reacciones puramente químicas. Los componentes de una muestra están constituidos por materia orgánica e inorgánica oxidable (Ramos Cabello, 2000). La DBO se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia. En las aguas residuales domésticas, casi toda la demanda de oxígeno se debe a materiales orgánicos carbónicos. Para los efluentes sometidos a tratamientos biológicos una parte considerable de la demanda de oxígeno puede deberse a la nitrificación (Ramalho, 1990). El COT y los ensayos correspondientes se basan en la oxidación del carbono de la materia orgánica a dióxido de carbono, y la determinación del mismo por absorción en hidróxido potásico (KOH).

Ya que la DBO y DQO miden oxígeno y el COT mide carbono, la relación teórica entre la demanda de oxígeno y el carbono orgánico corresponde con la relación estequiométrica de oxígeno y carbono para la oxidación total de los compuestos orgánicos en consideración (la relación de pesos moleculares es 2.67) (Ramalho, 1990).

La relación entre la DQO y la DBO indica el grado de biodegradabilidad del agua residual y sirve para controlar y operar plantas de tratamiento. Cuando la relación es menor a 2.5, se tiene un agua residual biodegradable, en los cuales podemos usar sistemas biológicos como tratamiento. Si la relación se encuentra entre 2.5 y 5, es biodegradable siendo recomendable el uso de lechos bacterianos. Una relación mayor a 5, indica la baja biodegradabilidad del agua y para tratarla es preferible utilizar procesos fisicoquímicos.

pH

La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010).

Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de microorganismos y plantas. La determinación de este compuesto en aguas residuales ayuda a valorar la posibilidad de tratamiento por procesos biológicos. Cuando las concentraciones sean insuficientes, el nitrógeno debe ser añadido al agua residual. La eliminación o reducción del nitrógeno antes del vertido es necesaria para evitar problemas de eutrofización.

El contenido total de nitrógeno se compone de nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. El contenido orgánico del nitrógeno se determina con el método Kjeldahl. El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. Cuando un efluente secundario deba ser recuperado para la recarga de agua subterránea, la concentración del nitrato es importante, debido a sus consecuencias sobre la salud de los niños (Ávila et al.2002).

Fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. El fósforo se controla en el vertimiento de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales para evitar la eutrofización. Las formas más frecuentes en las que se presenta el fósforo en soluciones acuosas incluyen el ortofosfato, el polifosfato y los fosfatos orgánicos (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010).

2.2.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En la Tabla 3, se enlistan las principales características y constituyentes biológicos del agua residual doméstica:

Tabla 3 Constituyentes Biológicos del Agua Residual

<u>CONSTITUYENTE BIOLÓGICO</u>	<u>PROCEDENCIA</u>
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Bacterias	Aguas residuales domésticas, infiltraciones, plantas de tratamiento
Virus	Aguas residuales domésticas
Parásitos	Aguas residuales domésticas

Los principales grupos de organismos presentes tanto en aguas residuales como superficiales se clasifican en organismos eucariotas, eubacterias y arqueobacterias, predominando en su mayoría las eubacterias (Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua, 2010).

El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento, es amplio y de gran importancia. Por ello resulta imprescindible conocer sus características, funciones, metabolismos y proceso de síntesis.

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Las principales clases de organismos patógenos presentes

en las aguas residuales son, las bacterias, los virus, los protozoos y el grupo de los helmintos.

Las bacterias coliformes se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos, ya que aunque no son en sí mismos perjudiciales, son descargados por el ser humano junto con otros microorganismos patógenos causantes de enfermedades que encuentran en menor cantidad, por lo que se utiliza la presencia de los microorganismos coliformes para detectar la presencia potencial de patógenos (Ramalho, 1990).

2.2.4 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La composición de las aguas residuales es variada, ya que depende de los hábitos de la población, del clima, de la región, entre otros factores. La Tabla 4 presenta las concentraciones típicas resultado de la caracterización de aguas residuales domésticas, así como los rangos de concentración de los distintos parámetros:

Tabla 4 Características típicas del agua residual doméstica bruta (Metcalf & Eddy, 1985)

Componente	Unidades	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales	mg/l	1200	720	350
Disueltos Totales	mg/l	850	500	250
Fijos	mg/l	525	300	145
Volátiles	mg/l	325	200	105
Suspendidos	mg/l	350	220	100
Fijos	mg/l	75	55	20
Volátiles	mg/l	275	165	80
Sedimentables	mg/l	20	10	5
DBO	mg/l	400	220	110
COT	mg/l	290	160	80
DQO	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/l	85	40	20
Orgánico	mg/l	35	15	8
Amoniacal	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo Total	mg/l	15	8	4
Cloruros	mg/l	100	50	30
Alcalinidad	mg/l	200	100	50
Grasas y Aceites	mg/l	150	100	50
Coliformes Totales	Número/100 ml	10 ⁵ -10 ⁶		
Coliformes Fecales	Número/100 ml	10 ⁴ -10 ⁵		

2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El agua residual de cualquier fuente, debe ser tratada previo a su disposición final para proteger no sólo el medio ambiente sino la salud pública y la disponibilidad de los recursos de la región. Este proceso se realiza normalmente en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las cuales tienen la función de eliminar cualquier tipo de contaminación química o biológica que pueda ser nociva.

El proceso de tratamiento del agua residual se puede dividir en cuatro etapas (Ramalho, 1990):

- Tratamiento preliminar o pretratamiento.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario.

2.3.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR O PRETRATAMIENTO

Los procesos de pretratamiento de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de aguas residuales para su descarga bien a los bienes receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una homogeneización o neutralización (Ramalho, 1990). Algunos de estos procesos se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5 Principales Procesos de Tratamiento Preliminar

Procesos de Tratamiento Preliminar
Cribado o Desbrozo
Tamizado
Neutralización
Homogeinización

2.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

Los procesos de tratamiento primario son aquellos que eliminan una fracción de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual, así como aceites, grasas y arenas (Metcalf y Eddy, 1985). Los principales procesos se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6 Principales Procesos de Tratamiento primario

<u>Procesos de Tratamiento Primario</u>
Sedimentación
Coagulación-Floculación
Flotación
Desarenadores
Tanques o Fosas sépticas

2.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario de aguas residuales se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales, tanto aerobios como anaerobios. Estos procesos están diseñados para degradar de manera sustancial el contenido orgánico por proceso biológico del agua residual (Ramalho, 1990). Estos procesos tienen en común el uso de microorganismos para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Los procesos de tratamiento secundario aerobios se basan en la eliminación de contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, dióxido de carbono y agua. Los procesos anaerobios transforman la materia orgánica en biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono. Los principales procesos se enlistan en la Tabla 7.

Tabla 7 Principales Procesos de Tratamiento Secundario

<u>Procesos de Tratamiento Secundario</u>
Lodos Activados
Filtros Percoladores
Digestores Anaerobios
Lagunas de Estabilización
Humedales Artificiales
Contactores Biológicos Rotacionales (CBR)
Filtros Verdes
Lechos Bacterianos

2.3.4 TRATAMIENTO TERCIARIO

El tratamiento terciario, conocido también como tratamiento avanzado, se refiere a una serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional. Estos procesos no se utilizan con mucha frecuencia en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, sin embargo, se prevé que su uso se extienda conforme las exigencias de calidad de los efluentes se hagan más estrictas (Ramalho, 1990). En la Tabla 8 se enlistan los principales procesos de tratamiento terciario.

Tabla 8 Principales Procesos de Tratamiento Terciario

Procesos de Tratamiento Terciario
Separación de sólidos en suspensión
Adsorción en carbón activado
Intercambio iónico
Ósmosis inversa
Electrodiálisis
Oxidación Química (Cloración y ozonación)
Métodos de Eliminación de Nutrientes
Humedales Artificiales

CAPÍTULO III

HUMEDALES ARTIFICIALES

En este Capítulo se define que es un humedal artificial, se exponen las configuraciones y clasificaciones de los mismos, sus componentes y una descripción de los mecanismos y procesos que suceden dentro del sistema que provocan la remoción de contaminantes.

Adicionalmente, se incluye una recopilación de estudios similares en otras partes del mundo, así como con objetivos distintos a los de este estudio, pero con resultados muy interesantes.

3.1 DEFINICIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL

Un humedal es una zona de la corteza terrestre, generalmente plana, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitente. Al cubrirse de agua, el suelo llega a saturarse, lo cual lo deja desprovisto de oxígeno y da lugar a un ecosistema híbrido entre un medio puramente acuático y uno terrestre.

Un humedal artificial es un sistema fabricado y diseñado para utilizar y aprovechar los procesos naturales que se dan en un humedal, pero con un ambiente controlado y modificado por el hombre (Albalawneh y Naoum, 2016). Están diseñados para optimizar la ocurrencia natural de los procesos biológicos, químicos y físicos que se dan en la naturaleza. Este tipo de sistemas tiene muchas aplicaciones, como tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios, así como el tratamiento y manejo de aguas residuales de distintas fuentes como la agricultura, la ganadería, los drenajes domésticos, fuentes municipales, etc.

Los humedales artificiales correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las aguas municipales, industriales y las de lluvia, y son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente. Pueden aplicarse de manera descentralizada en medios rurales y en pequeñas comunidades,

así como en medios domiciliarios y las eco-ciudades que poco a poco van emergiendo, cuando no se cuenta con los recursos o cuando no se necesita aplicar complejos sistemas centrales de tratamiento de agua (Albalawneh & Naoum, 2016).

Las ventajas de utilizar estos sistemas son el bajo costo de construcción, la utilización de procesos naturales, facilidad de construcción, operación y mantenimiento y estabilidad del proceso. Las desventajas que presenta el sistema son grandes requerimientos de terreno y que no hay aún un criterio de diseño desarrollado para distintos tipos de agua residual y climas (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

Los humedales artificiales nos generan ecosistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de agua residual de una manera segura, confiable, estética y económica (Aguilar et al. 2009). Remueven los contaminantes de manera eficiente y no se necesita invertir en suministrar energía adicional para su funcionamiento.

Los componentes típicos de un humedal artificial son las plantas, el sustrato y la población microbiana. Las plantas pueden ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrimentos, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas (Zurita, et al. 2012). El funcionamiento de estos sistemas de tratamiento se basa en la actividad combinada de estos factores.

En México existen 1941 plantas de tratamiento del sector privado y paraestatal, las cuales tienen una capacidad instalada de 159,090 litros por segundo (L/s) y el caudal en operación es de 107,706 l/s (INEGI, 2017). Para 2014, se tiene registrado el uso de 71 plantas de tratamiento con humedales construidos, siendo Oaxaca la entidad con mayor número de ellos con 39 (CONAGUA, 2014).

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales se clasifican según el sentido de circulación del flujo de agua (Aguilar et al. 2009):

- Humedales artificiales de flujo libre o superficial: son sistemas en los cuales el agua circula por encima del sustrato continuamente. Las condiciones aerobias se favorecen ya que el agua está expuesta directamente a la atmósfera. Se utilizan para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios y para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial: son sistemas en los cuales el agua circula a través del sustrato.

A su vez, los humedales artificiales de flujo subsuperficial se clasifican en (United Nations Human Settlements Programme, 2008):

- Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial híbridos

3.2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

En los humedales artificiales de configuración horizontal, el agua entra por un punto y fluye lentamente a través del sustrato poroso en un trayecto más o menos horizontal hasta que alcanza el punto de salida. Durante este recorrido, el agua entra en contacto con zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas. Las zonas aeróbicas las encontramos cerca de las raíces y rizomas de la vegetación. El agua en este sistema es purificada por la degradación microbiana y por procesos fisicoquímicos. Este sistema puede remover efectivamente contaminantes orgánicos como sólidos suspendidos, DBO y DQO. Debido a que hay una poca transferencia de oxígeno dentro del humedal, la remoción de nutrientes es limitada, sin embargo pueden remover nitratos (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

Los humedales artificiales de configuración vertical se componen de una cama de grava y arena o algún otro material de sustrato. El agua residual fluye desde la parte superior y gradualmente se va infiltrando hasta la parte baja del humedal donde es recolectada por una red de drenaje. Estos humedales son alimentados intermitentemente, y el líquido fluye de manera descendente lo que promueve la aireación y una mayor transferencia de oxígeno. Por esta última propiedad, estos

sistemas son muy utilizados, además de que ocupan menor área que los de flujo horizontal y pueden remover efectivamente DBO, DQO y patógenos (ONU,2008).

La combinación de ambos sistemas (horizontal y vertical) se ha realizado para aprovechar tanto las características de remoción de DBO y sólidos suspendidos, pero también para tener procesos de nitrificación. Los humedales verticales tienen una mayor transferencia de oxígeno y menor requerimiento de área, pero se pueden tupir y tener una menor remoción de sólidos suspendidos que uno horizontal. La intención es utilizar sistemas híbridos para aprovechar las ventajas de cada uno y compensar las desventajas. Dependiendo del propósito del tratamiento se puede determinar si será un sistema híbrido con un humedal horizontal seguido por uno vertical o viceversa. Se recomienda combinar este tipo de sistemas como parte de un tren de tratamiento (Yu et al.2016).

3.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

A continuación, se describen los principales componentes de los humedales artificiales.

3.3.1 VEGETACIÓN

Los humedales naturales se pueden encontrar en ecosistemas como ciénagas, esteros, marismas, pantanos, turbas, así como zonas de costa marítima que presentan anegación periódica por el régimen de mareas, como los manglares.

Las plantas que se utilizan en los humedales son macrófitas, es decir, formas macroscópicas de vegetación adaptadas al medio acuático, poseen unas estructuras especializadas llamadas parénquimas, por las que conduce el oxígeno (del aire y el producido por fotosíntesis) hasta las raíces. Estas plantas constituyen la base de la tecnología del humedal, ya que inyecta grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces, y el aire que no es aprovechado por la planta es absorbido por microorganismos que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema (García Robles, 2007).

La vegetación que se utilice en el humedal artificial deberá ser vegetación nativa de los humedales naturales y de preferencia, especies locales para garantizar que tenga las mejores condiciones de supervivencia en el ambiente (Deeptha et al. 2014).

Las diferentes especies de plantas acuáticas que se utilicen son importantes, debido a que difieren en su capacidad de depuración del agua residual, en la remoción de nutrimentos específicos, de elementos traza y de compuestos potencialmente tóxicos como los metales pesados (Aguilar et al. 2009). La vegetación juega un papel crucial en el humedal ya que libera oxígeno desde las raíces y tiene un porcentaje de contribución a la remoción de la DBO de entre el 1.2 y el 24.8%, y de remoción de especies nitrogenadas de entre el 4 y el 23.5% (Chan et al. 2016).

Incluso algunos metales pesados y otros tipos de contaminantes son retenidos y acumulados en las partes de las plantas como las hojas o las raíces. (Bhatia y Goyal, 2014).

Algunos ejemplos de plantas utilizadas para humedales artificiales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Vegetación utilizada en estudios con humedales artificiales

Nombre científico	Nombre común	Referencia
<i>Carex Spissa</i>	Yerba Cipresillo	(Yu,et. al., 2016)
<i>Phyla Nodiflora</i>	Capeweed	(Yu,et. al., 2016)
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	(Deeptha, et. al., 2014), (Aguilar, et al., 2009)
<i>Typha Orientalis</i>	Tule	(Deeptha, et. al., 2014), (Aguilar, et al., 2009)
<i>Lemna Minor</i>	Lenteja de Agua	(Palta-Prado y Morales-Velasco, 2013)
<i>Elodea Canadensis</i>	Elodea	(Palta-Pradoy y Morales-Velasco, 2013)

Para dar un aspecto más estético, Yu et al. (2016) combinaron la *Carex spissa* y *Phyla nodiflora* con plantas normales de un jardín como Narcisos. Se recomienda también considerar una densidad de rizomas por m² adecuado, para evitar que vuelvan el agua a condiciones anóxicas por la sobredemanda de oxígeno.

En México, los humedales artificiales se han implementado en los estados de Colima, Chihuahua, Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Tamaulipas y Tlaxcala (Aguilar et al. 2009), y la mayoría utilizan el carrizo y el tule como vegetación.

Las Naciones Unidas recomiendan en su manual sobre humedales construidos (United Nations Human Settlements Programme, 2008) que la vegetación que se seleccione provenga de especies locales, con una profunda penetración de raíces, fuertes rizomas, densidad considerable de biomasa, que proporcione una máxima área superficial para poblaciones microbianas y que promuevan una eficiente transferencia de oxígeno.

3.3.2 SUSTRATO

El sustrato es el soporte para las plantas y un medio de fijación para los microorganismos en el sistema y funciona como conductor hidráulico (Faulkner y Richardson 1989). Son el sustento para los microorganismos y para las raíces de las plantas y la rizósfera, almacenan contaminantes. El sustrato actúa como filtro en la permanencia de contaminantes y sólidos suspendidos.

Se recomienda usar sustratos con alta capacidad de adsorción, disponibles fácilmente y económicamente, dado que son vitales para la remoción sustentable de contaminantes en los humedales artificiales (Yuan et al. 2015). Asimismo, se recomienda analizar las condiciones del suelo local a fin de ser usado en el humedal artificial por construir, ya que el gasto será menor al tener el material disponible.

Se debe realizar un estudio de los sustratos en cuanto a la morfología de la superficie, microestructura, porosidad, propiedades de la superficie, ambiente potencial para el desarrollo de una biopelícula con la finalidad de conocer el material que se usará.

Algo que se debe evitar en el sustrato es que la materia orgánica y sólidos suspendidos filtrados y retenidos saturen los espacios intersticiales del sustrato, ya que ocasiona que la conductividad hidráulica caiga, lo cual reduce la eficiencia (Meng et al. 2013).

Las Naciones Unidas en su manual sobre humedales construidos (United Nations Human Settlements Programme, 2008) mencionan que partículas muy grandes tienen alta conductividad hidráulica, pero poca área superficial húmeda viable para el

crecimiento microbiano, y que la intención es encontrar partículas de tamaño intermedio del tamaño de la grava, y lavar esos materiales para eliminar partículas finas que ocupen espacios vacíos.

Algunos ejemplos de sustratos utilizados son:

- **Polvo de fibra de coco:** Yu et al. (2016) utilizaron este tipo de sustrato en una capa de 15 cm.
- **Sustratos de grava y escoria:** Yuan et al. (2015) hicieron la comparación de las eficiencias en sus humedales usando unos humedales con grava y otros con escoria proveniente de la industria metalúrgica. Se comprobó que el uso de la escoria da una mayor remoción de la materia orgánica. Ambas tienen similar porcentaje de remoción de nitrógeno (grava 69.9% y escoria 72.2%) y la escoria tiene un 20% más de remoción de fósforo que la grava. Sin embargo, observó que la escoria se satura más rápido por lo que a pesar de tener mejores eficiencias en el primer año de estudio, en el segundo las eficiencias entre la grava y escoria fueron similares.
- **Cascarilla de café:** Palta-Prado y Morales-Velasco (2013) utilizaron este material como biolecho.
- **Grava de tezontle y arena:** Aguilar et al. (2009) utilizaron esta combinación en proporción 1:1.

3.3.3 MICROORGANISMOS

Los microorganismos son la parte principal del funcionamiento de los humedales artificiales, ya que de estos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes. Los compuestos orgánicos, nitrogenados y fosforados son transformados a formas más simples y por lo tanto, más fáciles de eliminar del sistema (Aguilar et al. 2009).

Los microorganismos como las bacterias utilizan reacciones enzimáticas o bioquímicas para convertir los contaminantes en otras sustancias, las cuales se busca sean dióxido de carbono, biomasa o agua.

Las especies bacterianas que se pueden encontrar en humedales artificiales tienen un sofisticado proceso metabólico y tienen la capacidad de convertir distintos tipos de

sustratos por conversión. Dichos microorganismos utilizan mayormente elementos como el carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro. A su vez utilizan otros elementos en menor medida como zinc, manganeso, sodio, cloro, selenio, entre otros. Estas bacterias son incluso capaces de acumular metales pesados (Portier y Palmer, 1989).

La depuración del agua se lleva a cabo principalmente por la biopelícula, que crece en el medio granular, en las raíces y rizomas de las plantas. Algunas transformaciones microbianas son aerobias, mientras otras son anóxicas o anaerobias.

La población microbiana en el humedal se verá afectada en mayor medida por la temperatura, lo cual puede acelerar o reducir la velocidad de crecimiento. A temperaturas mínimas el crecimiento se inhibe y a temperaturas máximas ocurre un decaimiento en la población bacteriana (Portier y Palmer, 1989).

3.3.4 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN EL AFLUENTE

La distribución del agua residual en el afluente de los humedales artificiales debe realizarse de tal manera que se tenga un flujo uniforme y que no ocurra en un solo punto. Algunas técnicas para lograr este objetivo son el uso de tuberías perforadas, tuberías perpendiculares al flujo del agua, entre otras. Los tamaños de las tuberías de distribución, así como el dimensionamiento de las perforaciones en la misma están en función del flujo que entra al humedal.

En la manera de lo posible, esta estructura de distribución debe estar expuesta para que el operador pueda ajustar el flujo o dar mantenimiento. Se recomienda que la entrada esté sumergida en el humedal para evitar el crecimiento de algas y el consecuente taponamiento del sistema.

En Humedales Artificiales de Flujo Horizontal, el objetivo es que el afluente se distribuya a través de toda el área transversal del área de entrada. Se recomienda distribuir este caudal en una zona de rocas de mayor tamaño que el material usado en el resto del humedal (Figura 3).

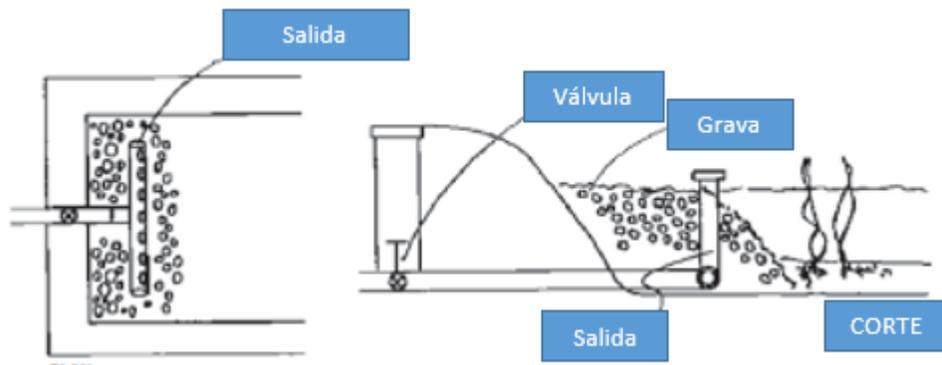


Figura 3 Ejemplo de Estructuras de Distribución en el Afluente para Humedales Horizontales (EPA,2000)

Para los Humedales Artificiales de Flujo Vertical, es esencial lograr una distribución uniforme del agua entrante a través de toda el área del humedal. Una técnica recomendable para este tipo de humedales es crear una red de distribución de agua residual con tuberías perforadas hacia abajo para lograr la correcta distribución.



Figura 4 Ejemplo de Estructuras de Distribución en el Afluente para Humedales Verticales (ONU,2008)

3.3.5 RECOLECCIÓN DEL EFLUENTE

Las estructuras de recolección del efluente en humedales artificiales ayudan a controlar el flujo a través del humedal así como la altura de operación (United Nations Human Settlements Programme, 2008). Se recomienda el uso de técnicas para mantener un gradiente hidráulico adecuado. Entre estas técnicas se puede encontrar el uso de colectores conectados a la salida del humedal, los cuales consisten en un contenedor y compuertas o válvulas para regular el flujo de salida.

3.4 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES

A continuación, se describen los mecanismos de remoción de contaminantes que se llevan a cabo en los humedales artificiales.

3.4.1 SÓLIDOS

Los sólidos suspendidos y sedimentables que no alcanzaron a removerse en alguna etapa de tratamiento primario o pretratamiento se eliminan en humedales artificiales por procesos de sedimentación por gravedad y filtración por el flujo del agua a través del sustrato. Esto se debe a las bajas velocidades de flujo a través de un medio poroso, lo cual promueve la sedimentación e intercepción de materiales sólidos (Kadlec y Wallace, 2008).

En humedales artificiales de flujo subsuperficial, la materia suspendida es removida principalmente por mecanismos de intercepción y sedimentación. En este tipo de humedales existe menor riesgo de resuspensión de partículas debido al viento o a acción animal. Como resultado de esto, la materia particulada tiende a acumularse en este tipo de humedales, por lo que se tiene que monitorear la pérdida de conductividad hidráulica en el tiempo.

Los sólidos disueltos son degradados biológicamente por procesos aeróbicos y anaeróbicos, como se explicará más adelante.

3.4.2 MATERIA ORGÁNICA

La principal vía de eliminación de materia orgánica acumulada en un humedal es la descomposición, es decir, la transformación de moléculas orgánicas complejas a constituyentes orgánicos e inorgánicos simples. En general se trata de diseñar un sistema de este tipo para que resulte posible mantener condiciones aerobias, ya que la degradación por esta vía es más rápida y completa que la anaerobia (García Robles, 2007).

Los compuestos del carbono interactúan con el ecosistema del humedal. Muchos procesos internos en el humedal son alimentados por el carbono proporcionado por el agua residual entrante y por el carbono formado de los procesos de descomposición. Estos compuestos son rápidamente utilizados en los procesos que se dan dentro del humedal. El crecimiento de las plantas en el humedal requiere de dióxido de carbono para la fotosíntesis. A su vez, la variedad de organismos libera el dióxido de carbono producto de la respiración. En términos de tratamiento se esperan buenas reducciones de la materia orgánica en estos sistemas (Kadlec y Wallace, 2008).

Diversos factores intervienen en la eficiencia de remoción de materia orgánica, entre ellos:

- Configuración del humedal
- Oxígeno disuelto y suministro de oxígeno
- Temperatura
- Cambios de estaciones del año
- Área y profundidad del humedal
- Vegetación

3.4.3 NITRÓGENO

Los compuestos del nitrógeno que entran por medio del agua residual pueden provocar eutrofización al ser vertida a un medio receptor, si no es tratada adecuadamente. Esto afecta el contenido de oxígeno de dichos cuerpos y provoca toxicidad para organismos acuáticos. Estos compuestos a su vez aumentan el crecimiento de plantas, lo cual estimula los ciclos biogeoquímicos dentro de un humedal. El ciclo del nitrógeno es complejo, por lo que existen distintas vías para su eliminación (Kadlec y Wallace, 2008).

El nitrógeno orgánico que entra en un humedal está típicamente asociado con materia particulada como sólidos orgánicos del agua residual y por tanto se elimina mediante filtración. Mucho de este nitrógeno orgánico sufre descomposición o mineralización y descarga entonces nitrógeno en forma amoniacal al agua, el cual puede ser estable bajo ciertas condiciones y puede ser absorbido por el medio granular.

La nitrificación es el proceso de conversión biológica del amonio a nitrato por organismos aerobios nitrificantes, el cual puede ser absorbido o asimilado por las plantas o ser reducido por otros microorganismos. La denitrificación consiste en eliminar nitrógeno desde su forma de nitrato mediante su conversión a nitrógeno gas. Este proceso tiene lugar bajo condiciones anóxicas y se produce en dos etapas, primero cuando el nitrato es convertido a nitrito y luego cuando el nitrito es convertido a NO (monóxido de nitrógeno), N₂O y gas nitrógeno (Birk, 2003).

El nitrógeno también precipita y se acumula tanto en el suelo como en sedimentos. Las plantas juegan un papel importante pues asimilan este nutriente para su crecimiento.

3.4.4 FÓSFORO

Los humedales artificiales son capaces de remover fósforo a corto y largo plazo. El fósforo es un nutriente requerido para el crecimiento de las plantas. Cuando un humedal, natural o artificial, recibe cantidades adicionales de fósforo por agua residual que ingresa al sistema, responde reajustando su estructura, el almacenamiento y el crecimiento de su vegetación. Si este nuevo suministro de nutrientes es variable en el tiempo, un ecosistema maduro de humedales no cambiará en carácter ni función. Sin embargo, ya que las aguas residuales suponen concentraciones de fósforo mayores a las naturales, el sistema deberá recibir un período de adaptación para aceptar estos nuevos nutrientes (Kadlec y Wallace, 2008).

En la eliminación del fósforo del agua residual intervienen varios componentes, como las plantas, la microbiota, el sustrato y las raíces de las plantas. Las principales vías de eliminación de fósforo son (United Nations Human Settlements Programme, 2008):

- Adsorción en el sustrato y raíces.
- Acumulación en la vegetación y sedimentos.
- Precipitación.
- Asimilación por vegetación y microorganismos.

La remoción del fósforo en los humedales artificiales es eficiente en un período corto hasta que el medio se satura. Sin embargo, a largo plazo los procesos son más

limitados y se reducen a la asimilación por parte de las plantas y la biomasa (Rozema et al. 2016).

3.4.5 PATÓGENOS

Los microorganismos patógenos están presentes en las aguas residuales domésticas crudas. Estos organismos van desde virus hasta parásitos como gusanos y representan un parámetro esencial en la determinación de la calidad del agua. La densidad y especies de estos organismos en el agua residual varía dependiendo de la región geográfica y de los hábitos de consumo e higiene de la población.

Los tratamientos convencionales tienen buena eficiencia para remover estos patógenos y los más comunes son la aplicación de cloro, ozonación y aplicación de radiación UV. Sin embargo, las técnicas de tratamiento que utilizan procesos naturales tienen un gran potencial de reducir estas poblaciones de patógenos debido a las tasas de mortalidad de cada microorganismo y a las condiciones ambientales hostiles dentro del sistema.

En humedales naturales y artificiales, los mecanismos de remoción de patógenos son los siguientes (Kadlec y Wallace, 2008):

- **Desinfección solar:** La radiación UV es factor importante para matar las bacterias patógenas. A su vez juega el papel de agente inactivador. Asimismo, los virus son también susceptibles a la radiación UV. La eficiencia de este proceso depende de la radiación que alcanza a penetrar en la columna de agua.
- **Predación:** La mayoría de los patógenos son alimento de especies mayores como nematodos, rotíferos y protozoos.
- **Mortalidad:** Las bacterias, virus, protozoos y helmintos normalmente no sobreviven períodos mayores a 30 días en ambientes de agua fresca y 50 días en suelo. Para humedales se tienen períodos similares sin embargo hay factores que aceleran o retrasan el período de supervivencia, como lo es la temperatura y la disponibilidad de oxígeno y nutrientes.

- **Sedimentación y filtración:** Los patógenos que mueren sedimentan por gravedad. Algunos patógenos son retenidos por el medio poroso y separados del flujo de agua que sale del sistema.

3.5 DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

A continuación, se describen algunas pautas a seguir durante el diseño de humedales artificiales.

3.5.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

Se debe tener en cuenta que el sustrato del humedal es susceptible a llenarse de escombros y sólidos provenientes del agua residual si dichos materiales no son removidos antes de ser llevados al humedal. Por eso es necesario un tratamiento preliminar/primario. (United Nations Human Settlements Programme, 2008)

El tratamiento preliminar se refiere mayormente a rejillas y cribas para eliminar sólidos de gran tamaño. El tratamiento primario busca separar sólidos suspendidos por operaciones unitarias como la sedimentación. El tratamiento primario que más frecuentemente se usa para humedales es el tanque séptico con dos compartimientos. Estos tanques deben ser limpiados cada cierto tiempo y se deben extraer los lodos. Se recomienda considerar un tiempo de permanencia mayor a 12 horas para diseñar estos tanques y que el volumen del primer compartimiento sea de dos tercios del volumen total del tanque (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

3.5.2 DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Área Superficial Requerida

El área superficial, tanto para Humedales Artificiales de Flujo Vertical como Horizontal, se calcula con la Ecuación 1 (United Nations Human Settlements Programme, 2008):

Ecuación 1
$$Ah = \frac{Qd * (\ln Ci - \ln Ce)}{KT}$$

Donde:

Ah = área superficial del humedal (m²)

Qd = flujo promedio del drenaje (m³/d)

C_i = DBO en el influente (mg/l)

C_e = DBO en el efluente (mg/l)

KT = constante de velocidad de remoción del contaminante de interés (m/d)

La constante de remoción KT , se puede estimar por medio de valores reportados en la literatura a 20°C y ajustados a la temperatura de operación del sistema, por medio de la Ecuación 2 (United Nations Human Settlements Programme, 2008), o puede ser determinada por medio de valores experimentales en modelos a escala piloto, semi-piloto o de laboratorio, con la Ecuación 3 (Jamieson et al.,2007).

Ecuación 2
$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)} * n * d$$

Donde:

- K_T = Constante de remoción del humedal a la temperatura del sistema (d⁻¹)
- T = Temperatura de operación del sistema (°C)
- K_{20} = Constante de remoción a 20°C (m/d)
- n = porosidad del sustrato (%)
- d = profundidad de la columna de agua (m)

Ecuación 3
$$K_T = q \ln\left[\frac{C_{in}-C^*}{C_{out}-C^*}\right]$$

Donde:

- K_T = Constante de remoción del humedal a la temperatura del sistema (d⁻¹)
- C_{in} = Concentración en el afluente (mg/L)
- C_{out} = Concentración en el efluente (mg/L)
- C^* = Concentración de fondo (mg/L)
- q = Carga hidráulica (m/d)

Profundidad

La profundidad del sustrato en un humedal artificial está determinada por la profundidad de la vegetación a utilizar. Sin embargo, es conveniente considerar también el tiempo de permanencia hidráulico para seleccionar la profundidad adecuada para el sistema.

Para humedales horizontales se recomienda una profundidad promedio de 40 cm y para verticales una profundidad promedio de 70 cm, para proveer una adecuada nitrificación y remoción de materia orgánica (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

Impermeabilización

Los humedales están diseñados en forma de embalse, ya que estos contienen el medio granular, las plantas y el agua a tratar. Dicho embalse debe disponer de algún tipo de barrera para evitar filtraciones de agua de entorno lateral y de fondo hacia el interior del humedal. El tipo de barrera depende de las condiciones locales. Se pueden usar membranas de plástico (PVC, polietileno de alta densidad, etc.) u otro tipo de impermeabilizante de alta resistencia (García Robles, 2007).

3.6 EFICIENCIA DEL SISTEMA

Al tomar muestras del influente y efluente, se debe caracterizar el agua para determinar el porcentaje de remoción y así averiguar qué eficiencia tiene el sistema. Según Chávez (2009) los parámetros que se deben considerar son:

- **DBO₅**: Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida por parte de los microorganismos presentes.
- **DQO**: Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

- **Especies nitrogenadas:** Se deben medir valores de Nitrógeno total Kjeldalh (NKT), Nitrógeno amoniacal, Nitratos y Nitritos.
- **Sólidos Disueltos y en Suspensión**
- **Fósforo Total**
- **Microorganismos:** Coliformes Totales, Fecales y E. Coli, como indicadores de materia fecal.

El fin de tomar estas mediciones, aparte de analizar la eficiencia del sistema, es verificar que el efluente cumpla con las normativas para su descarga en cuerpos de agua o posible re-uso. En México, la norma que dicta los límites permisibles de estos parámetros a medir, para agua de consumo es la NOM-127-SSA1-1994, mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10. Límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para agua de consumo

Parámetro	Límite
Nitrógeno Amoniacal	0.5 mg/L de N-NH ₄
Nitritos	0.05 mg/L de N-NO ₂
Nitratos	10 mg/L de N-NO ₃
Coliformes Totales	2 UFC/100ml
Coliformes Fecales	0 UFC/100 ml

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Los límites se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga de agua residual

Parámetro	Límite
Nitrógeno Total	60 mg/L de N ₂
DBO₅	150 mg/L de O ₂
Fósforo Total	20 mg/L de P

La eficiencia del sistema se mide como la relación entre la concentración en el influente y la del efluente, con la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 4 } \% \text{ EFICIENCIA} = \frac{\text{Concentración Influyente} - \text{Concentración Efluente}}{\text{Concentración Influyente}} * 100$$

Algunos factores que afectan la eficiencia son por ejemplo el clima. Rozema, et al., (2016) determinaron que en climas fríos hay una reducción efectiva de los patógenos en el agua residual. En climas calurosos existe una pérdida de flujo en el agua del efluente debido al fenómeno de evaporación, aproximadamente del 17% para el caso de Jordania (Albalawneh y Naoum, 2016).

Se considera que hay una mayor eficiencia cuando se combinan distintos modelos de humedal en uno solo (Fenoglio, 2000). En cuanto a la vegetación, el carrizo fue el más utilizado y el que presentó mejores resultados ya que resiste de mejor manera a las condiciones ambientales.

Un factor importante a considerar es el tiempo en el que se puede obtener excelentes resultados. Por ejemplo, Yu et al. (2016) obtuvieron resultados en el humedal estudiado en 3 horas, logrando cumplir con las normas para descarga de agua no potable.

No existe un diseño óptimo de humedal artificial que pueda demostrar con certeza que tiene una mayor eficiencia sobre todos los otros diseños. Se recomienda caracterizar el agua residual que se quiere tratar antes de diseñar el sistema. También se recomienda estudiar el entorno para obtener información sobre el clima de la región, la vegetación y los posibles sustratos (Rozema et al. 2016).

Sin embargo, algunas estrategias que se pueden seguir son:

- Aireación: la aireación artificial favorece el rendimiento del humedal. Incrementa el oxígeno disuelto y estimula la descomposición de la materia orgánica. Las descargas de oxígeno favorecen los procesos de nitrificación y denitrificación para remoción de nitrógeno (Haiming et al. 2015).
- Aplicar un flujo continuo es más eficiente que suministrar el flujo de manera administrada (Rozema et al. 2016).
- Recirculación del efluente para lograr mejores porcentajes de remoción.
- Control de temperatura.
- Es más conveniente alimentar al sistema de agua residual en varios puntos, en vez de sólo una entrada (Haiming et al. 2015).
- Administrar fuentes de carbón externas.

- Bioaumentación: uso de inóculos de bacterias para favorecer los procesos biológicos.
- Cosecha de la biomasa.

Cabe destacar que la eficiencia del sistema no es sólo un mero porcentaje, sino el sistema debe ser sustentable y provocar desarrollo económico en la región, desarrollo social y procurar la protección ambiental, de manera que se cumplan los cada vez más estrictos estándares de calidad.

3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación del agua por las condiciones climáticas, así como la transpiración de las plantas influyen la aplicación tecnológica de los humedales artificiales para el tratamiento del agua residual ya que afecta la cantidad de agua en el sistema y por lo tanto afecta el cálculo de la eficiencia del tratamiento.

El efecto de la evapotranspiración debe ser tomado en cuenta en regiones donde existen climas muy cálidos o zonas áridas, para prevenir que el agua se vuelva excesivamente salina. En regiones donde la evaporación o la evapotranspiración son muy elevadas, la aplicación de esta tecnología puede verse limitada al aumentar las concentraciones de sólidos totales disueltos y concentraciones de carbono orgánico disuelto. A su vez, se ha determinado que existe un efecto significativo entre la evapotranspiración y la remoción de nitrógeno total y fósforo total, ya que existe una relación exponencial positiva entre las tasas de evapotranspiración y la remoción de nitrógeno total y una relación lineal positiva entre la remoción de fósforo total. Esto es debido a que la evapotranspiración es inducida por altas temperaturas, lo cual estimula el metabolismo de las plantas y la actividad microbiana, lo cual aceleran la remoción de ambos nutrientes (Jing y Hu, 2010).

Las tasas de evapotranspiración varían no sólo en función del clima sino también de la vegetación dentro del humedal. Las características de la vegetación como su densidad, diversidad, altura, características de la hoja, entre otras, tienen influencia sobre la evapotranspiración. Aunque existen diversos estudios sobre la evapotranspiración en humedales, la estimación de este parámetro es un proceso

difícil de cuantificar y es un proceso que no se ha logrado entender completamente a la fecha (Papaevangelou et al. 2012).

La dificultad de medir la evapotranspiración ha provocado el desarrollo de distintos métodos de estimación. Sin embargo no existe un método universal que aplique a todos los humedales debido a las múltiples variables que involucra este proceso. Los métodos disponibles en la literatura se clasifican en 2 áreas: métodos empíricos y métodos directos. Los métodos empíricos aplican ecuaciones que involucran variables en su mayoría meteorológicas para estimar la tasa de evapotranspiración. Los métodos directos se basan en la observación y medición de los sistemas de humedales artificiales y el principal es el método del balance de masas.

3.7.1 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES

La medición directa de la evapotranspiración de humedales artificiales se basa en el balance de masas entre el agua a la entrada y salida del sistema, como se presenta en la Ecuación 5 (Kadlec y Wallace, 2008):

Ecuación 5 $Q_i - Q_o + Q_c - Q_b - Q_{gw} + Q_{sm} + (P * A) - (ET * A) = \frac{dV}{dt}$

Donde:

- A = área superficial del humedal (m^2)
- ET = tasa de evapotranspiración (m/d)
- P = tasa de precipitación (m/d)
- Q_c = flujo por escorrentía (m^3/d)
- Q_b = pérdida del banco de agua (m^3/d)
- Q_{gw} = infiltración al subsuelo (m^3/d)
- Q_i = flujo de entrada al sistema (m^3/d)
- Q_o = flujo de salida del sistema (m^3/d)
- T = tiempo (d)
- V = volumen de almacenamiento de agua del humedal (m^3)

Papaevangelou et al. (2012), propusieron un método para medir la Evapotranspiración (ET) en un modelo a escala piloto, en el cual en la mañana de un día determinado se mide el volumen de agua añadido al humedal para llegar a un nivel determinado, y se colocan contenedores a los alrededores para medir cualquier volumen que rebose por exceso de agua. A su vez se monitoreó diariamente la precipitación con ayuda de una estación meteorológica. Al día siguiente se regresó al lugar y se añadió un volumen de agua necesario para recuperar el nivel de operación, por lo que la ET se calcula con la Ecuación 6:

Ecuación 6
$$ET = P + HV_{IN} - HV_{excess}$$

Donde:

- ET = evapotranspiración diaria (mm)
- P = precipitación diaria (mm)
- HV_{IN} = volumen diario de agua añadido al sistema expresado como columna de agua (mm)
- HV_{excess} = volumen de agua que rebosa, expresado como columna de agua (mm).

3.7.2 MÉTODOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES

Aparte de aplicar métodos directos para medir la evapotranspiración, se pueden aplicar métodos empíricos que se basan en información meteorológica del sitio donde se instaló el humedal. Entre estos métodos se encuentran el de Turc, Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Cridde, Penman-Monteith, Allen, Priesley-Taylor, Pan Method, entre otros. Estos métodos varían en cuanto a las variables que toman en cuenta, así como lo que miden. Por ejemplo, la ecuación de Thornthwaite estima la evapotranspiración mensual mientras todos los demás estiman la evapotranspiración diaria. A su vez, todos los métodos estiman la ET de referencia, excepto por los métodos de Turc y de Hargreaves que miden la ET actual.

Entre las variables meteorológicas que los distintos métodos toman en cuenta encontramos:

- Humedad relativa
- Porcentaje de luz del sol y elevación
- Temperatura
- Velocidad del viento
- Presión de saturación de vapor
- Densidad del Flujo de calor del suelo
- Índice de calor
- Radiación extraterrestre
- Radiación Solar.

3.8 ESTADO DEL ARTE

La ecotecnología de los humedales artificiales ha sido estudiada en todo el mundo debido a su eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual y otros residuos en conjunto con procesos naturales. El término humedales artificiales es relativamente nuevo; sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que antiguas culturas como la china y la egipcia utilizaban los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales (Osnaya, 2012).

La utilización de humedales artificiales para la recepción de aguas servidas se remonta a comienzos del siglo XX; las ciénagas, humedales y turberas se concibieron como los mejores receptores de aguas dispuestas, además jugaban un papel purificador importante. Las primeras nociones científicas relacionadas con el uso de humedales para el tratamiento de aguas usadas remontan hasta la década de los 50, cuando Seidel y Kickuth hicieron un estudio sobre la eliminación de fenoles y tratamiento de aguas residuales de una lechería con humedales artificiales en 1952 en el instituto Max Plank, donde en aquella época éstos no fueron considerados como un sistema de depuración de aguas residuales (Fenoglio, 2000).

El estudio de los humedales como sistemas de tratamiento comenzó con un estudio de las plantas deseables para el tratamiento de aguas residuales. Se encontró que las especies de plantas más adecuadas para el tratamiento son las que tienen raíces grandes, crecen rápidamente, transpiran grandes volúmenes de agua y tienen raíces adventicias, es decir que se desarrollan en un sitio distinto de su hábitat normal.

Este método se aplicó por primera vez en Alemania en 1974 para tratar aguas residuales municipales y aguas residuales de la industria textilera, cervecera y de productos lácteos empleando plantas emergentes, convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización y, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario (Estrada, 2010).

El primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales inició su operación en Inglaterra en octubre de 1985, para una población de 1.260 habitantes y un caudal promedio de 189 m³/día. Así mismo entre 1983 y 1988 se construyeron en Dinamarca más de 130 sistemas de humedales artificiales, para poblaciones de hasta 7.100 habitantes con caudales del orden de 1065 m³/día; sin olvidar que también se encontraron funcionando humedales artificiales en Bélgica, Holanda, Hungría y Suecia (Estrada, 2010).

Hasta el año 2000, los países donde más se estaba trabajando en el campo del tratamiento de las aguas residuales con humedales artificiales eran: Inglaterra, Estados Unidos de América y Australia, debido a la mayor cantidad de recursos económicos que en estos países se destinaban ya sea para la investigación científica en general, o para la investigación relacionada con el tratamiento de aguas residuales en particular (Espinosa Ortiz, 2014).

En México, diversos estudios han demostrado que los humedales artificiales son efectivos como sistemas de depuración, alternativos a métodos convencionales. Sin embargo, su aplicación a escala real es un concepto novedoso hasta cierto punto, con pocos casos de éxito, como el humedal horizontal de Santa Fe de la Laguna en Michoacán construido en 2015 o el humedal horizontal del Centro Ecológico de Akumal construido en los años 90 (Hermosillo et al. 2011).

3.8.1 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN EL MUNDO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Cui et al. (2006), en China, combinaron un sistema de flujo horizontal con uno vertical para tratar el efluente de tanques sépticos. Utilizando las especies *Cyperus*

alternifolius, *Schoenoplectus lacustras*, *Hedychium coronarium* y *Canna indica* y grava y arena como sustrato, obtuvieron como resultado 88% de remoción de la DBO, 98% del fósforo total y una baja remoción del nitrógeno total. También determinaron que el mejor tiempo de permanencia para su sistema era de 3 días por motivos de eficiencia de remoción y eficiencia técnica y económica.

Haghshenas-Adarmanabadi et al. (2015), en Irán, construyeron un sistema de cuatro humedales artificiales híbrido, que constaba cada uno de un humedal subsuperficial horizontal y uno vertical, para tratamiento terciario de agua residual doméstica, utilizando especies como *Phragmites australis*, *Typha latifolia* y *Arundo donax*, usando arena y grava como sustrato. El sistema fue evaluado durante un año completo, obteniendo como resultado remociones de DBO del 85% en promedio, 80% de DQO, 79% de sólidos suspendidos, 78% de nitrógeno amoniacal, 74% de fósforo total y 99% de coliformes fecales. La especie *Phragmites australis* presentó mejores resultados.

En Pakistán Sehar et al. (2013) construyeron un sistema de humedales artificiales híbrido, que se componía de un tanque séptico de 500 L, y 3 humedales de flujo subsuperficial (dos de flujo vertical y uno horizontal). El sustrato utilizado fue grava, arena y suelo y la vegetación consistía en *Paspadilium flavidium*, un pasto común en la región. Las conexiones se realizaron con tubería de PVC y se controló el flujo por medio de válvulas. Se llenó el sistema con agua residual doméstica y se demostró que el sistema híbrido es muy efectivo para reducir la DBO, DQO, cloruros, sulfatos, así como coliformes fecales. También encontraron una relación entre el tiempo de permanencia y la eficiencia de remoción, logrando mejores resultados a los 20 días.

Seong-Heong et al. (2016), construyeron un sistema de humedales conformado por un humedal de flujo vertical seguido de uno de flujo horizontal, en los cuales se probaron las especies *Phragmites australis*, *Phragmites japónica* para el humedal vertical y *Miscanthus sacchariflorus*, *Carex dispalata*, *Juncus effuses* e *Iris pseudacorus*. El objetivo del estudio era estudiar la eliminación del nitrógeno de agua residual doméstica a lo largo de 12 años. Se obtuvieron las mayores remociones en verano (75.2%) para nitrógeno total, y la mayor remoción se dio en humedales verticales, con

lo cual se demostró que esta tecnología tiene la capacidad de tratar el nitrógeno proveniente de las aguas residuales domésticas, por largos períodos de tiempo.

Tuncsiper (2009), en Turquía, construyó un sistema de humedales artificiales híbridos en 3 etapas para la remoción de nutrientes y materia orgánica de aguas residuales domésticas. La primera etapa consistía en un humedal vertical con grava, la segunda de un humedal horizontal con la especie *Iris* y grava y la tercera en un humedal vertical con *Phragmites australis* y grava. Se aplicó recirculación del efluente en radios 1:2 y 1:1. Los resultados que se obtuvieron fueron una remoción del 98% de la DBO, 91% del nitrógeno total, y 69% del fósforo total.

3.8.2 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN MÉXICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Torres et al. (2014) en Ocotlán, Jalisco evaluaron y compararon tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de NKT durante dos años. El primer sistema estuvo compuesto de un humedal subsuperficial de flujo horizontal (HSSFH), seguido de una laguna de estabilización aerobia; el segundo por HSSFH seguido de un humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV); y el tercero, por HSSFV seguido de HSSFH. Los tres sistemas fueron muy efectivos para la nitrificación y registraron incrementos elevados en la concentración de nitratos en los efluentes y eficiencias altas en la remoción de N-NH₄. Estas eficiencias fueron de 76.2% y 78.7%, en el sistema 1, de 87.4% y 92.5% en el sistema 2, y de 82.6% y 97.2% en el sistema 3, en el primer y segundo año, respectivamente. El sustrato utilizado fue tezontle molido, material que se caracteriza por su alta porosidad y las plantas utilizadas fueron *Zantedeschia aethiopica*, *Strelitzia reginae* y *Canna Indica*.

Tejeda y Zurita (2014) utilizaron el mismo sistema que Torres, et al.(2014), para estudiar la remoción de carbamazepina, un producto farmacéutico y confirmaron la capacidad de los humedales para su remoción, incluso mayores que estudios reportados con humedales simples, es decir no híbridos.

Zurita et al. (2015) aplicaron el mismo sistema de los dos casos anteriores para evaluar la desinfección de aguas residuales domésticas utilizando sistemas de humedales

artificiales híbridos, logrando eficiencias de remoción del 99.99% para E. Coli (de 160×10^4 a 0.021×10^4 NMP/100 ml) y 97.16% para coliformes totales (de 250×10^4 a 7.1×10^4 NMP/100 ml), por lo que lograron demostrar que es posible lograr la desinfección natural de aguas residuales por medio de este tipo de tecnologías de tratamiento si se combinan adecuadamente.

Navarro et al. (2014), implementaron un sistema de humedales artificiales híbridos, conformado por dos humedales de flujo vertical y uno de flujo horizontal, utilizando especies vegetales como *Phragmites australis* y *Typha spp.* El sistema se alimentó de agua residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Izúcar de Matamoros, en Tamaulipas. Como resultado, concluyeron que los sistemas híbridos logran reducir la DQO, la turbiedad e incrementar el oxígeno disuelto y que el sistema es fácil de operar.

3.8.3 HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS EN LA REGIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En la región de la Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) no se cuenta con estudios sobre la aplicación de humedales artificiales híbridos para el tratamiento de aguas residuales domésticas ni de algún otro tipo.

Sin embargo, si existen estudios sobre humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal, como el realizado por Tapia et al. (2009) en el estado de Yucatán, en el cual experimentaron con especies vegetales como *Typha latifolia* y *Eleocharis interstincta*, así como variaron los tiempos de permanencia de 1 a 3 días, para el tratamiento de agua residual porcícola. Obtuvieron como resultado remociones del 64-78% de sólidos suspendidos, 52-78% de DQO, 57-74% de DBO, 57-79% de nitrógeno total, 63-75% de nitrógeno amoniacal, 70-81% de nitratos y del 0-28% de fósforo total. El mejor tiempo de permanencia o contacto fue de 3 días.

Utilizando el mismo sistema del estudio anterior, Giacomani et al. (2010), implementaron humedales artificiales para el tratamiento de agua residual doméstica de la zona urbana de la costa de Campeche. Obtuvieron como conclusión que, el

aumentar el tiempo de operación en el sistema, incrementa la eficiencia de remoción de los parámetros de calidad que se analizaron, por lo que los humedales artificiales son una alternativa válida para tratar aguas residuales del sector urbano.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

En la Figura 5 se define de manera general la metodología a seguir para llevar a cabo el estudio planteado.

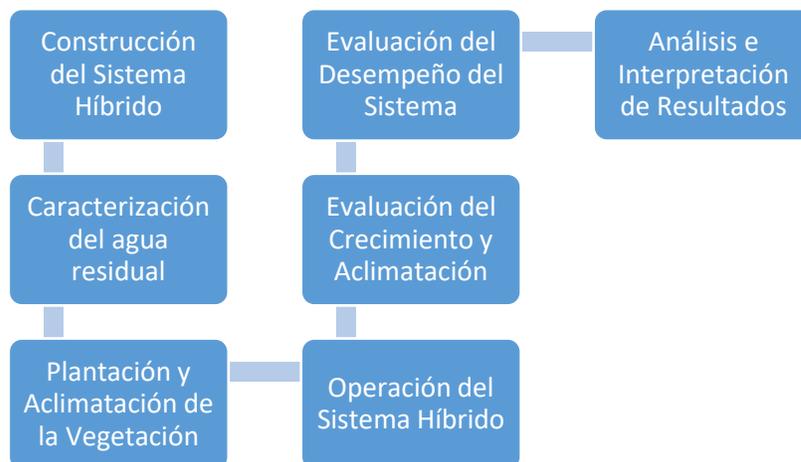


Figura 5 Metodología del Estudio

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES HÍBRIDOS

4.1.1 UBICACIÓN DEL SISTEMA

El sistema se construyó en la antigua Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Carlos, propiedad de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY). Esta planta está ubicada en la Ciudad de Mérida, Yucatán, y se encuentra actualmente en desuso debido a que el agua residual que llega al cárcamo se bombea hasta la PTAR del fraccionamiento Altabrisa.

4.1.2 CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Se construyeron 3 humedales artificiales híbridos, formados cada uno por un humedal de flujo horizontal subsuperficial (HSSFH) y un humedal de flujo vertical subsuperficial

(HSSFV), los cuales son alimentados por un tanque séptico que ayuda a remover una fracción de los sólidos suspendidos. A su vez el tanque séptico es alimentado por el cárcamo de la PTAR San Carlos.

Como tanque séptico se utilizó un tinaco de polietileno con capacidad de 1100 litros. Los humedales horizontales se fabricaron con peceras de vidrio de 1 cm de espesor, y dimensiones de 1.5 m de largo x 0.4 m de ancho x 0.4 m de profundidad. Los humedales verticales se fabricaron con peceras de vidrio de 1 cm de espesor y dimensiones de 0.6 m de largo x 0.4 m de ancho x 0.7 m de profundidad. Todas las peceras cuentan con perforaciones en la salida y la entrada de 1", así como accesorios denominados *bulkheads* para la conexión de la tubería, como se muestra en la Figura 6 y la Figura 7.

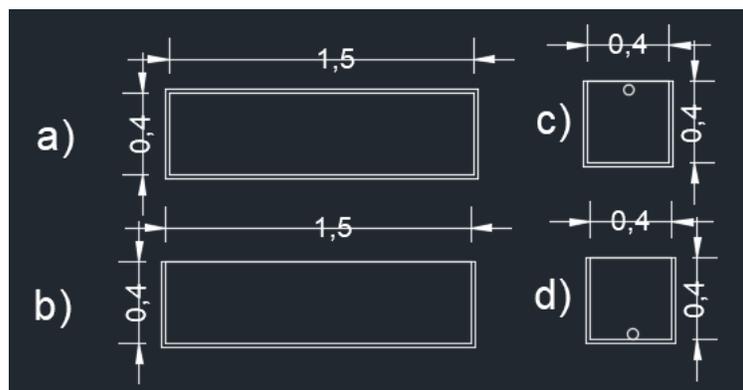


Figura 6 HSSFH Vistas: a) Planta b) Lateral c) Delanterera d) Trasera

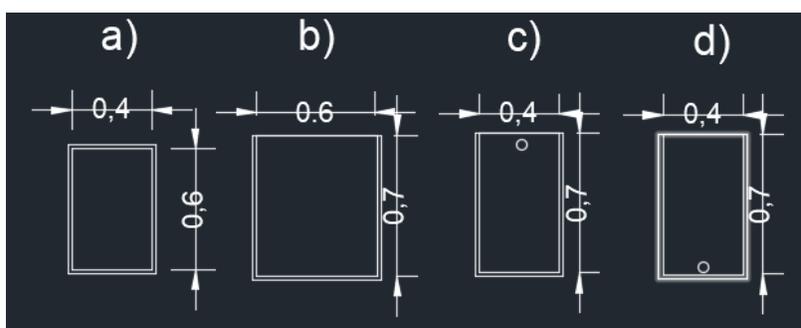


Figura 7 HSSFV Vistas: a) Planta b) Lateral c) Delanterera d) Trasera

Para alimentar el tanque séptico, se utilizó una bomba sumergible de agua sucia de 1 HP, conectada con tubería de PVC Hidráulico cédula 40 de 2" hasta el tinaco. La bomba se alimenta por medio de cable de uso rudo de calibre 3x12, cuya electricidad

es regulada por una pastilla termomagnética de 16 amperes, conectada a un centro de carga. El centro de carga se alimenta del tablero principal de la planta por medio de cable de uso rudo calibre 3x10.

Para alimentar los humedales, a la mitad del tanque séptico se instaló una bomba sumergible de 1 HP y se colocaron tubería y accesorios de PVC Hidráulico cédula 40 de 1" y válvulas solenoides (válvulas que se abren o cierran por medio de electricidad) para regular el paso del flujo a la salida del tanque, así como a la entrada y salida de cada humedal. También se cuentan con llaves de nariz, para la toma de muestras a la salida y entrada de cada humedal, así como a la salida del tanque séptico.

A la salida de cada sistema híbrido se colocaron contenedores de plástico de 200 litros para la recolección del efluente. En cada recipiente hay una bomba sumergible de agua limpia de ½ HP, que se alimenta por medio de cable de uso rudo de calibre 3x12, cuya electricidad es regulada por una pastilla termomagnética de 16 amperes, conectada a un centro de carga, la cual dirige el agua de regreso al cárcamo de la planta y recirculará en futuros estudios el efluente de regreso al humedal horizontal, dependiendo si las válvulas estén abiertas o cerradas. Las válvulas solenoides fueron alimentadas por cable de uso rudo de calibre 3x12, y conectadas todas en un mismo circuito regulado por una pastilla termomagnética de 16 amperes. Para el control individual de cada válvula se contó con apagadores. El diagrama general del sistema se muestra en la Figura 8.

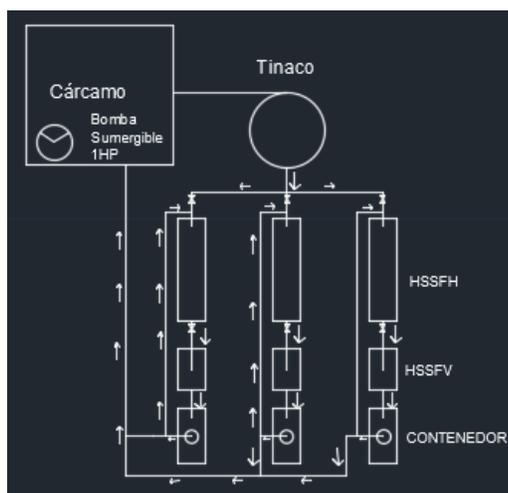


Figura 8 Diagrama del Sistema y Sentido del Flujo

Los humedales de flujo horizontal se colocaron a una altura de 1.5 metros del suelo por medio de una base fabricada con tubular de acero, y los humedales de flujo vertical se colocaron a una altura de 0.6 metros del suelo con una base del mismo material, para que el sistema funcione por gravedad.

El medio de soporte seleccionado es grava y arena de distintos tamaños, distribuidos según las recomendaciones de las Naciones Unidas (2008):

- En los humedales horizontales se colocó grava de tamaño entre 40-80 mm en los extremos y grava de tamaño entre 5-20 mm en la parte interior del humedal, como se muestra en la Figura 9.
- El medio de soporte en los humedales verticales está compuesto por varias capas de arena y grava en distintos tamaños, como se muestra en la Figura 10.

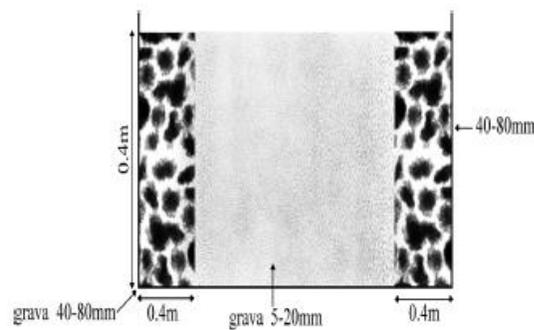


Figura 9 Distribución del Medio de Soporte en el HSSFH

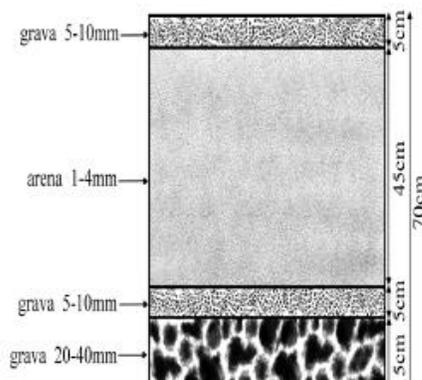


Figura 10 Distribución del Medio de Soporte en el HSSFV

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Para realizar la caracterización del agua residual se hizo una campaña de tres muestreos, distribuidos durante los dos primeros meses del proyecto, durante la cual se analizó el influente de la PTAR San Carlos. Para ello se determinaron distintos parámetros, utilizando los métodos establecidos por la APHA (1985) y en cumplimiento con las Normas Mexicanas correspondientes. Dichos parámetros se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12 Parámetros Físicoquímicos y Biológicos a Determinar en Aguas Residuales

Parámetro	Método	Norma
pH	Mediciones <i>In-situ</i>	NMX-AA-008
DQO	Método Espectrofotométrico, reflujó cerrado	NMX-AA-030
DBO ₅	Método de Prueba a los 5 días	NMX-AA-028
COT	Combustión u Oxidación	N/A
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Método Gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	Método Gravimétrico	NMX-AA-034
NKT	Método de Digestión	NMX-AA-026
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄ -N)	Método titulométrico	NMX-AA-026
Nitratos (NO ₃ -N)	Método HACH	N/A
Fósforo (PO ₄)	Método Colorimétrico	NMX-AA-029
Coliformes Totales (CT)	Método de Filtración en Membrana	NMX-AA-102
E. Coli	Método de Filtración en Membrana	N/A

Los muestreos fueron compuestos, es decir, tomando una muestra cada 3 horas a partir de las 8:00 a.m. hasta las 8:00 p.m, extrayendo un volumen proporcional hasta lograr un volumen final de 2 litros.

4.3 PLANTACIÓN Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN

Las especies de vegetación seleccionadas para este estudio fueron *Typha Dominguensis* y *Saggitaria Lancipholia*. La primera especie es una planta perteneciente al género *Typha*, para el cual varios estudios han demostrado que se adaptan bien al agua residual y los humedales que la contienen presentan buenas eficiencias (Navarro et al. 2014; Tapia et al. 2009). La segunda especie no ha sido estudiada en la región, sin embargo, es una especie macrófita nativa, la cual fue seleccionada por su aspecto estético; por lo que se estudió la eficiencia de remoción de contaminantes que aporta al sistema.

La configuración de los 3 sistemas de humedales híbridos es la siguiente:

- El primer humedal híbrido está compuesto por un humedal horizontal, seguido de un humedal vertical. En ambos humedales se tiene presente vegetación de la especie *Typha Dominguensis*.
- El segundo humedal híbrido está compuesto por un humedal horizontal, seguido de un humedal vertical. En ambos humedales se tiene presente vegetación de la especie *Saggitaria lancipholia*.
- El tercer humedal híbrido está compuesto por un humedal horizontal, seguido de un humedal vertical. Éste es un humedal de control, por lo que permanece sin plantación, sólo con presencia del medio de soporte

Los humedales horizontales se dividieron en 12 cuadrantes de 20x25 cm, dejando libres los dos primeros y dos últimos, ya que dichos cuadrantes contienen las rocas que evitarán el taponamiento del sistema. En cada cuadrante se plantó un espécimen, alcanzando un total de 8 plantas. Los humedales verticales se dividieron en 6 cuadrantes de 25x20 cm, en los cuales se plantó un espécimen alcanzando un total de 6 plantas. En la Figura 11 se ilustra la configuración mencionada.



Figura 11 División de los humedales en cuadrantes

La plantación de la vegetación se realizó cavando en el humedal ya con sustrato (medio de soporte) un hueco con profundidad de 15 cm. Posteriormente, se eliminaron las raíces dañadas de la planta, y se plantaron en ángulo de 45°C a una profundidad tal que al menos un nodo de la raíz esté enterrado 4 cm, como se recomienda en las Naciones Unidas (2008). Finalmente, se llenó con agua el sistema de tal manera que el nivel del agua se encuentre por lo menos 2 cm por encima del sustrato, lo anterior durante todo el período de adaptación de las plantas.

Después de la plantación, se operó el sistema durante 1 mes para lograr la aclimatación de las plantas, siguiendo un plan de riego en el cual se comenzó regando con mayor cantidad de agua potable y menor cantidad de agua residual, hasta alcanzar un 100% de riego con agua residual en la última semana de aclimatación, como se describe en la Tabla 13. Durante este periodo, el agua se mantuvo en el sistema 72 horas en cada humedal. No se tomaron muestras.

Tabla 13 Esquema de Riego de los Humedales en el Período de Aclimatación

Semana	% Agua potable	% Agua residual
1	75	25
2	50	50
3	25	75
4	0	100

4.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

El sistema de humedales híbridos se operó en modo batch, es decir, en cada ciclo el sistema se llena de agua y se cierran las válvulas, posteriormente, se deja transcurrir el tiempo de permanencia establecido y, finalmente, se drena el sistema. Se eligió esta modalidad de operación ya que el flujo del agua residual en una vivienda individual no es suficiente para que el humedal se opere de modo continuo.

Se evaluaron dos tiempos de permanencia en cada etapa del sistema: 2 y 4 días. Para operar el sistema con el tiempo de 2 días, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se activó la bomba del cárcamo para alimentar el tanque séptico.
2. Se esperó una hora para la sedimentación dentro del tanque séptico.
3. Se activó la bomba del tanque séptico para alimentar los humedales horizontales y se tomó la muestra.
4. Después de 1 día se drenó la mitad del contenido de agua de los humedales horizontales hacia los humedales verticales y se llenó con agua residual proveniente del tanque séptico.
5. Después de 2 días se drenó la mitad restante de los humedales horizontales hacia los humedales verticales y se tomó muestra del efluente.
6. Después de 3 días se drenó la mitad del contenido de agua de los humedales verticales y se llenó con agua residual proveniente del humedal horizontal.
7. Después de 4 días se drenó la mitad restante de los humedales verticales y se tomó muestra del efluente.

Para operar el sistema con el tiempo de 4 días, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se activó la bomba del cárcamo para alimentar el tanque séptico.
2. Se esperó una hora para la sedimentación dentro del tanque séptico.
3. Se activó la bomba del tanque séptico para alimentar los humedales horizontales y se tomó muestra.
4. Después de 1 día se drenó un cuarto del contenido de agua de los humedales horizontales hacia los humedales verticales y se llenó con agua residual proveniente del tanque séptico.

5. Después de 2 días se drenó el segundo cuarto del contenido de agua de los humedales horizontales hacia los humedales verticales y se llenó con agua residual proveniente del tanque séptico.
6. Después de 3 días se drenó el tercer cuarto del contenido de agua de los humedales horizontales y se llenó con agua residual proveniente del tanque séptico.
7. Después de 4 días se drenó el último cuarto del contenido de agua de los humedales horizontales y se tomó muestra.
8. Después de 5 días se drenó el primer cuarto del contenido de agua de los humedales verticales y se llenó con agua proveniente de los humedales horizontales.
9. Después de 6 días se drenó el segundo cuarto del contenido de agua de los humedales verticales y se llenó con agua proveniente de los humedales horizontales.
10. Después de 7 días se drenó el tercer cuarto del contenido de agua de los humedales verticales y se llenó con agua proveniente de los humedales horizontales.
11. Después de 8 días se drenó el último cuarto del contenido de agua de los humedales verticales y se tomó muestra del efluente.

Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14 Parámetros de Operación del Sistema

Tiempo de permanencia (d)	2	4
Modo de operación	Batch	Batch
Volumen Efectivo Humedal Horizontal (L)	84	84
Volumen Efectivo Humedal Vertical (L)	58.8	58.8

El volumen efectivo de agua en cada humedal se calcula con la ecuación 7:

Ecuación 7
$$V_{efectivo} = \frac{A \cdot d \cdot \varepsilon}{1000}$$

Donde:

$V_{efectivo}$ = volumen efectivo de agua en el humedal (L)

A = área superficial del humedal (m^2)

d = profundidad del humedal (m)

ε = Porosidad del sustrato (%)

4.5 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN

A partir de la plantación y a lo largo de la duración del estudio, el crecimiento de las plantas se monitoreó bimestralmente según los parámetros altura y porcentaje de cobertura, para evaluar la aclimatación.

Determinación del parámetro altura de la planta

El parámetro de altura se determinó de la siguiente manera:

- Los humedales horizontales contienen 8 cuadrantes y los verticales 6. Se seleccionan aleatoriamente 3 cuadrantes en los humedales horizontales y 2 en los verticales.
- Se determina la altura de todas las plantas contenidas en los cuadrantes seleccionados, midiendo desde la base de las peceras hasta la parte más alta de la planta.
- Se registran los resultados y se analizan.

Determinación del parámetro porcentaje de cobertura

El porcentaje de cobertura fue monitoreado mediante el procesamiento de imágenes digitales, ejecutando análisis basados en la colorimetría para determinar la superficie cubierta utilizando el software CobCal (Ferrari et al. , 2006).

El procedimiento es el siguiente:

- Se toma una fotografía de la superficie del humedal en cuestión.
- Se carga la fotografía al programa.

- Se determina el área de la fotografía a analizar.
- Se selecciona uno o dos colores representativos de la vegetación contenida en la fotografía (color positivo) y un color representativo del suelo (color negativo).
- Se selecciona el nivel de precisión, es decir la cantidad de píxeles a muestrear. El nivel alto significa medir todos los píxeles en el área de interés.

4.6 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Para evaluar el desempeño del sistema, una vez que el período de aclimatación de las especies de plantas finalizó, se realizaron muestreos según el procedimiento descrito en la sección 4.4.5, durante 3 meses en los cuales el sistema se mantuvo en operación.

Se tomaron muestras de los efluentes de cada etapa, es decir: a la salida del tanque séptico, a la salida de cada humedal horizontal y a la salida de cada humedal vertical. Se midieron los parámetros mencionados en la Tabla 12, siguiendo los métodos estándar de la APHA (1985). Durante los primeros dos meses de monitoreo se evaluó el tiempo de permanencia de 4 días y el último mes el de 2 días.

Para optimización de los recursos y reactivos, la frecuencia de análisis de los parámetros fisicoquímicos se siguió como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15 Frecuencia de Análisis de Parámetros Fisicoquímicos

Parámetro	Frecuencia
DQO (mg/l de O₂)	Todos los muestros
DBO₅ (mg/l de O₂)	Todos los muestros
COT (mg/l)	Cada 2 muestreos
NKT (mg/l)	Todos los muestros
NH₄ (mg/l)	Todos los muestros
NO₃ (mg/l)	Todos los muestros
PO₄ (mg/l)	Todos los muestros
C. Totales (UFC/100 ml)	Cada 2 muestreos
E. coli (UFC/100 ml)	Cada 2 muestreos
Sólidos Totales (mg/l)	Todos los muestros
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	Todos los muestros
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	Todos los muestros

Se evaluó la influencia del tiempo de permanencia en la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos en los tres sistemas de

humedales artificiales híbridos. La eficiencia de remoción se calculó para los parámetros medidos con la Ecuación 4 (Sección 3.5).

Asimismo, se monitoreó la evapotranspiración. Para ello se utilizaron y compararon dos métodos: el método empírico utilizando la ecuación de Turc (Ecuaciones 10 y 11) y el método directo de balance de masas.

$$ET = 0.013 \left(\frac{Ta}{Ta+15} \right) (Rs + 50) \text{ cuando } RH \text{ promedio es mayor a } 50\%$$

Ecuación 10

$$ET = 0.013 \left(\frac{Ta}{Ta+15} \right) \left[\frac{1+(50-RH)}{70} \right] * (Rs + 50) \text{ cuando } RH \text{ promedio es menor a } 50\%$$

Ecuación 11

Donde:

ET = tasa de evapotranspiración diaria (mm/d)

Ta = temperatura diaria promedio (°C)

Rs = radiación solar (W/m²)

RH = humedad relativa del día (%)

Para el Método de Turc, se tomaron valores de temperatura, humedad relativa y radiación solar aportados por la estación meteorológica del CINVESTAV, la cual se encuentra cercana al sitio y cuenta con todos los datos necesarios.

Para la aplicación del método directo, se instalaron tubos de acrílico a la salida de cada humedal para observar el nivel. Inicialmente, se midió la altura a la cual se llenó de agua el humedal, el cual es el nivel de operación, y se graduó cada tubo marcando cada 5 litros la disminución del nivel. Después de realizar este procedimiento, diariamente se registró la distancia que disminuyó el nivel del agua en el humedal.

Con los resultados de la medición de la evapotranspiración podemos calcular el coeficiente de cultivo Kc con la Ecuación 12:

Ecuación 12

$$Kc = \frac{Etc}{Etr}$$

Donde:

Kc= coeficiente de cultivo (adimensional)

Etc= Evapotranspiración medida por el método directo en cada humedal (mm/d)

Etc= Evaporación estimada con el método de Turc (mm/d)

4.7 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación de los resultados obtenidos en cuanto al crecimiento de las plantas (altura) y el porcentaje de cobertura se realizó mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA de un factor, utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1.

La evaluación del desempeño del sistema y la interpretación de dichos resultados se realizó mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA, con el programa Statgraphics Plus 5.1, utilizando uno y dos factores, para evaluar qué influencia tuvieron las variables tiempo de permanencia y especie de planta seleccionada en la eficiencia de remoción de cada uno de los parámetros monitoreados, así como la interacción de dichos factores.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este Capítulo se presentan los resultados del presente estudio, en cuanto a las distintas etapas de la metodología se refiere como: la caracterización del agua residual, la evaluación de la aclimatación de las plantas y la evaluación del desempeño del sistema. Los resultados se analizan estadísticamente mediante un análisis ANOVA y se discute el porqué de ellos y finalmente, se comparan con estudios anteriores.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

La campaña de muestreos para la caracterización del agua residual de la PTAR San Carlos se realizó durante dos meses, con un total de 3 muestreos. Cada muestreo se realizó de manera compuesta, recolectando un volumen final de 2 litros, como se menciona en la sección 4.1.2. Los promedios obtenidos, junto con su desviación estándar (D.E.), para la caracterización se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16 Resultados Generales de la Campaña de Caracterización del Agua Residual

<u>Parámetro</u>	<u>Promedio ± D.E.</u>
DQO (mg/l de O ₂)	856.61 ± 279.67
DBO ₅ (mg/l de O ₂)	329.58 ± 40.53
COT (mg/l)	70.08 ± 7.37
NKT (mg/l)	76.04 ± 9.96
NH ₄ (mg/l)	49.60 ± 8.72
NO ₃ (mg/l)	0.15 ± 0.05
PO ₄ (mg/l)	4.49 ± 1.35
C. Totales (UFC/100 ml)	3.87 E+07 ± 6.03 E+06
E. Coli	1.6 E+07 ± 3.61 E+06
Sólidos Totales (mg/l)	1643.67 ± 683.44
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	674.83 ± 453.29
S.S. Fijos (mg/l)	61.67 ± 39.26
S.S. Volátiles (mg/l)	613.17 ± 421.31
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	968.83 ± 250.71

Al comparar la Tabla 16 con la Tabla 4, en la cual Metcalf & Eddy (1985) enlistan la composición típica de las aguas residuales domésticas, se puede concluir que el agua residual de la PTAR San Carlos tiene una concentración media-fuerte de DQO y DBO₅ y débil de COT, en cuanto a materia orgánica se refiere. Con relación a las especies nitrogenadas, tiene una concentración fuerte de NKT y NH₄ y típica de NO₃. Así mismo, la concentración de fósforo se ubica en un rango débil y finalmente, con respecto a los sólidos se encuentra una fuerte concentración. Los valores obtenidos de concentraciones de microorganismos patógenos se encuentran dentro de los rangos típicos mencionados en la literatura (Tabla 4).

5.2 CRECIMIENTO Y ACLIMATACIÓN DE LA VEGETACIÓN

5.2.1 ALTURA DE LA PLANTA

Las mediciones de altura de la planta se realizaron bimestralmente, en los meses de febrero, abril y junio, seleccionando 3 cuadrantes aleatorios: el 1, 6, y 8 para los humedales horizontales y 1, 4 y 5 para los verticales (ver Figura 11).

Como se puede observar en los resultados reportados en la Tabla 17, la planta *Sagittaria lancipholia* tuvo un crecimiento promedio del 81.21 % \pm 5.35 % y 187.67 % \pm 110.62 %, alcanzando alturas promedio de 61 \pm 2.07 cm y 67.3 \pm 9.45 cm, en los humedales horizontal y vertical, respectivamente. La altura de esta especie se encuentra cercana e incluso rebasa la reportada por la Universidad de Florida (2016), de hasta 60.96 cm (2 pies). La aclimatación de esta especie fue tal que se llegó a dar el florecimiento en ambos humedales, como se muestra en la Figura 12.

A su vez, la planta *Typha dominguensis* tuvo un crecimiento del 143.3 % \pm 49.01 % y 214.6% \pm 21.81 % alcanzando alturas promedio de 148.7 \pm 16.42 cm y 219.3 \pm 5.51 cm en los humedales horizontal y vertical, respectivamente. La altura máxima reportada por la CONABIO (2007) es de 2.5 metros, por lo que se espera que esta especie continúe su crecimiento.

De los resultados se puede inferir que la especie *Typha dominguensis* presenta un mayor crecimiento en los humedales. También se puede concluir que hay un mayor crecimiento de las plantas en los humedales verticales, lo cual se ve reflejado en la

reducción de las concentraciones de fósforo y diferencia de concentraciones de nitratos entre los humedales con plantas y el de control, como se discute en la sección 5.3.3

Tabla 17 Crecimiento de Plantas en Humedales Horizontales y Verticales

ESPECIE	ALTURA PROMEDIO (cm)				% de CRECIMIENTO			
	HORIZONTAL		VERTICAL		HORIZONTAL		VERTICAL	
	Promedio	D.E	Promedio	D.E	Promedio	D.E	Promedio	D.E
<u>SAGITTARIA LANCIFOLIA</u>	61.00	2.1	67.3	9.4	81.21%	5.35%	187.67%	110.62%
<u>TYPHA DOMINGUENSIS</u>	148.7	16.4	219.3	5.5	143.33%	49.01%	214.62%	21.81%



Figura 12 Florecimiento de la especie *Sagittaria lancifolia*

5.2.2 PORCENTAJE DE COBERTURA

El porcentaje de cobertura fue medido por medio del procesamiento de imágenes tomadas en febrero, abril y junio, utilizando el software CobCal (Ferrari, et al., 2006). La especie *Sagittaria lancifolia* tuvo un aumento del 69% al 94.5% de cobertura en el humedal horizontal, y del 24% al 44% en el humedal vertical, como se muestra en la

Tabla 18. Las Figuras 13 y 14 muestran la evolución de la cobertura de los humedales horizontal y vertical por parte de esta especie.

Tabla 18 Porcentaje de Cobertura: *Sagittaria lancifolia*

PORCENTAJE DE COBERTURA					
<u>SAGITTARIA LANCIFOLIA</u>					
HORIZONTAL			VERTICAL		
FEBRERO	ABRIL	JUNIO	FEBRERO	ABRIL	JUNIO
69%	94.5%	90.8%	24%	44%	77%



Figura 13 Evolución de la Cobertura en el Humedal Horizontal: *Sagittaria lancifolia*



Figura 14 Evolución de la Cobertura en el Humedal Vertical: *Sagittaria lancifolia*

La especie *Typha dominguensis* tuvo un aumento del 27.6% al 81.8% de cobertura en el humedal horizontal, y del 26% al 96% en el humedal vertical, como se muestra en la Tabla 19. Las Figuras 15 y 16 muestran la evolución de la cobertura de los humedales horizontal y vertical por parte de esta especie.

Tabla 19 Porcentaje de Cobertura: *Typha dominguensis*

PORCENTAJE DE COBERTURA					
TYPHA DOMINGUENSIS					
HORIZONTAL			VERTICAL		
FEBRERO	ABRIL	JUNIO	FEBRERO	ABRIL	JUNIO
27.60%	81.80%	87.90%	26%	85.70%	96%



Figura 15 Evolución de la Cobertura en el Humedal Horizontal: *Typha dominguensis*



Figura 16 Evolución de la Cobertura en el Humedal Vertical: *Typha dominguensis*

Debido al comportamiento en cuanto a crecimiento en altura y porcentaje de cobertura, se puede concluir que ambas especies se aclimataron de manera óptima en el sistema de humedales híbridos, ya que la especie *Sagittaria lancifolia* alcanzó la altura promedio reportada y la especie *Typha dominguensis* se encuentra en constante crecimiento y próxima a alcanzar las alturas máximas reportadas.

5.3 DESEMPEÑO DEL SISTEMA

5.3.1 DESEMPEÑO DEL TANQUE SÉPTICO

La instalación de un tinaco que funcione como tanque séptico se hizo con el objetivo de dar un pretratamiento al agua residual cruda proveniente del cárcamo de rebombeo de la PTAR San Carlos, para eliminar la mayor cantidad de sólidos suspendidos, evitar posibles daños a equipos como bombas y válvulas, y evitar la colmatación del medio de soporte de los humedales horizontales. Aunado a este objetivo, los tanques sépticos logran remover cierto porcentaje de la materia orgánica. La Tabla 20 muestra los resultados de la comparación del desempeño de este sistema.

En cuanto a materia orgánica se refiere, el tanque séptico instalado logró una importante remoción al alcanzar un 77% de remoción de DQO y 73% de remoción de DBO₅. El COT se mantuvo en concentraciones similares entre el cárcamo y el tanque séptico. La remoción de materia orgánica en este sistema se debe tanto a la eliminación de materia orgánica particulada provocada por la sedimentación, como a la degradación por parte de microorganismos presentes en su interior.

En cuanto a especies nitrogenadas, se puede observar que no hay una gran remoción de NKT (18%) y si un aumento del NH₄ (8%). Esto indica que el nitrógeno orgánico que llega al sistema desde el cárcamo sufre un proceso de amonificación, por lo que se remueve en concentración, pero es transformado a amonio. Los nitratos aumentan en concentración en el tanque séptico (81%), sin embargo, se mantienen aún en concentraciones bajas (< 1 mg N-NO₃/l).

Existe una remoción de microorganismos patógenos, con un 53% de coliformes totales y 72% de E. Coli.

Finalmente, en cuanto a los sólidos se refiere, hay un 39% de remoción de ST, 87% de SST y un 3% de SDT. Con estos resultados se puede concluir que se logra el objetivo de remover gran parte del material suspendido. La fracción suspendida que sale del tanque séptico, en su mayoría fracción volátil, representa contenido orgánico en el efluente y la fracción con menor concentración (fracción fija) representa contenido inorgánico en el efluente.

Tabla 20 Desempeño del Tanque Séptico

PARÁMETRO	CÁRCAMO		TANQUE SÉPTICO		REMOCIÓN (%)
	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	
DQO (mg/l)	856.61	279.67	229.92	21.32	73.2%
DBO ₅ (mg/l)	329.58	40.53	100.54	9.38	69.5%
NKT (mg/l)	76.04	9.96	68.30	6.68	10.2%
N-NH ₄ (mg/l)	49.60	8.72	54.22	7.65	-9.3%
N-NO ₃ (mg/l)	0.15	0.05	0.17	0.13	-11.1%
PO ₄ (mg/l)	4.49	1.35	6.39	1.28	-42.3%
COT (mg/l)	70.08	7.37	93.76	10.58	-33.8%
C. Totales (UFC/100 ml)	3.87E+07	6.03E+06	1.91E+07	1.08E+05	50.6%
E. coli (UFC/100 ml)	1.60E+07	3.61E+06	1.96E+06	4.03E+04	87.8%
ST (mg/l)	1643.67	683.44	1001.87	86.56	39.0%
SST(mg/l)	674.83	453.29	191.55	14.42	71.6%
SDT (mg/l)	613.17	39.26	843.73	102.77	-37.6%

Los SDT se determinaron como la resta de los ST menos los SST.

5.3.2 REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO

Las Tablas 21 y 22 muestran los resultados del monitoreo de la materia orgánica durante dichos muestreos.

Tabla 21 Resultados del Monitoreo de la Materia Orgánica en los Sistemas de Humedales Híbridos: Tiempo de Permanencia de 2 días

PARÁMETROS		DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		COT (mg/L)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITARIA LANCIFOLIA	FOSA	290.52	30.36	125.93	39.99	104.07	8.38
	HORIZONTAL	42.29	23.06	12.52	5.01	32.03	11.03
	VERTICAL	16.21	13.35	5.59	5.46	10.26	8.66
TYPHA DOMINGUENSIS	FOSA	290.52	30.36	125.93	39.99	104.07	8.38
	HORIZONTAL	66.89	40.73	13.44	6.56	50.36	3.27
	VERTICAL	18.78	16.94	6.66	7.40	7.98	5.86
CONTROL	FOSA	290.52	30.36	125.93	39.99	104.07	8.38
	HORIZONTAL	88.12	39.19	26.54	11.02	40.78	6.64
	VERTICAL	19.11	11.73	7.43	5.71	10.00	32.52

Tabla 22 Resultados del Monitoreo de la Materia Orgánica en los Sistemas de Humedales Híbridos: Tiempo de Permanencia de 4 días

PARÁMETROS		DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		COT (mg/L)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITTARIA LANCIFOLIA	FOSA	209.34	23.30	89.12	28.29	73.05	9.02
	HORIZONTAL	40.88	24.61	19.29	13.88	17.74	11.03
	VERTICAL	12.69	9.45	3.35	4.07	4.08	1.66
TYPHA DOMINGUENSIS	FOSA	209.34	23.30	89.12	28.29	73.05	9.02
	HORIZONTAL	47.18	22.41	19.25	9.19	19.20	10.32
	VERTICAL	12.80	4.92	3.89	2.02	4.69	1.93
CONTROL	FOSA	209.34	23.30	89.12	28.29	73.05	9.02
	HORIZONTAL	54.34	7.81	15.64	2.26	20.35	12.22
	VERTICAL	10.55	45.77	2.86	27.99	3.89	1.16

Las Tablas 23 y 24 muestran los porcentajes de remoción alcanzados para cada uno de los parámetros analizados, para ambos tiempos de permanencia.

Tabla 23 Porcentajes de Remoción de Materia Orgánica alcanzados con el tiempo de permanencia de 2 días

PARÁMETRO			DQO (%)	DBO ₅ (%)	COT (%)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-			
SAGITTARIA LANCIFOLIA	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	85.78%	88.15%	70.47%
		D.E.	3.99%	3.48%	4.25%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	94.65%	95.42%	91.20%
		D.E.	3.99%	3.48%	4.25%
TYPHA DOMINGUENSIS	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	77.39%	87.94%	59.34%
		D.E.	13.43%	6.70%	14.19%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	93.70%	94.46%	93.38%
		D.E.	5.40%	4.98%	5.78%
CONTROL	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	69.93%	77.78%	59.13%
		D.E.	14.15%	8.62%	19.24%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	93.52%	92.34%	90.94%
		D.E.	3.81%	8.87%	3.82%

Tabla 24 Porcentajes de Remoción de Materia Orgánica alcanzados con el tiempo de permanencia de 4 días

PARÁMETRO			DQO (%)	DBO ₅ (%)	COT (%)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-			
SAGITTARIA LANCIFOLIA	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	76.12%	76.56%	63.30%
		D.E.	10.96%	14.11%	12.57%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	93.24%	95.87%	92.54%
		D.E.	3.90%	2.29%	2.75%
TYPHA DOMINGUENSIS	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	72.43%	76.88%	72.55%
		D.E.	16.13%	15.50%	16.81%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	93.36%	95.19%	93.37%
		D.E.	5.11%	5.13%	3.02%
CONTROL	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	69.54%	79.27%	71.06%
		D.E.	12.44%	12.85%	20.09%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	93.50%	95.47%	94.63%
		D.E.	3.38%	3.73%	1.70%

DQO

La DQO proveniente del efluente de la fosa séptica tuvo una concentración promedio de 290.52 ± 30.36 mg/L durante la evaluación del tiempo de permanencia de 2 días y para el tiempo de remoción de 4 días tuvo una concentración de 209.34 ± 23.30 mg/L. Para el tiempo de permanencia de 4 días, se lograron remociones similares en los tres sistemas de humedales híbridos, ya que el de la especie *Sagittaria lancifolia* logró remociones del 76.12% y 93.24%, el de la especie *Typha dominguensis* del 72.43 y 93.36%, y el de control de 69.54% y 93.5% en las etapas horizontal y vertical respectivamente.

Para el tiempo de permanencia de 2 días se alcanzaron remociones mayores debido a la mayor concentración de entrada proveniente de la fosa séptica, alcanzando para la especie *Sagittaria lancifolia* un 85.78% y 94.65%, para *Typha dominguensis* un 77.39% y 93.7% y en el humedal de control un 69.93% y 93.52% de remoción respectivamente en las etapas horizontal y vertical.

La Figura 17 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, para la remoción de DQO.

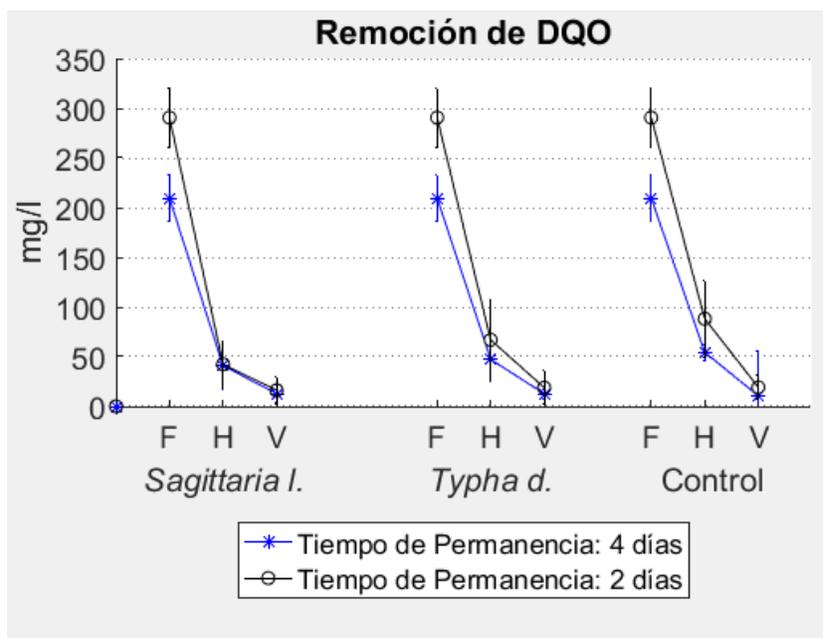


Figura 17 Remoción de DQO en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)

DBO₅

El monitoreo de la DBO₅ durante el tiempo de estudio arrojó un resultado similar en cuanto a comportamiento con respecto a la DQO. Para el tiempo de permanencia de 2 días se alcanzaron remociones mayores que en el de 4 días, ya que se lograron porcentajes de remoción del 88.15% y 95.42% en el humedal híbrido con la especie *Sagittaria lancifolia*, 87.94% y 94.46% en el de la especie *Typha dominguensis* y 77.78% y 92.34% en el de control, en las etapas horizontal y vertical respectivamente, los cuales se pueden contrastar con los del tiempo de permanencia de 4 días de 76.56% y 95.87% en el humedal híbrido con la especie *Sagittaria lancifolia*, 76.88% y 95.19% en el de la especie *Typha dominguensis* y 79.27% y 95.47% en el de control, en las etapas horizontal y vertical respectivamente. La Figura 18 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, para la remoción de DBO₅.

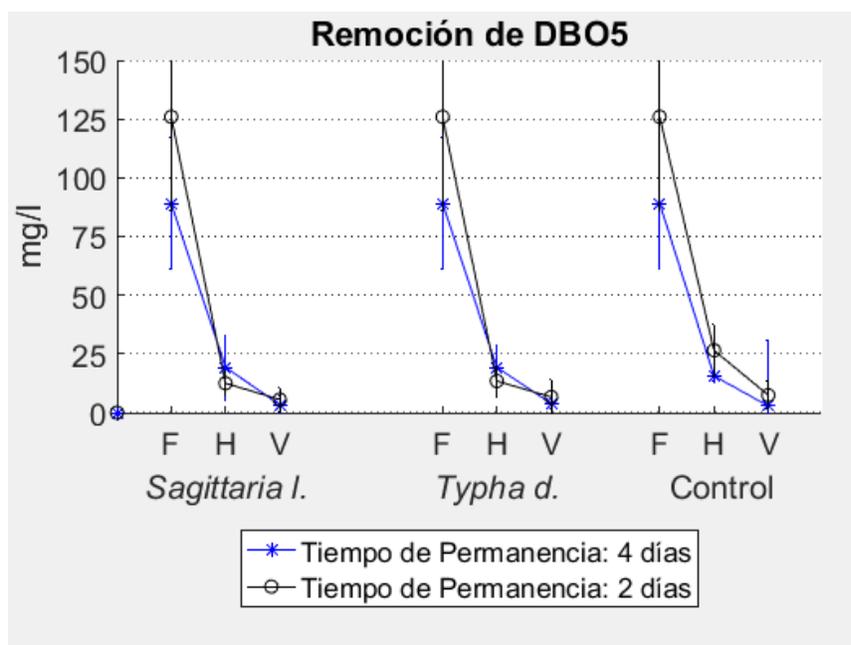


Figura 18 Remoción de DQO en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)

COT

Al igual que para los parámetros DQO y DBO₅, para el COT se alcanzó una degradación parcial (aproximadamente 60-70%) en los humedales horizontales para ambos tiempos de permanencia, y remociones globales en todo el sistema mayores al 90% en el efluente.

Durante la campaña de monitoreo del tiempo de permanencia de 2 días, el humedal híbrido que contiene la especie *Sagittaria lancifolia* logró una degradación total del 91.20% del COT, el que contiene la especie *Typha dominguensis* un 93.38% y el de control un 90.94% de remoción, como muestra la Tabla 23.

En la campaña del tiempo de permanencia de 4 días, se obtuvieron resultados similares, alcanzando un 92.54% de remoción en el humedal con la especie *Sagittaria lancifolia*, 93.37% en el de la especie *Typha dominguensis* y un 94.63% en el de control, como muestra la Tabla 24.

La Figura 19 muestra el comportamiento de este parámetro en función de la etapa del humedal, la especie de planta y el tiempo de permanencia.

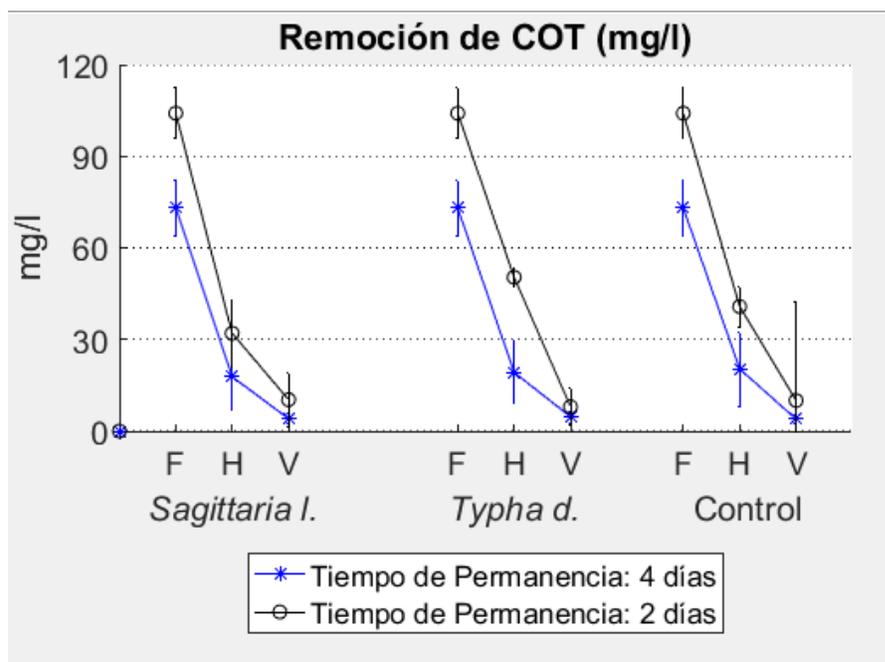


Figura 19 Remoción de COT en los Sistemas de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)

Discusión de Resultados: Materia Orgánica

Los resultados del estudio mostraron que en los tres sistemas de humedales híbridos y en las dos campañas de estudio se da la efectiva degradación de la materia orgánica, medida bajo los parámetros de DQO, DBO₅ y COT.

La degradación de materia orgánica en los sistemas de humedales híbridos se da por varios procesos como los físicoquímicos (sedimentación, filtración), así como procesos biológicos (procesos microbiológicos aerobios y anaerobios, consumo de las plantas) (United Nations, 2008).

Una gran fracción de la materia orgánica disponible se elimina en la fosa séptica mayormente por el proceso físico de sedimentación, la cual elimina la mayor parte de los sólidos suspendidos del agua residual cruda, los cuales contienen la mayor parte de la materia orgánica disponible. Las fracciones soluble y suspendida que no son eliminadas en la fosa séptica, pasan a los sistemas de humedales híbridos.

En los sistemas de humedales, la materia orgánica es consumida por los microorganismos adheridos al sustrato y raíces, así como por los microorganismos suspendidos y es degradada tanto por procesos aeróbicos en presencia de oxígeno disuelto, como por procesos anaeróbicos en ausencia del mismo (López, 2015). Algunos procesos microbiológicos en los cuales interviene el consumo de materia orgánica involucran nutrientes como el nitrógeno y son por ejemplo la amonificación y la denitrificación. Sin embargo, en la etapa horizontal la nitrificación se da de manera parcial ya que la denitrificación, que ocurre debido a las condiciones anóxicas y la adecuada concentración de materia orgánica, elimina una gran parte de la concentración de NO₃ que se genera. En la etapa vertical se da la nitrificación de manera total, pero las bajas concentraciones de materia orgánica, así como las condiciones aeróbicas evitan que suceda la denitrificación total.

Los procesos físicos como la sedimentación y filtración son los mayores responsables de la eliminación de la materia orgánica. Esto se demuestra ya que la eliminación de este contaminante va de la mano con la eliminación de SST, la cual es efectiva en los tres sistemas de humedales híbridos. La presencia del medio de soporte poroso, así

como de las raíces de las plantas, provocan bajas velocidades de flujo del agua, lo cual favorece los procesos de sedimentación y filtración (Vera, et. al., 2010). En la etapa vertical, el medio de soporte (gravilla y arena), tiene menos espacios vacíos lo cual favorece aún más la filtración.

5.3.3 REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO

Las Tablas 25 y 26 muestran los resultados del monitoreo de nutrientes durante el tiempo de estudio.

Tabla 25 Resultados del Monitoreo de Nutrientes en el Sistema de Humedales Híbrido:
Tiempo de Permanencia 2 días (F=Fosa, H= Horizontal, V=Vertical)

<u>PARÁMETROS</u>		<u>NKT</u> (mg/L)		<u>NH₄</u> (mg/L de N-NH ₄)		<u>NO₃</u> (mg/L de N-NO ₃)		<u>PO₄</u> (mg/L)	
<u>VEGETACIÓN</u>	<u>ETAPA</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>
SAGITARIA LANCIFOLIA	F	77.02	15.68	57.41	17.81	0.10	0.00	7.57	2.74
	H	28.83	4.09	22.46	3.46	0.29	0.10	3.04	1.23
	V	0.85	0.55	0.29	0.20	23.68	10.12	1.16	0.97
TYPHA DOMINGUENSIS	F	77.02	15.68	57.41	17.81	0.10	0.00	7.57	2.74
	H	26.89	5.84	21.26	3.87	0.29	0.13	3.01	1.94
	V	0.54	0.42	0.12	0.18	21.72	11.34	1.47	0.88
CONTROL	F	77.02	15.68	57.41	17.81	0.10	0.00	7.57	2.74
	H	43.13	12.55	30.93	4.85	2.06	2.72	5.67	1.97
	V	2.11	1.16	1.13	0.32	32.80	11.09	2.73	0.78

Tabla 26 Resultados del Monitoreo de Nutrientes en el Sistema de Humedales Híbrido:
Tiempo de Permanencia 4 días

<u>PARÁMETROS</u>		<u>NKT</u> (mg/L)		<u>NH₄</u> (mg/L de N-NH ₄)		<u>NO₃</u> (mg/L de N-NO ₃)		<u>PO₄</u> (mg/L)	
<u>VEGETACIÓN</u>	<u>ETAPA</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>D.E.</u>
SAGITTARIA LANCIFOLIA	F	63.98	6.87	51.90	7.99	0.25	0.13	5.66	1.51
	H	33.15	10.35	28.14	9.86	0.30	0.18	2.99	1.54
	V	2.96	3.00	1.40	2.60	9.21	8.70	0.85	0.46
TYPHA DOMINGUENSIS	F	62.95	6.87	51.90	7.99	0.25	0.13	5.66	1.51
	H	33.06	5.96	28.35	5.59	0.26	0.26	3.57	2.09
	V	3.05	4.97	1.55	3.77	14.57	14.88	0.77	1.53
CONTROL	F	62.95	6.87	51.90	7.99	0.25	0.13	5.66	1.51
	H	41.93	2.20	35.53	2.01	0.23	7.68	4.10	0.48
	V	4.45	7.89	4.00	9.52	19.92	0.06	1.65	1.83

Las Tablas 27 y 28 muestran los porcentajes de remoción alcanzados para cada uno de los parámetros analizados, para ambos tiempos de permanencia.

Tabla 27 Porcentajes de Remoción de Nutrientes: Tiempo de permanencia 2 días

PARÁMETRO			NKT (%)	NH ₄ (%)	NO ₃ (%)	PO ₄ (%)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-				
SAGITTARIA LANCIFOLIA	HORIZONTAL	PROMEDIO	60.91%	58.06%	-195.00%	58.09%
		DE	0.95%	0.45%	10124.89%	16.23%
	VERTICAL	PROMEDIO	98.75%	99.43%	-	82.68%
		DE	0.95%	0.45%	10124.89%	16.23%
TYPHA DOMINGUENSIS	HORIZONTAL	PROMEDIO	63.63%	59.88%	-189.53%	58.27%
		DE	10.90%	13.69%	129.03%	25.37%
	VERTICAL	PROMEDIO	99.24%	99.80%	-	79.11%
		DE	0.68%	0.28%	11344.61%	13.08%
CONTROL	HORIZONTAL	PROMEDIO	42.62%	42.68%	-1961.94%	23.15%
		DE	16.90%	17.03%	2720.35%	16.92%
	VERTICAL	PROMEDIO	97.06%	97.82%	-	59.83%
		DE	1.92%	1.05%	11088.06%	17.36%

Tabla 28 Porcentajes de Remoción de Nutrientes: Tiempo de permanencia 4 días

PARÁMETRO			NKT (%)	NH ₄ (%)	NO ₃ (%)	PO ₄ (%)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-				
SAGITTARIA LANCIFOLIA	HORIZONTAL	PROMEDIO	45.93%	45.68%	-25.19%	56.88%
		DE	10.39%	10.53%	39.43%	17.71%
	VERTICAL	PROMEDIO	93.16%	95.82%	-5739.27%	87.65%
		DE	5.07%	5.11%	3902.67%	11.11%
TYPHA DOMINGUENSIS	HORIZONTAL	PROMEDIO	44.78%	43.00%	-35.41%	46.83%
		DE	13.82%	13.84%	90.09%	19.63%
	VERTICAL	PROMEDIO	92.65%	95.24%	-6484.87%	87.85%
		DE	6.50%	6.38%	1948.86%	9.72%
CONTROL	HORIZONTAL	PROMEDIO	32.27%	28.23%	-24.83%	34.99%
		DE	8.74%	9.52%	65.31%	21.12%
	VERTICAL	PROMEDIO	93.64%	93.49%	-	75.14%
		DE	7.13%	8.70%	5453.81%	18.18%

NKT

El NKT proveniente del efluente de la fosa séptica tuvo una concentración promedio de 77.02 ± 15.68 mg/L durante la evaluación del tiempo de permanencia de 2 días. En la etapa de los humedales horizontales, para dicho tiempo de permanencia, el NKT se redujo a 28.83 ± 4.09 mg/L en el humedal horizontal con la especie *Sagittaria lancifolia*, a 26.89 ± 5.84 mg/L en el humedal horizontal con la especie *Typha Dominguensis* y a 43.13 ± 12.55 mg/L en el humedal horizontal de control, como se muestra en las Tablas 25 y 27. Las concentraciones finales en el efluente fueron de 0.85 ± 0.55 mg/L en el sistema con la especie *Sagittaria lancifolia*, 0.54 ± 0.42 mg/L en el de *Typha dominguensis* y 2.11 ± 1.16 mg/L en el de control.

Para el tiempo de remoción de 4 días, el NKT en la fosa séptica tuvo una concentración de 63.98 ± 6.87 . Este parámetro se redujo a 33.15 ± 10.35 mg/L en el humedal horizontal con la especie *Sagittaria lancifolia*, a 33.06 ± 5.96 mg/L en el humedal horizontal con la especie *Typha Dominguensis* y a 41.93 ± 2.2 mg/L en el humedal horizontal de control, como se muestra en las Tablas 26 y 28. Se alcanzaron concentraciones finales en el efluente de 2.96 ± 3 mg/L en el sistema con la especie *Sagittaria lancifolia*, 3.05 ± 4.97 mg/L en el de *Typha dominguensis* y 4.45 ± 7.89 mg/L en el de control.

La Figura 20 muestra el comportamiento del NKT en los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, para la remoción de NKT.

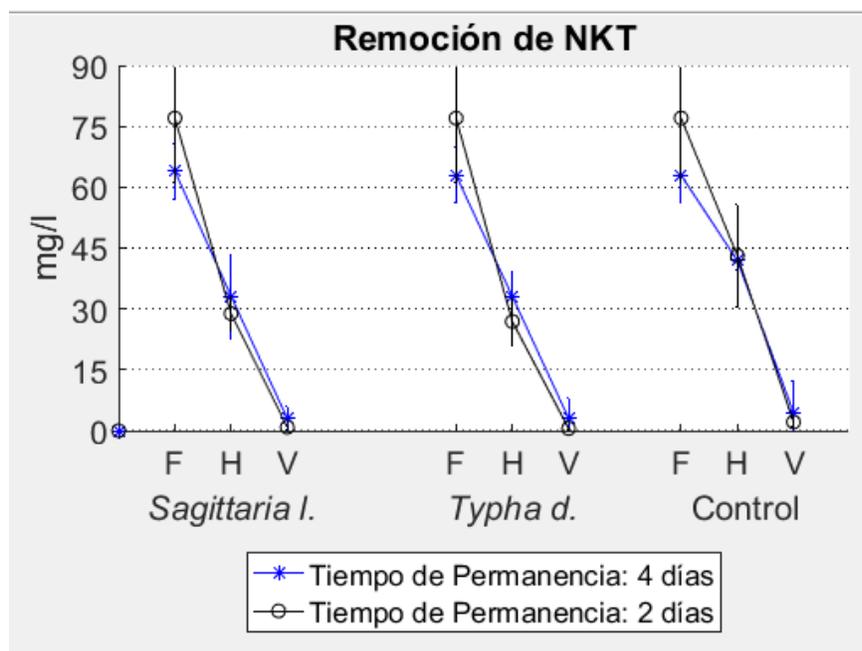


Figura 20 Remoción de NKT en el sistema de Humedales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)

NH₄

El monitoreo del NH₄ durante el tiempo de estudio presentó un comportamiento similar con respecto al NKT, lo cual nos indica que tanto el NH₄ como el N-Orgánico presentan una degradación en el sistema. Para el tiempo de permanencia de 2 días se alcanzaron remociones mayores que en el de 4 días, ya que se lograron porcentajes de remoción del 58.06% y 99.42% en el humedal híbrido con la especie *Sagittaria lancifolia*, 59.88% y 99.80% en el de la especie *Typha dominguensis* y 42.68% y 97.82% en el de control, en las etapas horizontal y vertical respectivamente, los cuales se pueden contrastar con los resultados obtenidos para el tiempo de permanencia de 4 días que fueron de 45.68% y 95.82 % en el humedal híbrido con la especie *Sagittaria lancifolia*, 43% y 95.24% en el de la especie *Typha dominguensis* y 28.23% y 93.49% en el de control, en las etapas horizontal y vertical respectivamente.

La Figura 21 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, para la remoción de NH₄.

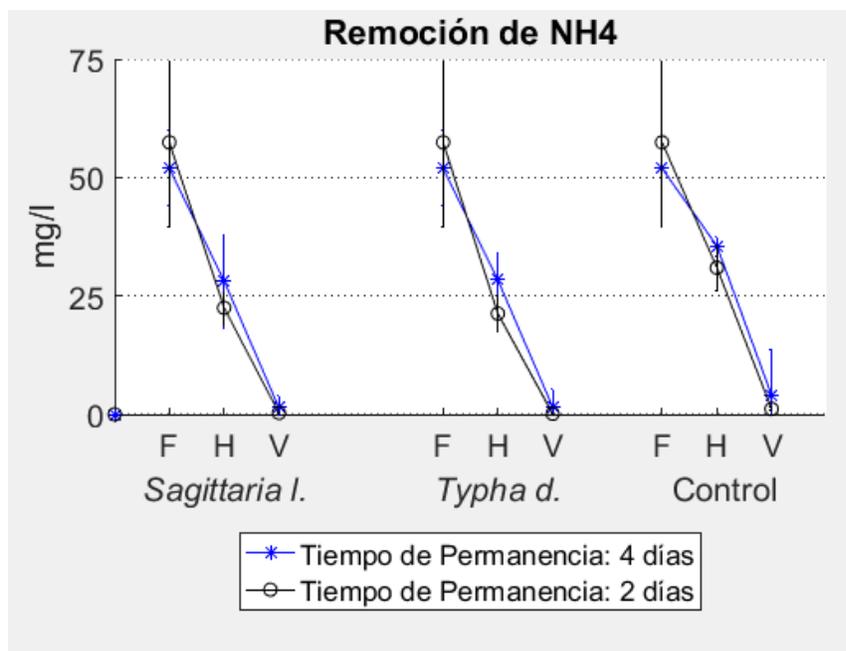


Figura 21 Remoción de NH₄ en el sistema de Humedales Artificiales Híbridos (F= Fosa, H=Horizontal, V=Vertical)

NO₃

A diferencia de los parámetros NKT y NH₄, para los nitratos no hubo degradación. Por el contrario, su concentración aumentó en el efluente final, para los dos tiempos de permanencia y en los tres sistemas de humedales híbridos. Para ambos tiempos permanencia estudiados, los NO₃ se mantuvieron en concentraciones muy bajas en la fosa séptica (menos de 0.25 mg/L) y aumentaron ligeramente en los humedales horizontales, lo cual indica que existe una nitrificación parcial en esta etapa. La concentración de NO₃ aumentó en los efluentes finales a 23.68 ± 10.12 mg/L y 9.21 ± 8.70 mg/L en el humedal híbrido con la especie *Sagittaria lancifolia*, a 21.72 ± 11.34 mg/L y 14.57 ± 14.88 mg/L en el humedal híbrido con la especie *Typha dominguensis* y a 32.80 ± 11.09 mg/L y 19.92 ± 0.06 mg/L en el de control, para los tiempos de 2 y 4 días de permanencia, respectivamente.

La Figura 22 muestra el comportamiento de los NO₃ durante el tiempo de estudio en cada configuración de humedal híbrido.

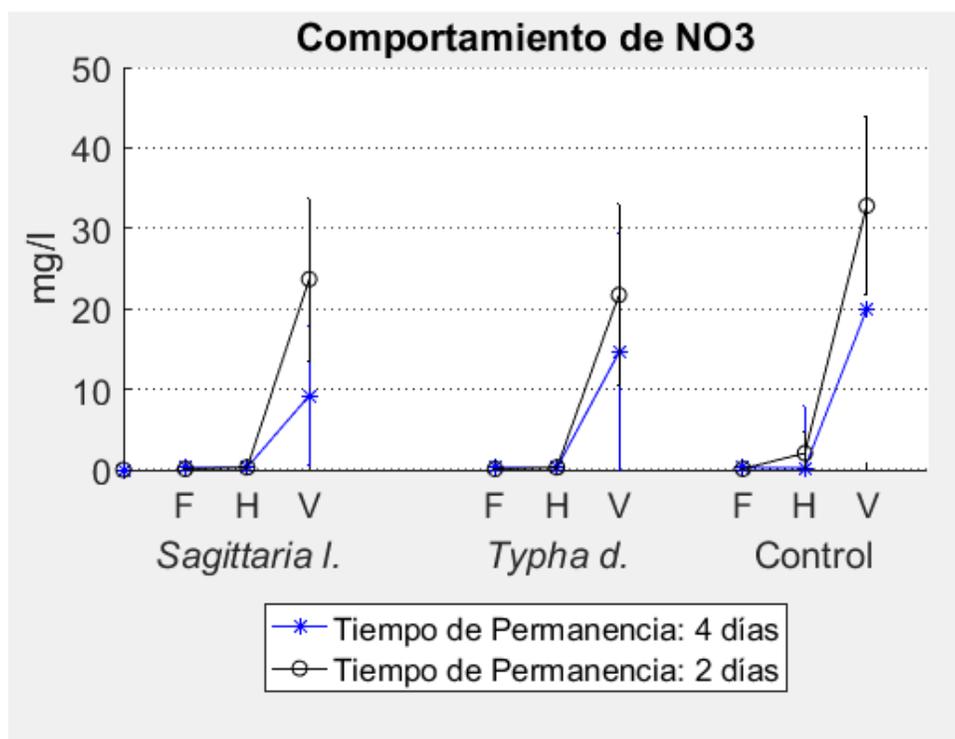


Figura 22 Comportamiento de NO₃ en el Sistema de Humedales Artificiales Híbrido

Nitrógeno Total (NT)

Se realizó un balance de Nitrógeno, sumando los resultados de N-Orgánico, N-NH₄ y N-NO₃ en un solo parámetro llamado NT, para analizar los procesos por los cuales el Nitrógeno se degradó. El N-Orgánico se calculó como la diferencia entre el resultado en concentración del NKT y el N-NH₄. La Tabla 29 muestra los resultados del cálculo del NT para los dos tiempos de contacto.

Tabla 29 Concentraciones de Nitrógeno Total y Porcentajes de Remoción

SISTEMA DE HUMEDALES	CONFIGURACIÓN	N. TOTAL (mg/L)		Remoción (%)	
		2d	4d	2d	4d
SAGITTARIA LANCIFOLIA	FOSA	77.12	64.23	-	-
	HORIZONTAL	29.13	33.45	62%	48%
	VERTICAL	24.53	12.17	68%	81%
TYPHA DOMINGUENSIS	FOSA	77.12	63.20	-	-
	HORIZONTAL	27.17	33.32	65%	48%
	VERTICAL	22.26	17.62	71%	73%
CONTROL	FOSA	77.12	63.20	-	-
	HORIZONTAL	45.19	42.17	41%	34%
	VERTICAL	34.92	24.37	55%	62%

A su vez, las Figuras 23 y 24 muestran cómo varían los parámetros que componen el NT en función de la etapa del sistema de humedales híbridos, para ambos tiempos de permanencia, así como la remoción presente en ellos. Se observa que en la Fosa Séptica el Nitrógeno está mayormente presente como N-Orgánico y N-NH₄. Al pasar a la etapa de humedales horizontales, se remueve una fracción de N-Orgánico y de N-NH₄, y se genera una pequeña fracción de N-NO₃. En el efluente final, se observa que se remueve casi en su totalidad la fracción de N-Orgánico y N-NH₄, y se genera gran cantidad de N-NO₃.

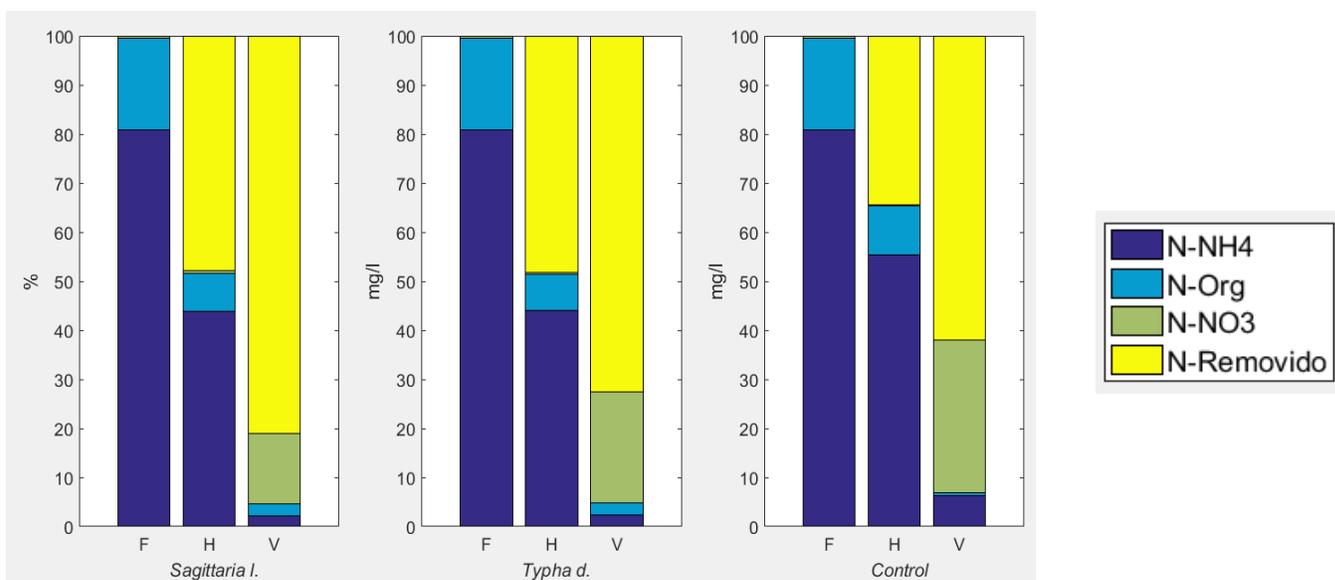


Figura 23 Balance de Nitrógeno para el tiempo de permanencia de 2 días.

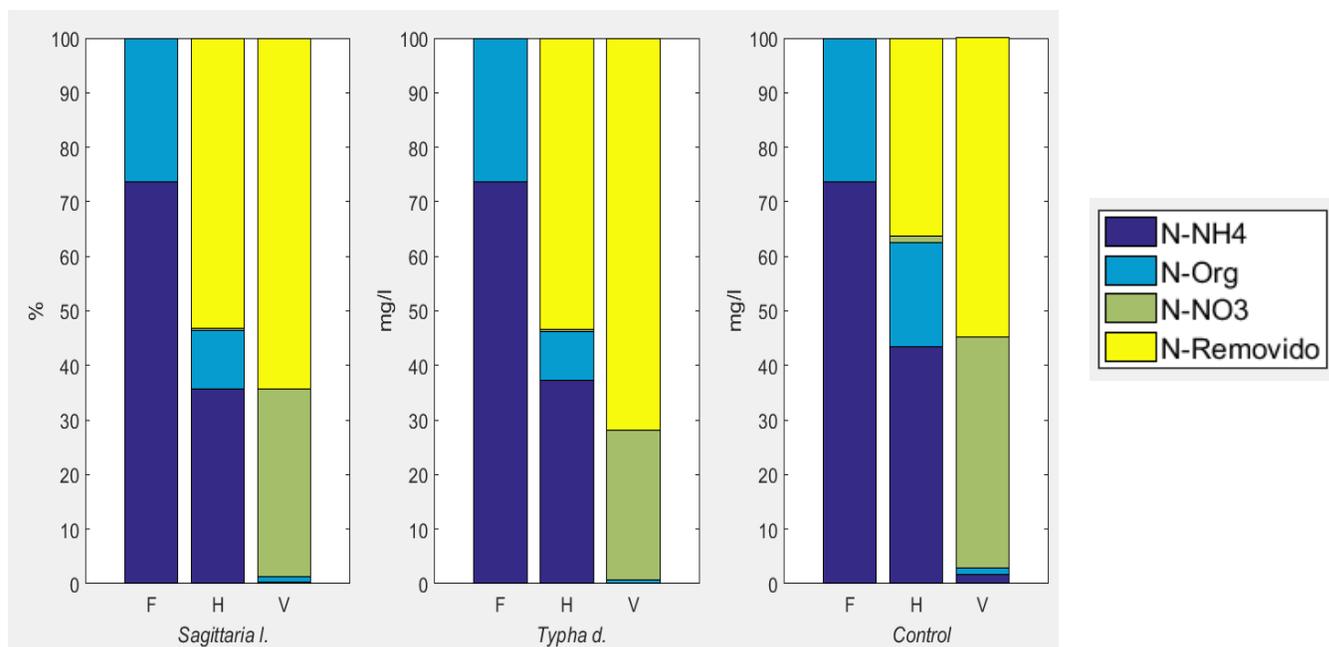


Figura 24 Balance de Nitrógeno para el tiempo de permanencia de 4 días.

PO₄

La concentración de PO₄ presente en la fosa séptica durante las dos campañas de muestreo se mantuvo en bajas concentraciones (menores a 10 mg/L). Sin embargo, como se observa en la Tabla 30, en los tres sistemas de humedales híbridos y durante las dos campañas, se logró remover una fracción de la concentración de entrada.

Tabla 30 Resultados del Monitoreo del PO₄

PARÁMETROS		2 días			4 días		
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	Remoción	PROMEDIO	D.E.	Remoción
SAGITTARIA LANCIFOLIA	F	7.57	2.74	-	5.66	1.51	-
	H	3.04	1.23	58.09%	2.99	1.54	56.88%
	V	1.16	0.97	82.68%	0.85	0.46	87.65%
TYPHA DOMINGUENSIS	F	7.57	2.74	-	5.66	1.51	-
	H	3.01	1.94	58.27%	3.57	2.09	46.83%
	V	1.47	0.88	79.11%	0.77	1.53	87.85%
CONTROL	F	7.57	2.74	-	5.66	1.51	-
	H	5.67	1.97	23.15%	4.10	0.48	34.99%
	V	2.73	0.78	59.83%	1.65	1.83	75.14%

Para el tiempo de permanencia de 2 días, se logró remover un 58.09% y 82.68% en el sistema con la especie *Sagittaria lancifolia*, un 58.27% y 79.11% en el sistema con *Typha domingensis*, y un 23.15% y 59.83% en el sistema de control, para las etapas horizontal y vertical respectivamente.

Para el tiempo de permanencia de 4 días, se logró remover un 56.88% y 87.65% en el sistema con la especie *Sagittaria lancifolia*, un 46.8% y 87.85% en el sistema con *Typha domingensis*, y un 34.99% y 75.14% en el sistema de control, para las etapas horizontal y vertical respectivamente.

La Figura 25 muestra el comportamiento del PO_4 durante el tiempo de estudio en cada etapa de los tres sistemas. Se puede observar que en los sistemas con vegetación presente, la remoción de PO_4 es mayor, y que la remoción es ligeramente mayor cuando se tiene un tiempo de permanencia de 4 días.

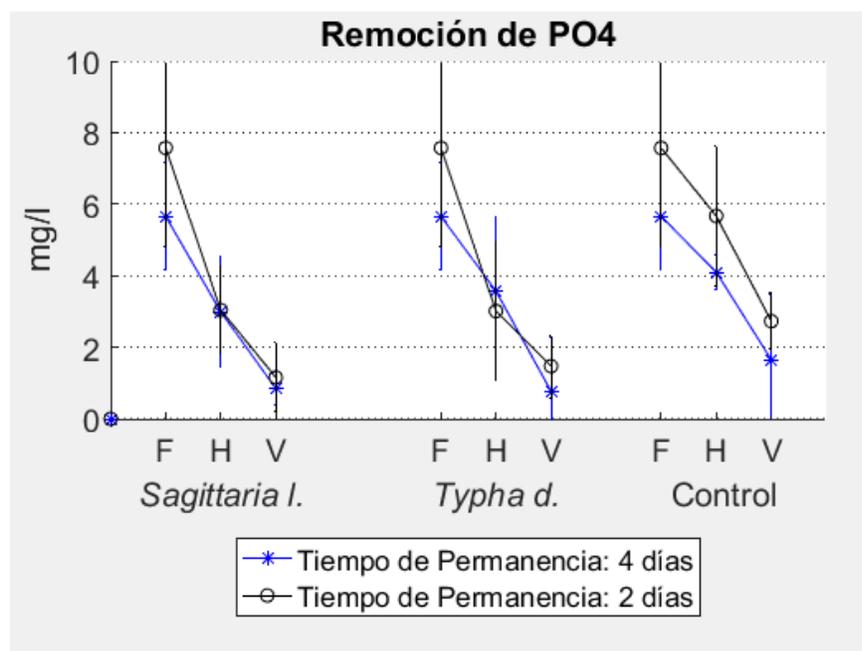


Figura 25 Remoción del PO_4 en el sistema de humedales artificiales híbrido

Discusión de Resultados: Nutrientes

Uno de los objetivos de la aplicación de los sistemas de humedales híbridos para el tratamiento de agua residual doméstica fue la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), lo cual, como se observa en los resultados del estudio, se cumple de manera satisfactoria, con excepción de los nitratos.

Se observan diferencias en resultados entre los humedales horizontales con plantas y el de control en la remoción de NKT, obteniendo mejores remociones en los humedales con plantas. Esto es debido a que las especies vegetales consumen el NH_4 (el cual es componente del NKT junto al N-Orgánico) para su crecimiento (Kadlec y Wallace, 2008). A su vez, una fracción del NKT se remueve mediante la eliminación de materia particulada, la cual sucede por procesos como la sedimentación y la filtración (UN, 2008).

Por otro lado, la concentración de NH_4 entre el influente y efluente se redujo en porcentajes mayores al 90%, sin mucha variación entre los dos tiempos de permanencia y los humedales con y sin plantas. Sin embargo, en la etapa horizontal sí se presentan diferencias entre humedales con plantas y el de control para la remoción de NH_4 , lo cual indica, como se mencionó anteriormente, el consumo de este compuesto para crecimiento de las plantas.

Las bajas concentraciones de NO_3 en la fosa séptica se incrementaron ligeramente en la etapa horizontal de los sistemas, lo cual indica que la nitrificación se dió de manera parcial. Esto puede deberse a que no hay condiciones aeróbicas en esta etapa, sino mas bien anóxicas (Haghshenas-Adarmanabadi, et al., 2015). En esta etapa hay diferencias estadísticamente significativas entre los humedales con plantas y de control, entre los dos tiempos de permanencia y en la interacción de ambos factores, resultando en mayores concentraciones de NO_3 en el humedal horizontal de control para un tiempo de permanencia de 2 días. Esto indica que dotar al sistema de un mayor tiempo de permanencia y de especies vegetales ayuda a la eliminación de este compuesto, tanto por procesos fisicoquímicos como sedimentación y filtración, así como biológicos como la denitrificación y el consumo de las plantas (Kadlec y Knight, 1996). En la etapa vertical del sistema híbrido, se da un aumento significativo de las

concentraciones de NO_3 , lo cual indica que en esta etapa se da la nitrificación completa, ya que como mencionan Haghshenas-Adarmanabadi et al., (2015) en los humedales verticales se da una mejor transferencia de oxígeno debido a la trayectoria descendente del flujo de agua a través del medio de soporte. Pese a que la legislación vigente no marca concentraciones límite de NO_3 ni de NT para descarga en el subsuelo, es conveniente eliminar este compuesto y para ello se deben adoptar nuevas estrategias de operación del sistema para lograr este objetivo como, por ejemplo, estrategias de recirculación de los humedales verticales a los humedales verticales, o directo a la fosa séptica, para de esta manera favorecer la denitrificación en el humedal horizontal.

Con el balance de NT que se realizó, se pudo establecer los mecanismos por los cuales el fue eliminado el Nitrógeno del agua residual (Figuras 24 y 25). La concentración de NT en la fosa séptica se compone mayormente de NH_4 , en menor medida de N-Orgánico y la concentración de NO_3 es muy baja. Esto indica que en el cárcamo de rebombeo, de donde se toma el agua residual para alimentar la fosa, así como dentro de la fosa, se da el proceso de amonificación lo cual explica el mayor porcentaje de NH_4 que de N-Orgánico. En la etapa horizontal se remueve un porcentaje del Nitrógeno disponible y las concentraciones de NH_4 y N-Orgánico disminuyen. Esto indica que en dicha etapa se sigue dando el proceso de amonificación por el cual se elimina el N-Orgánico, y la concentración de NH_4 también baja ya que se da la nitrificación de manera parcial y también procesos fisicoquímicos como la sedimentación, filtración y la volatilización (en condiciones de pH básico, el NH_4 se volatiliza como NH_3), y procesos biológicos como el consumo de las plantas (Kadlec y Knight, 1996).

En los sistemas de humedales híbridos, también se da una efectiva eliminación del fósforo a concentraciones por debajo de lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT, Se observan mayores remociones en humedales con vegetación que en los de control, lo cual proporciona evidencia de la influencia del consumo del fósforo por medio de las plantas. Otros mecanismos de remoción de fósforo que intervienen son la sedimentación y filtración, así como la adsorción en el medio de soporte y raíces (UN,

2008). En la etapa vertical la remoción de PO_4 mayormente se da por filtración del agua a su paso a través del medio de soporte, ya que no se observan diferencias en resultados entre humedales con plantas y el de control.

5.3.4 REMOCIÓN DE SÓLIDOS EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDO

Las Tablas 31 y 32 muestran los resultados del monitoreo de sólidos durante dichos muestreos.

Tabla 31 Resultados del Monitoreo de Sólidos: tiempo de permanencia de 2 días

PARÁMETROS		ST (mg/L)		SST (mg/L)		SDT (mg/L)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITARIA LANCIFOLIA	F	1037.00	174.98	370.25	14.93	705.75	204.67
	H	709.73	98.46	32.06	7.53	695.03	125.82
	V	938.04	225.82	12.58	2.80	1030.37	199.10
TYPHA DOMINGUENSIS	F	1037.00	174.98	370.25	14.93	705.75	204.67
	H	782.98	142.80	46.54	12.08	736.01	176.05
	V	1050.89	255.48	11.29	1.84	1093.40	267.54
CONTROL	F	1037.00	174.98	370.25	14.93	705.75	204.67
	H	874.18	360.34	56.74	15.78	906.32	402.72
	V	860.44	85.28	12.91	2.64	831.41	102.48

Tabla 32 Resultados del Monitoreo de Sólidos: tiempo de permanencia de 4 días

PARÁMETROS		ST (mg/L)		SST (mg/L)		SDT (mg/L)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITARIA LANCIFOLIA	F	1000.00	108.32	115.20	65.73	940.00	48.71
	H	719.82	123.07	10.78	15.90	722.56	111.79
	V	1114.52	117.07	8.45	13.06	1103.45	85.91
TYPHA DOMINGUENSIS	F	1000.00	108.32	115.20	65.73	940.00	48.71
	H	774.63	330.79	12.02	14.28	818.30	359.42
	V	1170.32	91.67	13.76	8.61	1135.23	108.12
CONTROL	F	1000.00	108.32	115.20	65.73	940.00	48.71
	H	946.84	83.56	11.98	11.00	1060.40	92.21
	V	938.92	74.55	8.62	46.60	950.91	24.62

Las Tablas 33 y 34 muestran los porcentajes de remoción alcanzados en cada etapa de cada sistema de humedales híbridos, para los tiempos de permanencia de 2 y 4 días, respectivamente.

Tabla 33 Porcentajes de Remoción de Sólidos: Tiempo de permanencia de 2 días

PARÁMETRO			ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-			
SAGITTARIA LANCIFOLIA	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	31.07%	91.35%	-1.67%
		DE	21.94%	0.82%	47.51%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	8.87%	96.59%	-52.88%
		DE	21.94%	0.82%	47.51%
TYPHA DOMINGUENSIS	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	24.17%	87.46%	-7.05%
		DE	8.99%	3.14%	21.71%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	-5.21%	96.94%	-71.95%
		DE	36.05%	0.55%	81.49%
CONTROL	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	16.65%	84.75%	-28.60%
		DE	26.09%	3.87%	45.09%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	15.93%	96.52%	-22.57%
		DE	10.47%	0.67%	24.54%

Tabla 34 Porcentajes de Remoción de Sólidos: Tiempo de permanencia de 4 días

PARÁMETRO			ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
VEGETACIÓN	CONFIGURACIÓN	-			
SAGITTARIA LANCIFOLIA	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	27.86%	87.51%	23.59%
		DE	9.77%	9.87%	9.97%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	-3.75%	92.29%	-5.85%
		DE	18.50%	10.85%	18.53%
TYPHA DOMINGUENSIS	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	31.12%	88.56%	27.28%
		DE	22.56%	13.57%	29.33%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	-4.83%	88.63%	-7.62%
		DE	19.86%	12.61%	21.02%
CONTROL	<i>HORIZONTAL</i>	PROMEDIO	11.98%	85.94%	0.94%
		DE	24.30%	19.25%	33.55%
	<i>VERTICAL</i>	PROMEDIO	3.16%	80.35%	-4.01%
		DE	16.45%	34.13%	17.06%

ST

La concentración de ST en la fosa séptica fue similar durante las dos campañas de muestreo, con 1037 ± 142.8 mg/L en el tiempo de permanencia de 2 días y 1000 ± 108.32 mg/L en el de 4 días.

En la etapa horizontal en los tres sistemas y durante las dos campañas de muestreo, se removi6 una fracci6n de los ST. En el sistema con la especie *S. lancifolia* se removi6 un 31.07% y 27.86%, en el de la especie *T. dominguensis* un 24.17% y 31.12%, y en el de control un 16.65% y 11.98%, en los tiempos de 2 y 4 d1as respectivamente.

En la etapa vertical, en los sistemas con plantas hubo un aumento de concentraci6n de ST con respecto a la etapa horizontal y en el sistema de control hubo una ligera remoci6n. En el caso del sistema con *S. lancifolia*, se dio la remoci6n del 8.87% y hubo un aumento del 3.75% con respecto a la concentraci6n en la fosa para los tiempos de 2 y 4 d1as respectivamente. Para el sistema con *T. dominguensis*, hubo un aumento del 5.21% y del 4.83% con respecto a la concentraci6n de entrada, para los tiempos de 2 y 4 d1as. Finalmente, en el sistema de control hubo una remoci6n del 3.16% y del 15.93% respectivamente en los dos tiempos de estudios.

La Figura 26 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales h1bridos en funci6n de la variaci6n del tiempo de permanencia, en cuanto al par6metro ST.

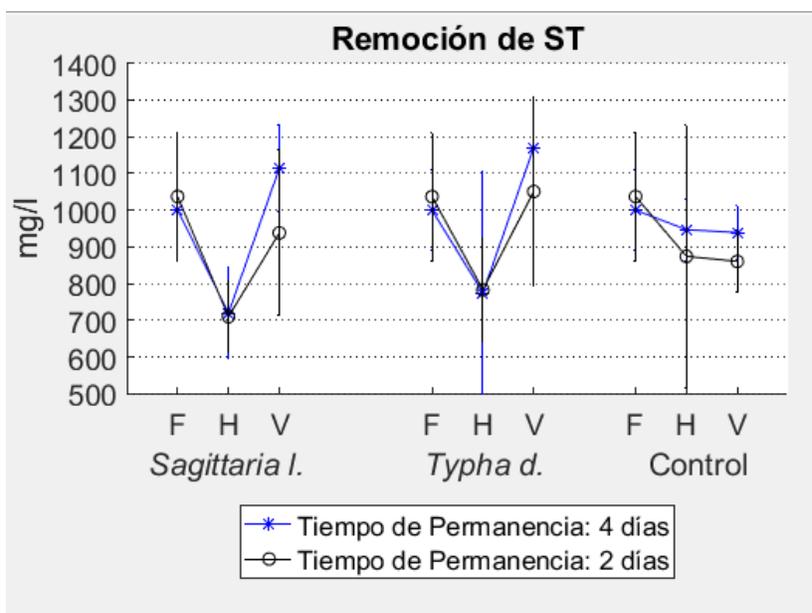


Figura 26 Remoci6n de ST en los sistemas de humedales artificiales H1bridos

SST

La concentración de SST fue mayor durante la campaña de muestreos de 2 días (370.25 ± 12.08 mg/L) que durante la campaña de muestreos de 4 días (115.2 ± 65.73 mg/L). Sin embargo, en ambas campañas se dio la remoción de SST, tanto en la etapa horizontal como en la vertical.

Para la etapa horizontal, en el sistema con *S. lancifolia* hubo un 91.35% y 87.51% de remoción, en el de *T. dominguensis* un 87.46% y 88.56%, y en el de control un 84.75% y 85.94%, durante las campañas de muestreo de 2 y 4 días respectivamente.

En la etapa vertical, se removi6 un 96.59% y 92.29% en el sistema con *S. lancifolia*, un 96.94% y un 88.63% en el sistema con *T. dominguensis*, y en el de control un 96.52% y 80.35%, durante las campañas de muestreo de 2 y 4 días respectivamente.

La Figura 27 ilustra el comportamiento de este parámetro durante el tiempo de estudio.

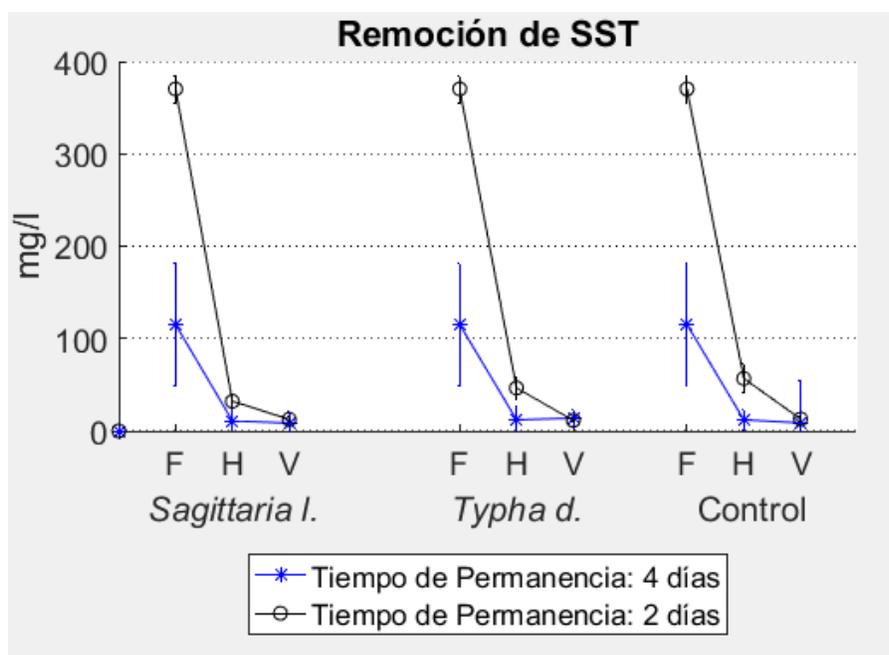


Figura 27 Remoción de SST en los sistemas de humedales artificiales híbridos

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

La concentración de SDT en la fosa séptica fue mayor durante la campaña de estudio del tiempo de permanencia de 4 días (940 ± 48.71 mg/L) que en la campaña de 2 días (705.75 ± 176.05 mg/L).

En la campaña de 2 días, hubo un aumento del 1.67% y 52.88% en la concentración de SDT para el sistema *S. lancifolia*, en las etapas horizontal y vertical respectivamente. En el sistema *T. dominguensis* también se presentó un aumento en las concentraciones, de 7.05% y 71.95% en las etapas horizontal y vertical. Finalmente, en el sistema de control hubo un aumento del 28.6% en la etapa horizontal y de 22.57% en la vertical.

Los resultados de la campaña de 4 días arrojaron, en general, remociones en las etapas horizontales (23.59%, 27.28% y 0.94% en los sistemas *S. lancifolia*, *T. dominguensis* y control respectivamente) y aumento en concentraciones en el efluente final con respecto a la concentración de entrada (5.85%, 7.62% y 4.01% en los sistemas *S. lancifolia*, *T. dominguensis* y control respectivamente). La Figura 28 presenta la variación de concentraciones de SDT en los sistemas y sus diferentes etapas, durante el tiempo de estudio.

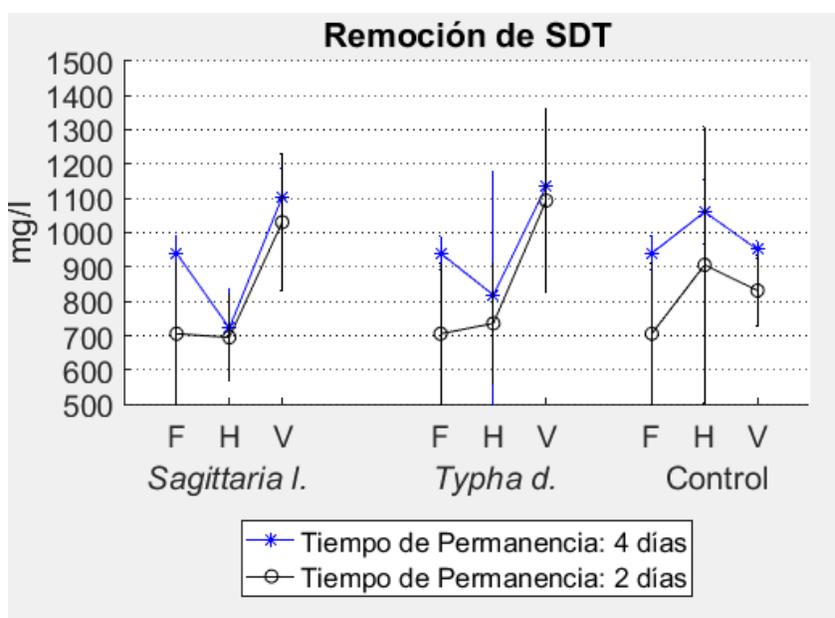


Figura 28 Comportamiento de los SDT en los sistemas de humedales artificiales híbridos

Discusión de Resultados: Sólidos

Los ST del agua residual doméstica se conforman por una fracción soluble (SDT) y una particulada (SST). En los sistemas de humedales híbridos se da la efectiva remoción de SST a concentraciones por debajo de 15 mg/L en el efluente de los 3 sistemas híbridos y en las dos campañas de muestreo. Se observa que la concentración en la entrada al sistema era mayor en la campaña de muestreo de 2 días que en la de 4 días, por tanto se elimina en dicha campaña una mayor cantidad de sólidos, aunque las concentraciones en el efluente son similares para ambos casos. No se observan diferencias en resultados entre los humedales con plantas y el de control, lo cual indica que esta fracción de sólidos se elimina en mayor medida por procesos físicos como la sedimentación y filtración (Navarro, et al., 2014).

La fracción soluble o disuelta (SDT) involucra compuestos solubles como bicarbonatos, carbonatos, cloruros, nitratos, fosfatos, calcio, magnesio, entre otros, que no son reactivos y por lo tanto es difícil removerlos en sistemas de humedales artificiales (Sehar, et al., 2013). En la etapa horizontal se alcanza a eliminar una fracción pero en la etapa vertical esta fracción se incrementa.

Como se puede observar en los resultados, no hay gran remoción de los ST. Esto se debe a que la fracción particulada de los sólidos (SST) es efectivamente removida del agua como ya se mencionó. Sin embargo, la fracción soluble (SDT) aumenta debido a fenómenos como la evapotranspiración (Papaevangelou, et al., 2012). Aunque la concentración de SDT se incrementa en el efluente, hay mayor importancia en remover los SST ya que la mayoría de contaminantes se encuentra en la fracción suspendida (Metcalf y Eddy, 1991).

5.3.5 REMOCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL SISTEMA DE HUMEDALES HÍBRIDOS

Las Tablas 35 y 36 muestran los resultados del monitoreo de CT y *E. coli* durante dichos muestreos.

Tabla 35 Resultados del Monitoreo de Microorganismos Patógenos: Tiempo de Residencia 2 días

PARÁMETROS		CT (UFC/100 mL)		E. coli (UFC/100 mL)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITARIA LANCIFOLIA	F	1.97E+07	7.12E+06	7.17E+05	4.40E+05
	H	1.54E+05	8.95E+04	1.13E+04	1.46E+04
	V	4.16E+02	4.30E+02	2.44E+01	2.07E+01
TYPHA DOMINGUENSIS	F	1.97E+07	7.12E+06	7.17E+05	4.40E+05
	H	3.66E+05	2.51E+05	2.61E+04	3.83E+04
	V	5.86E+02	6.59E+02	4.01E+01	7.08E+01
CONTROL	F	1.97E+07	7.12E+06	7.17E+05	4.40E+05
	H	4.39E+05	3.28E+05	1.32E+04	1.86E+04
	V	1.23E+03	1.31E+03	5.85E+01	7.76E+01

Tabla 36 Resultados del Monitoreo de Microorganismos Patógenos: Tiempo de Residencia 4 días

PARÁMETROS		CT (UFC/100 mL)		E. coli (UFC/100 mL)	
VEGETACIÓN	ETAPA	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
SAGITARIA LANCIFOLIA	F	1.80E+07	1.11E+07	4.43E+06	5.01E+06
	H	2.60E+05	1.23E+05	5.17E+04	6.57E+04
	V	1.43E+02	1.14E+02	9.65E+00	8.78E+00
TYPHA DOMINGUENSIS	F	1.80E+07	1.11E+07	4.43E+06	5.01E+06
	H	1.72E+05	1.46E+05	1.19E+04	8.77E+03
	V	1.19E+02	1.02E+02	6.51E+00	4.77E+00
CONTROL	F	1.80E+07	1.11E+07	4.43E+06	5.01E+06
	H	2.44E+05	1.28E+05	1.77E+04	4.43E+03
	V	8.40E+02	7.43E+02	1.34E+01	1.45E+01

Las Tablas 37 y 38 muestran las unidades logarítmicas removidas, en función de cada tiempo de permanencia.

Tabla 37 Remoción en unidades logarítmicas alcanzada en el tiempo de permanencia de 2 días para patógenos

<u>VEGETACIÓN</u>	<u>CONFIGURACIÓN</u>	<u>CT (log UFC/100 mL)</u>	<u>E.coli (log UFC/100 mL)</u>
<u>SAGITTARIA LANCIFOLIA</u>	<i>HORIZONTAL</i>	2.11	1.80
	<i>VERTICAL</i>	4.67	4.47
<u>TYPHA DOMINGUENSIS</u>	<i>HORIZONTAL</i>	1.73	1.44
	<i>VERTICAL</i>	4.53	4.25
<u>CONTROL</u>	<i>HORIZONTAL</i>	1.65	1.74
	<i>VERTICAL</i>	4.20	4.09

Tabla 38 Remoción en unidades logarítmicas alcanzada en el tiempo de permanencia de 4 días para patógenos

<u>VEGETACIÓN</u>	<u>CONFIGURACIÓN</u>	<u>CT (log UFC/100)</u>	<u>E.coli (log UFC/100)</u>
<u>SAGITTARIA LANCIFOLIA</u>	<i>HORIZONTAL</i>	1.81	1.93
	<i>VERTICAL</i>	5.26	5.57
<u>TYPHA DOMINGUENSIS</u>	<i>HORIZONTAL</i>	2.09	2.42
	<i>VERTICAL</i>	5.35	5.67
<u>CONTROL</u>	<i>HORIZONTAL</i>	1.85	2.08
	<i>VERTICAL</i>	4.72	5.50

CT

La concentración de CT en la fosa séptica fue similar en los dos períodos de muestreo, $1.97 \times 10^7 \pm 7.12 \times 10^6$ UFC/100 ml en la campaña de 2 días y $1.8 \times 10^7 \pm 1.1 \times 10^7$ UFC/100 ml en la campaña de 4 días.

En los humedales horizontales se alcanza a remover una fracción de los CT, ya que en el de la especie *S. lancifolia* se remueven 2.11 y 1.81 unidades logarítmicas, en el de la especie *T. dominguensis* se remueven 1.73 y 2.09 unidades logarítmicas, y en el de control 1.65 y 1.85 unidades logarítmicas, para los tiempos de permanencia de 2 y 4 días respectivamente.

En el efluente de los humedales verticales es donde se alcanza el mayor grado de desinfección, alcanzando remociones de 4.67 y 5.26 unidades logarítmicas en el que contiene la especie *S. lancifolia*, 4.53 y 5.35 unidades logarítmicas en el que contiene la especie *T. dominguensis*, y 4.2 y 4.72 unidades logarítmicas en el humedal de control, para los tiempos de permanencia de 2 y 4 días respectivamente. Asimismo, se puede observar que hay un mayor grado de desinfección en humedales con plantas.

La Figura 29 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, en cuanto al parámetro CT.

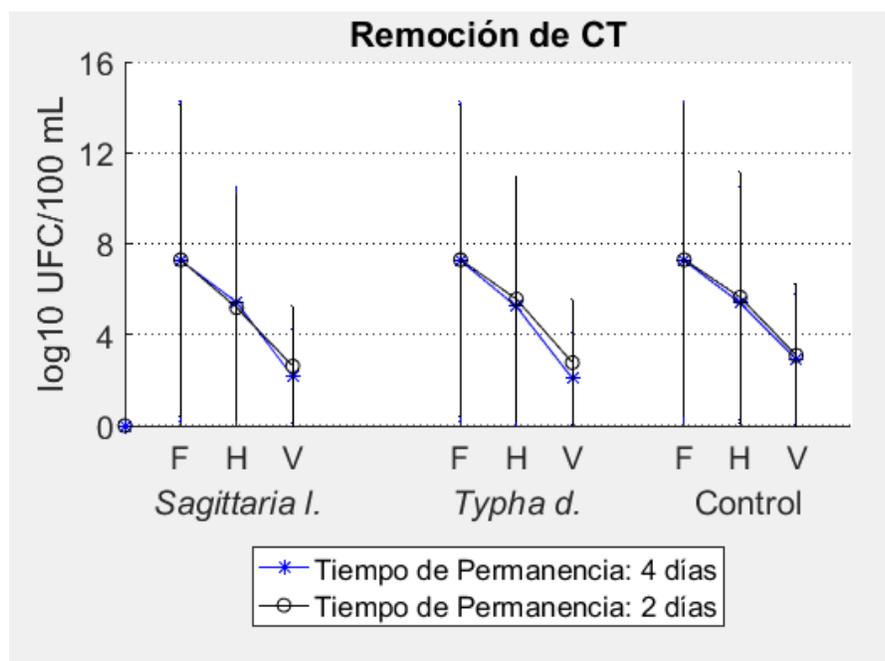


Figura 29 Remoción de CT en los sistemas de humedales artificiales híbridos

E. coli

El parámetro E. coli se utilizó como indicador de contaminación por materia fecal. La concentración en la fosa séptica fue ligeramente mayor durante la campaña de 4 días ($4.43 \times 10^6 \pm 5.01 \times 10^6$ UFC/100 ml) que en la campaña de 2 días ($7.17 \times 10^5 \pm 4.4 \times 10^5$ UFC/100 ml).

En la campaña de 2 días se alcanzaron remociones en el sistema con la especie *S. lancifolia* de 2.11 y 4.67 unidades logarítmicas, en el de la especie *T. dominguensis* de 1.73 y 4.53 unidades logarítmicas, y en el de control de 1.65 y 4.2 unidades logarítmicas en las etapas horizontal y vertical respectivamente.

En la campaña de 4 días, se lograron remover 1.81 y 5.26 unidades logarítmicas en el sistema con *S. lancifolia*, 2.09 y 5.35 unidades logarítmicas en el sistema con *T. dominguensis* y 1.85 y 4.72 unidades logarítmicas en el sistema de control, en las etapas horizontal y vertical respectivamente.

La Figura 30 muestra el comportamiento de los sistemas de humedales híbridos en función de la variación del tiempo de permanencia, en cuanto al parámetro E. coli.

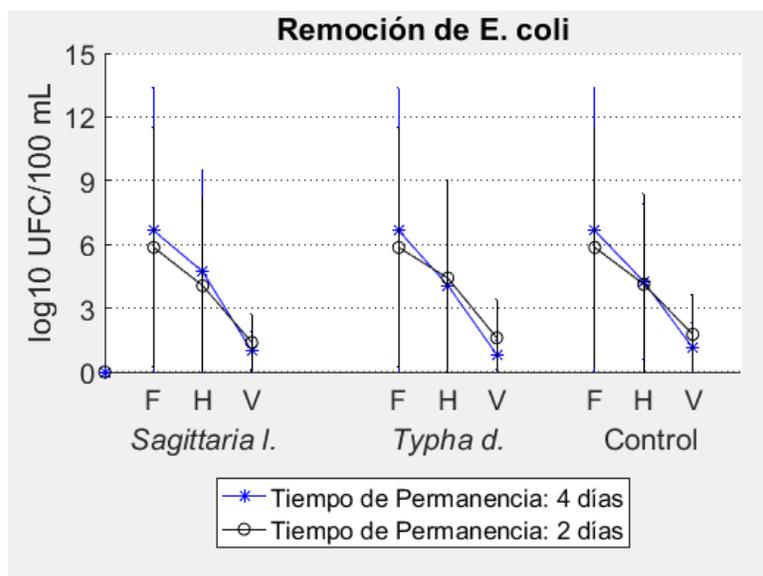


Figura 30 Remoción de E. coli en sistemas de humedales artificiales híbridos

Discusión de resultados: Patógenos

En los tres sistemas de humedales híbridos se da una efectiva eliminación de microorganismos patógenos, utilizando los CT y E. coli como indicadores. En los tres sistemas se alcanzan porcentajes mayores al 99.99% de remoción, de 1.8×10^7 a 119 UFC/100 ml en el humedal con mejores resultados (*Typha dominguensis*), por lo que se puede concluir que los humedales artificiales híbridos son una excelente herramienta de desinfección.

Los mecanismos que contribuyen a la desinfección en humedales híbridos son físicos como la sedimentación y filtración, así como biológicos como la mortandad de los patógenos y predación por otros microorganismos (Kadlec y Knight, 1996). Zurita, et al. (2015) menciona un mecanismo adicional de desinfección, el cual es la excreción de antibióticos por parte de las raíces de algunas especies de plantas.

La mayor desinfección se da en la etapa vertical, debido a la menor cantidad de espacios vacíos en el medio de soporte, lo cual favorece la desinfección por el proceso de filtración.

5.3.6 DESEMPEÑO DEL SISTEMA EN COMPARACIÓN CON NORMATIVIDAD VIGENTE

La Tabla 39 muestra los límites máximos permisibles de determinados contaminantes que propone el proyecto de Modificación de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. De los parámetros mencionados, en este estudio se monitorearon los SST, DQO, COT, NT, Fósforo y E. coli. En Yucatán, el agua se descarga a bienes nacionales por medio de infiltración.

Tabla 39 Límites Permisibles (Proyecto de Modificación NOM-001-SEMARNAT-1996)

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas y estuarios			Suelo					
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
SST (mg/L)	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140
DQO (mg/L)	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210
COT (mg/L)	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53
NKT(mg/L)	25	30	35	20	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Fósforo Total (mg/L)	15	18	21	12	15	18	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>E. coli</i> , (NMP/100 ml)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400

Comparando la Tabla 39 con los resultados del estudio en cuanto a los parámetros de interés se puede afirmar que:

- En el sistema de humedales artificiales híbridos con la especie *Sagittaria lancifolia*, el efluente cumple con los límites máximos permisibles del proyecto de modificación de la norma para los parámetros DQO, COT, SST, NKT, y *E. coli*.
- En el sistema de humedales artificiales híbridos con la especie *Typha dominguensis*, el efluente cumple con los límites máximos permisibles del proyecto de modificación de la norma para los parámetros DQO, COT, SST, NKT y *E. coli*.
- En el sistema de humedales artificiales híbridos de control, el efluente cumple con los límites máximos permisibles del proyecto de modificación de la norma en los parámetros DQO, COT, SST, NKT y *E. coli*.

5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración fue medida durante los meses de marzo, abril y mayo, por medio de dos métodos: el directo y el empírico (ver sección 4.6). Las figuras 31 y 32 muestran los resultados de dicha medición de manera diaria a través del tiempo de

estudio. A su vez, la Tabla 39 muestra los resultados de la evaporación promedio por mes y por cada configuración de humedales. La evapotranspiración aumentó conforme avanzó el año, siendo mayor en el mes de mayo. También se destaca que el fenómeno completo de evapotranspiración se da en los humedales con plantas, lo cual se evidencia con la diferencia diaria entre la evapotranspiración de los humedales con plantas y los de control. En los humedales de control lo que ocurre es únicamente la evaporación.

Con la información medida, se puede calcular el coeficiente de cultivo adimensional (K_c), el cual permite calcular la evapotranspiración real de un cultivo a través de una evaporación de referencia que se puede obtener de estaciones meteorológicas. Este coeficiente también proporciona información sobre la variación de la evapotranspiración a través de los distintos meses del año. El coeficiente de cultivo se calcula con la Ecuación 12, y los resultados de dicho cálculo a través de los meses de estudio se presentan en la Tabla 45.

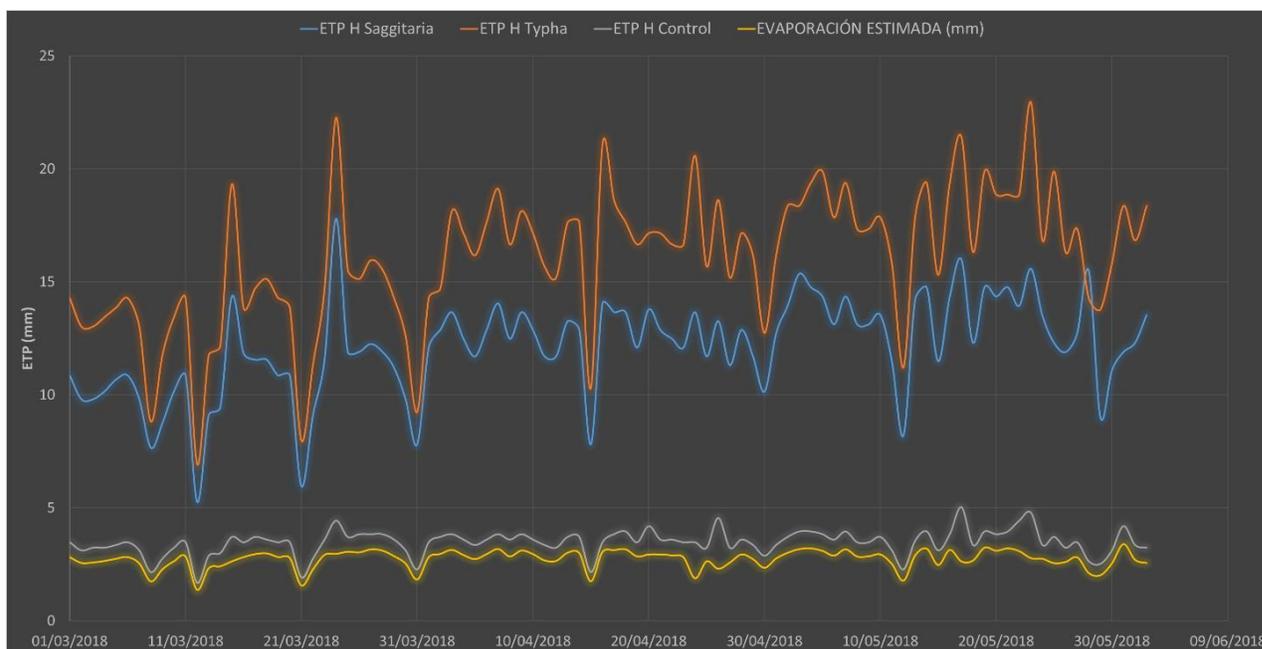


Figura 31 Evapotranspiración en Humedales Horizontales y Estimada (mm)

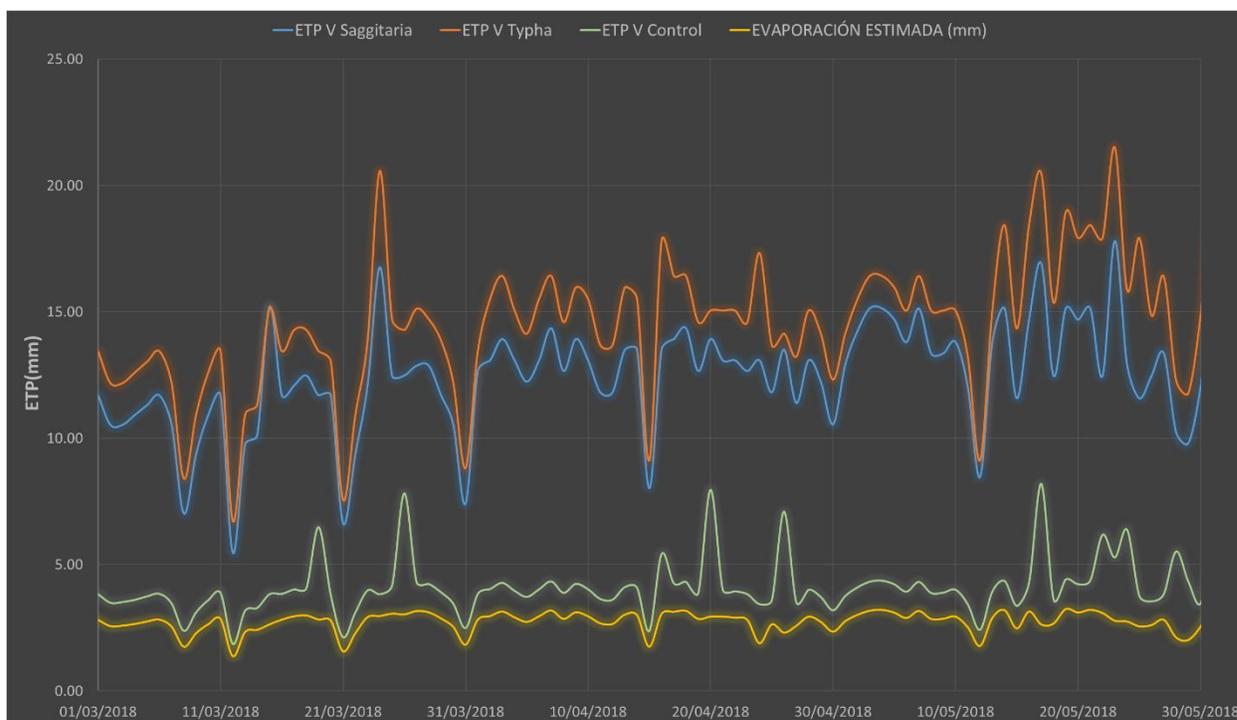


Figura 32 Evapotranspiración en Humedales Verticales y Estimada (mm)

Tabla 40 Evapotranspiración promedio en el Sistema de Humedales Híbrido

HUMEDAL		EVAPOTRANSPIRACIÓN PROMEDIO (mm/d)					
		MARZO		ABRIL		MAYO	
		PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.	PROMEDIO	D.E.
HORIZONTAL	SAGGITARIA	10.49	2.29	12.51	1.28	13.30	1.81
	TYPHA	13.56	2.92	16.78	2.11	17.76	2.32
	CONTROL	3.26	0.59	3.56	0.41	3.63	0.59
VERTICAL	SAGGITARIA	11.07	2.27	12.79	1.26	13.56	2.03
	TYPHA	12.72	2.56	14.84	1.65	16.07	2.61
	CONTROL	3.75	1.08	4.14	1.04	4.37	1.09
ESTIMADA		2.61	0.45	2.80	0.34	2.82	0.38

Tabla 41 Coeficientes de Cultivo (Kc)

HUMEDAL		Kc		
		MARZO	ABRIL	MAYO
HORIZONTAL	SAGGITARIA	4.02	4.47	4.71
	TYPHA	5.19	5.99	6.29
VERTICAL	SAGGITARIA	4.24	4.57	4.80
	TYPHA	4.87	5.30	5.69

Discusión de resultados: Evapotranspiración

Como se puede observar en los resultados, la evapotranspiración se incrementa conforme los meses del año avanzan en la región, ya que las temperaturas se incrementan desde marzo hasta mayo (periodo de duración del estudio).

Se calcularon los coeficientes de cultivo (K_c), el cual es un parámetro muy importante para estimar la evapotranspiración en el sistema por medio de datos meteorológicos (evaporación de referencia). Para la especie *Sagittaria lancifolia* no existen valores de dicho coeficiente reportados, por lo que este estudio proporciona mayor información en cuanto al comportamiento de esta especie en cuanto a la evapotranspiración. Los coeficientes de cultivo resultantes del estudio para la especie *Typha dominguensis* (Tabla 41), son mayores a los reportados por Glenn, et al. (1995) y Towler, et al. (2004) de 1.3 y 2 respectivamente.

5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DISCUSIÓN

Para el análisis estadístico de los resultados, se aplicó un análisis de varianza ANOVA multifactorial, en el cual las variables independientes fueron los tiempos de permanencia (2 y 4 días) y la presencia o ausencia de plantas en el sistema.

Con este análisis se determinó si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las variables independientes, en cuanto a su respuesta sobre los parámetros medidos en el estudio.

Cuando el valor-P resultante del análisis es menor a 0.05, se puede establecer con un 95% de confianza que existen diferencias estadísticamente significativas entre las variables analizadas sobre la respuesta.

La Tabla 42 muestra los resultados del análisis ANOVA multifactorial, marcando en rojo los valores-P que marcan diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 42 Resultados del Análisis ANOVA Multifactorial

FACTOR	VALORES P					
	ESPECIE DE PLANTA		TIEMPO DE PERMANENCIA		INTERACCIÓN	
	HORIZONTAL (PARCIAL)	VERTICAL (GLOBAL)	HORIZONTAL (PARCIAL)	VERTICAL (GLOBAL)	HORIZONTAL (PARCIAL)	VERTICAL (GLOBAL)
<u>DQO</u>	0.2196	0.9975	0.0000	0.0000	0.5268	0.9947
<u>DBO5</u>	0.8935	0.9948	0.0002	0.0004	0.819	0.9954
<u>NKT</u>	0.0121	0.9792	0.0000	0.0000	0.6007	0.9775
<u>NH4</u>	0.0566	0.9793	0.0004	0.0637	0.9312	0.9983
<u>NO3</u>	0.0000	0.0108	0.0000	0.0429	0.0001	0.6203
<u>PO4</u>	0.0175	0.2467	0.1217	0.237	0.3902	0.907
<u>COT</u>	0.9028	0.9929	0.1011	0.0049	0.8612	0.9918
<u>CT</u>	0.715	0.9996	0.1396	0.1542	0.7145	0.9995
<u>E. Coli</u>	0.8524	0.9909	0.0736	0.0356	0.8508	0.9876
<u>ST</u>	0.0485	0.3464	0.8246	0.4205	0.7238	0.5636
<u>SST</u>	0.86	0.9971	0.0000	0.0000	0.8899	0.9982
<u>SDT</u>	0.8983	0.969	0.0298	0.1268	0.9201	0.9102

Materia Orgánica

El análisis estadístico (Tabla 41) mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas en la remoción de materia orgánica entre humedales con plantas o sin plantas. Sin embargo, sí hay diferencias estadísticamente significativas para la remoción de materia orgánica entre los dos tiempos de permanencia, alcanzando mayores remociones en la campaña de 2 días. Esto puede deberse a que la concentración de materia orgánica disponible en la fosa séptica fue mayor durante la campaña de 2 días, lo cual permitió al sistema eliminar una mayor cantidad de materia orgánica, ya que en el efluente final las concentraciones son similares entre ambas campañas (todas menores a 20 mg/L en los tres sistemas).

Nutrientes

Como muestra el análisis estadístico (Tabla 41), para el NKT existen diferencias estadísticamente significativas en la remoción entre los dos tiempos de permanencia evaluados, obteniendo mejores resultados en el tiempo de 2 días. Esto podría deberse a que en la campaña de muestreos de 2 días había mayor concentración de NKT

disponible en la fosa séptica que en la campaña de 4 días, así como a la aclimatación del sistema, ya que la campaña del tiempo de permanencia de 2 días sucedió 2 meses después que la de 4 días. A su vez, existen diferencias estadísticamente significativas entre los humedales horizontales con plantas y el de control en la remoción de NKT, obteniendo mejores remociones en los humedales con plantas. Esto es debido a que las especies vegetales consumen el NH_4 (el cual es componente del NKT junto al N- Orgánico) para su crecimiento (Kadlec y Wallace, 2008). A su vez, una fracción del NKT se remueve mediante la eliminación de materia particulada, la cual sucede por procesos como la sedimentación y la filtración (UN, 2008).

Por otro lado, la concentración de NH_4 entre el influente y efluente se redujo en porcentajes mayores al 90% y, como muestra el análisis estadístico (Tabla 41), no hay diferencias estadísticamente significativas entre el tiempo de permanencia aplicado, ni entre los efluentes de humedales con vegetación. Sin embargo, en la etapa horizontal sí se presentan diferencias entre humedales con plantas y el de control para la remoción de NH_4 , lo cual indica, como se mencionó anteriormente, el consumo de este compuesto para crecimiento de las plantas.

En la etapa horizontal hay diferencias estadísticamente significativas en remociones de NO_3 entre los humedales con plantas y de control, entre los dos tiempos de permanencia y en la interacción de ambos factores, resultando en mayores concentraciones de NO_3 en el humedal horizontal de control para un tiempo de permanencia de 2 días. El análisis estadístico muestra que de manera global en los humedales híbridos hay una menor concentración de NO_3 en sistemas con plantas y cuando se da un mayor tiempo de permanencia del agua residual.

El análisis estadístico para PO_4 muestra que en la etapa horizontal hay una mayor remoción de fósforo en humedales con plantas que en el de control, lo cual indica la influencia de las especies vegetales, ya que utilizan el fósforo para su crecimiento (Kadlec y Knight, 1996).

Sólidos

El análisis estadístico muestra que hay diferencias estadísticamente significativas en la remoción de SST entre los dos tiempos de permanencia, resultando en una mayor cantidad de SST removidos en el tiempo de 2 días. Esto puede deberse a que la concentración en la entrada al sistema era mayor en esta campaña de muestreo que en la de 4 días, y por tanto se elimina una mayor cantidad de sólidos, ya que las concentraciones en el efluente son similares. No existe diferencia significativa entre los humedales con plantas y el de control, lo cual indica que esta fracción de sólidos se elimina en mayor medida por procesos físicos como la sedimentación y filtración (Navarro, et al., 2014).

No existen diferencias estadísticamente significativas entre humedales con plantas y de control ni entre tiempos de permanencia para la remoción de ST. El mismo caso se presenta en la remoción de SDT, sin embargo si se muestran diferencias significativas en su remoción para la etapa horizontal en cuanto a tiempos de permanencia.

Patógenos

El análisis estadístico muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas en la remoción de CT ni entre los humedales con plantas y de control, ni entre los dos tiempos de permanencia estudiados, ya que en todos se logra una adecuada desinfección.

Sin embargo, el análisis estadístico si arroja diferencias significativas entre los dos tiempos de permanencia de 2 y 4 días para la eliminación de E. coli, dando mejores resultados cuando existe un tiempo de permanencia del agua de 4 días.

Evapotranspiración

Se aplicó un análisis de regresión lineal entre los parámetros medidos en el estudio con la evapotranspiración, a partir del cual se encontraron relaciones significativas entre la evapotranspiración y la remoción de NKT (valor-P=0.0161). Sin embargo, el estadístico R^2 de 31.13% indica que es una relación moderadamente fuerte. También hubo relaciones significativas entre la remoción de NH_4 y la evapotranspiración (valor-P=0.028) con una R^2 de 26.58%, lo cual indica una relación moderadamente fuerte.

Esto apoya la hipótesis de que parte del NH_4 fue removido por medio de la volatilización y que la alta evapotranspiración estaría favoreciendo este fenómeno. Aunque la volatilización puede considerarse como un factor negativo, puede asegurarse que la mayor parte del Nitrógeno en los humedales fue removido por otros mecanismos, descritos anteriormente. Para los demás parámetros no se encontró relación entre la evapotranspiración y la remoción.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El agua residual estudiada tuvo una composición típica de agua residual doméstica como reportan Metcalf & Eddy (1991) y, debido a la relación DQO/DBO₅ encontrada de 2.59, se concluyó que el tratamiento por medio de humedales artificiales híbridos es adecuado ya que no requiere necesariamente de tratamiento químico.

Se utilizó una fosa séptica como medio de pretratamiento para la eliminación de sólidos que puedan dañar las instalaciones del sistema de humedales, la cual alcanzó su objetivo al remover más del 70% de los SST.

Los sistemas de humedales artificiales híbridos cumplieron con su objetivo de eliminación de materia orgánica (más del 95% de remoción de DQO, DBO₅ y COT en los tres sistemas), nutrientes (más del 65% del NT y más del 80% del PO₄ en los humedales con plantas) y de desinfección (más del 99.99% de remoción de CT y E. coli en los tres sistemas). La concentración de NO₃ se incrementó en el efluente, por lo que se recomienda adoptar nuevas estrategias de operación como la recirculación en el sistema para su correcta eliminación, lo que provocaría una mayor remoción del NT.

Las especies de plantas utilizadas se aclimataron adecuadamente al sistema alcanzando porcentajes de cobertura del humedal mayores al 85% al final del estudio y crecimiento en altura mayores al 80% de la altura inicial. La influencia de las plantas fue clara en la remoción de nutrientes.

Para una futura propuesta de diseño, se recomienda la utilización de plantas en los humedales artificiales híbridos así como adoptar un tiempo de permanencia de 4 días para óptimos resultados en el efluente, ya que cumple con los 3 objetivos (eliminación de materia orgánica, de nutrientes y patógenos).

REFERENCIAS

- Aguilar, M. R., Cruz, A. C., & Salinas, E. S. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- Albalawneh, A., & Naoum, T.-K. C.-S. (2016). Efficiency of a Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetland Treatment System in an Arid Area. *Water*, 1-16.
- APHA. (1985). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C.
- Ávila, J. P., Canul, R. P., & Sansores, A. C. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente en relación al agua subterránea y su efecto en seres vivos. *Ingeniería*, 73-81.
- Bhatia, M., & Goyal, D. (2014). Analyzing remediation potential of wastewater through wetland plants: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 9-27.
- Birk, S. (2003). Evaluation of the wastewater pathogen and contaminant removal performance of a constructed wetlands matrix composed of Limestone/ Carica Papaya using lab-scale models. Mérida, Yucatán: Stuttgart University of Applied Sciences.
- Brix, H., Arias, C., & Bubba, M. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science Technology*, 47-54.
- Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Agua. (2010). *Características de las Aguas Residuales*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Chan, D., Huang, Y.-H., Wang, S.-C., & Wang, X.-H. (2016). Oxygen Supply and Wastewater Treatment in Subsurface-Flow Constructed Wetland Mesocosm: Role of Plant Presence. *Polish Journal of Environmental Studies*, 573-579.
- Chavez, M. (2009). Humedales artificiales para limpiar agua sucia. *Contenido*, 21-22.

- CONABIO. (18 de Marzo de 2007). *Typha Domingensis*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>
- CONAGUA. (2014). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. México: CONAGUA.
- Cui, L.-h., Liu, W., Zhu, X.-z., Ma, M., Huang, X.-h., & Xia, Y. (2006). Performance of hybrid constructed wetland systems for treating septic tank effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 665-669.
- Deeptha, V., Sudarsan, J., & G.Baskar. (2014). Performance and cost evaluation of constructed wetland for domestic waste water treatment. *Journal of Environmental Biology*, 1071-1075.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Luis, P., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: UMSS.
- Espinosa Ortiz, C. (2014). *Factibilidad del Diseño de un humedal de Flujo Subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30,000 habitantes*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Estrada, I. (2010). *Monografía de sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de Metales Pesados en Aguas residuales*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- FAO. (2012). *Glosario de Términos*. Obtenido de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html>
- Faulkner, S., & Richardson, C. (1989). *Physical and chemical characteristics of freshwater wetlands soils*. Tennessee: Lewis Publishers.
- Fenoglio, L. (2000). *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical*. Universidad Nacional Autónoma de México, México: Tesis de Licenciatura.

- Ferrari, D., Pozzolo, O., & Ferrari, H. (2006). Desarrollo de un Software para Estimación de Cobertura Vegetal. (E. E. INTA, Ed.) Obtenido de <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/varios/DesarrolloSoftEstimacionCoberturaVegetal.asp>.
- García Robles, C. A. (2007). Evaluación de la eficiencia de los procesos de eliminación de materia orgánica y nitrógeno en un humedal artificial con flujo subsuperficial horizontal a microescala para el tratamiento de agua residual (Vol. Tesis de Maestría). Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Giacomán Vallejos, G., Tapia González, F., & Ponce Caballero, M. (2010). Tecnología Experimental: Humedales Artificiales. Campeche: FOCARE.
- Glenn, E., Lewis, T., Frye, R., Riley, J., & Baumgartner, D. (1995). Effects of salinity on growth and evapotranspiration of *Typha domingensi*. *Aquatic Botany*, 75-91.
- Haghshenas-Adarmanabadi, A., Heidarpour, M., & Tarkesh-Esfahani, S. (2015). Evaluation of Horizontal–Vertical Subsurface Hybrid Constructed Wetlands for Tertiary Treatment of Conventional Treatment Facilities Effluents in Developing Countries. *Water Air Solid Pollution*, 19.
- Haiming, W., Jinlin, F., Jian, Z., Ngo, H. H., Wenshan, G., Shuang, L., & Zhen, H. (2015). Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment. *Environmental Science & Pollution Research*, 14637-14650.
- Hermosillo, M., Linaje, M., Valencia, C., Hernández, L., & Balagurusamy, N. (2011). Humedales artificiales: Sistema Sustentable para el Tratamiento de Aguas residuales- Una Perspectiva para México. Campeche: UAC.
- INEGI. (2017). COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 127/17. Aguascalientes: INEGI.
- Jamieson, R., Gordon, R., Wheeler, N., Smith, E., Stratton, G., & Madani, A. (2007). Determination of first order rate constants for wetlands treating livestock wastewater in cold climates. *Journal of Environmental Engineering and Sciences*, 65-72.

- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Ratón: Ed. CRC Press.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands (Segunda Edición ed.)*. Taylor & Francis.
- Li, K., Wang, L., Li, Z., Miao, J., & Wang, X. (2015). Design of Constructed Wetland for Treatment of Tailwater from Wastewater Plant. *Agricultural Science and Technology*, 568-572.
- López Salazar, J. (2015). *Tratamiento de Aguas Residuales: Aplicación de Humedales Artificiales*. México, D.F.: UNAM.
- Meng, P., Pei, H., Hu, W., & Li, Z. (2013). Performance Evaluation of Light Weight Aggregates-Based Horizontal Flow Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment. *CLEAN*, 1-7.
- Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. USA: McGrawHill.
- Naturales, S. d. (23 de Abril de 2003). NOM-001-SEMARNAT-1996 . Obtenido de www.profepa.gob.mx: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>
- Navarro, A., Morales , L., Sánchez, J., Montoya, J., & Herrera, J. (2014). Depuración terciaria de aguas residuales municipales con humedales híbridos: una experiencia piloto. *Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental*,, 72-78.
- Novelo, R. M. (2007). Determinación de la tasa de acumulación de lodos en fosas de la ciudad de Mérida, Yucatán. *Ingeniería*, 55-64.
- Osnaya, M. (2012). *Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el tratamiento de Aguas Residuales* . México: Universidad del Sierra Juárez.
- PAHO. (2012). DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DBO/DQO. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>

- Palta-Prado, G., & Morales-Velasco, S. (2013). Fitodepuración de aguas residuales domésticas con poáceas: *Brachiaria Mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum Maximun* en el municipio de Popayán, Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 57-65.
- Papaevangelou, V., Gikas, G., & Tsihrintzis, V. (2012). Evaluation of evapotranspiration in small on-site HSF constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health*, 766-785.
- Portier, R., & Palmer, S. (1989). *Wetlands Microbiology: Form, function, processes*. En D. Hammer, *Constructed Wetlands for Water Treatment* (pág. 818). EUA: Lewis Publishers.
- Ramalho, R. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canadá: Editorial Reverte.
- Ramos Cabello, I. (2000). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la zona de Huajuco, mediante un sistema de filtro percolador y contacto de sólidos*. Monterrey, Nuevo León: UANL.
- Rodríguez, A. e. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología y Ciencia*, 21.
- Rozema, E. R., VandeerZag, A., Drizo, J. D., Zheng, Y., Madani, A., & Gordon, R. (2016). *Constructed Wetlands for Agricultural Wastewater Treatment in Northeastern North America: A review*. *Water*, 1-14.
- SEDUMA. (2010). *Zona Metropolitana de Mérida*. Mérida, México: Gobierno del Estado de Yucatán.
- SEDUMA. (2014). *Tipo de tratamiento de aguas negras*. Mérida: Gobierno del Estado de Yucatán.
- Sehar, S., Aamir, R., Naz, I., Ali, N., & Ahmed, S. (2013). Reduction of Contaminants (Physical, Chemical, and Microbial) in Domestic Wastewater through Hybrid Constructed Wetland. *Microbiology*, 9.

- Seong-Heon, K., Ju-Sik, C., Jong-Hwan, P., & Jong-Soo, H. (2016). Long-term performance of vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands as affected by season, N load, and operating stage for treating nitrogen from domestic sewage. *Environ Sci Pollut Res*, 1108-1119.
- Tapia González, F., Giacomani Vallejos, G., Herrera Silveira, J., Quintal Franco, C., García, J., & Puigagut, J. (2009). Treatment of swine wastewater with subsurface-flow constructed wetlands in Yucatán, México: Influence of Plant Species and Contact Time. *Water SA*, 1816-7950.
- Tejeda, M., & Zurita, F. (2014). Comparación de la eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. *Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua* (pág. 6). Morelia, Michoacán: IMTA.
- Torres Bojorques, Á., Hernández Razo, N., Fausto Urquieta, A., & Zurita Martínez, F. (2014). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37-47.
- Towler, B., Cahoon, J., & Stein, O. (2004). Evapotranspiration Crop Coefficients for Cattail and Bulrush. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Tuncsiper, B. (2009). AN EXPERIMENTAL THREE-STAGE HYBRID CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM FOR REMOVAL OF ORGANICS AND NUTRIENTS FROM DOMESTIC WASTEWATER. *Environmental Engineering and Management Journal*, 59-65.
- United Nations Human Settlements Programme. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. Nepal, Katmandu: UN-Habitat.
- Universidad de Florida. (11 de Mayo de 2016). Center for Aquatic and Invasive Plants. Obtenido de <https://plants.ifas.ufl.edu/plant-directory/sagittaria-lancifolia/>
- Vera, A., Andrade, C., Flores, E., Nuñez, M., Cárdenas, C., & Morales, E. (2010). Removal of nutrients and organic matter in a constructed wetland, in function of

- the development of the macrophyte *Typha dominguensis*. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* , 145-152.
- Villasuso, M., & Méndez, R. (2000). A Conceptual Model of the Acuífer of the Yucatan Peninsula. En W. Lutz, L. Prieto, & W. Anderson (Edits.), *Population, Development and Environment on the Yucatan Peninsula* (págs. 120-139). Austria: International Institute for Applied Sciences.
- Yu, Z., Rahardianto, A., Stenstrom, M., & Cohen, Y. (2016). Performance and Economic Evaluation of a Semibatch Vertical-Flow Wetland for Onsite Residential Bathrom Graywater Treatment. *American Water Works Association*, 392-404.
- Yuan, G., Xiaochang, W., Yucong, Z., Mawuli, D., Yaqian, Z., & Jiaqing, X. (2015). Functions of slags and gravels as substrates in large-scale demonstration constructed wetland systems for polluted river water treatment. *Environmental Science & Pollution Research*, 12982-12991.
- Zurita, F., Rojas Bravo, D., Carreón Álvarez, A., & Gutierrez-Lomelí, M. (2015). DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN TRES SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS HÍBRIDOS. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 40-44.
- Zurita, F., Roy, E. D., & White, J. R. (2012). Municipal wastewater treatment in Mexico: current status and opportunities for employing ecological treatment systems. *Environmental Technology*, 1151-1158.