

**Eficiencia de los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales en
Colombia**

Camila Muñoz Guevara

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2025

**Eficiencia de los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales en
Colombia**

Camila Muñoz Guevara

Monografía para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Carlos Andrés Fajardo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2025

Página de Aceptación

Carlos Andrés Fajardo

Director Trabajo de Grado

Sonia Esperanza Ruiz Balaguera

Jurado

Bogotá 2025

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios que me ha ayudado durante estos años, por la fuerza y la sabiduría necesaria para continuar y lograrlo.

A mis padres Eduvin Muñoz y Omaira Guevara, quienes me han heredado el tesoro más valioso que puede dársele a una hija, el amor. A quienes, sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en una persona de provecho. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Gracias por su ejemplo de superación incansable, porque sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de mi carrera profesional.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, y su Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, y de Medio Ambiente por haberme aceptado ser parte de ella, así como también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante.

A mi Tutor de Monografía, Carlos Andrés Fajardo Gómez por brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, por recordarme que la investigación es una tarea en equipo.

A todos aquellos quienes de alguna manera aportaron a esta nueva tarea emprendida y que han estado a mi lado siempre, apoyándome, motivándome e impulsándome a salir adelante.

Por lo que ha sido y será... Gracias.

Resumen

Este documento presenta una visión general de la investigación sobre humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en regiones tropicales. Se han realizado varios estudios utilizando diversas especies de plantas para evaluar la eficiencia de estos sistemas en la eliminación de parámetros clave como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los resultados muestran que estos humedales artificiales han demostrado capacidades significativas de eliminación, con una tasa promedio de eliminación de DBO del 76%, una tasa de eliminación de DQO del 77.5% y una amplia gama de tasas de eliminación de SST que van desde el 44% hasta el 99.8%.

Además, los estudios han resaltado la importancia de seleccionar especies de plantas adecuadas para las condiciones ambientales específicas, siendo *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis* y *Canna indica* especies comúnmente utilizadas en regiones tropicales. Estos hallazgos enfatizan el potencial de los humedales artificiales como soluciones efectivas y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en áreas tropicales.

Palabras claves: *Humedal artificial, aguas residuales, macrófitos, trópico, biorremediación*

Abstract

This document presents an overview of research on artificial wetlands for wastewater treatment in tropical regions. Several studies have been conducted using various plant species to assess the efficiency of these systems in removing key parameters such as Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), and Total Suspended Solids (TSS). The results show that these artificial wetlands have demonstrated significant removal capabilities, with an average BOD removal rate of 76%, a COD removal rate of 77.5%, and a wide range of TSS removal rates from 44% to 99.8%.

Additionally, the studies have highlighted the importance of selecting appropriate plant species for the specific environmental conditions, with *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis*, and *Canna indica* being commonly used species in tropical regions. These findings emphasize the potential of artificial wetlands as effective and sustainable wastewater treatment solutions in tropical areas.

Keywords: *Artificial wetland, wastewater, macrophytes, tropics, bioremediation*

Resumo

Este documento apresenta uma visão geral da pesquisa sobre zonas úmidas artificiais para o tratamento de águas residuais em regiões tropicais. Vários estudos foram realizados usando diversas espécies de plantas para avaliar a eficiência desses sistemas na remoção de parâmetros-chave, como Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST). Os resultados mostram que essas zonas úmidas artificiais demonstraram capacidades significativas de remoção, com uma taxa média de remoção de DBO de 76%, uma taxa de remoção de DQO de 77,5% e uma ampla gama de taxas de remoção de SST variando de 44% a 99,8%.

Além disso, os estudos destacaram a importância de selecionar espécies de plantas apropriadas para as condições ambientais específicas, sendo *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis* e *Canna indica* espécies comumente usadas em regiões tropicais. Essas descobertas enfatizam o potencial das zonas úmidas artificiais como soluções eficazes e sustentáveis para o tratamento de águas residuais em áreas tropicais.

Palavras-chave: *Wetland artificial, águas residuais, macrófitas, trópicos, biorremediação.*

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Resumo	7
Tabla de contenido.....	8
Lista de tablas	10
Lista de figuras.....	11
Introducción	13
Planteamiento del problema.....	15
Justificación	17
Objetivos.....	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos.....	19
Marco teórico.....	20
¿Que son aguas residuales?.....	20
Normatividad de Aguas Residuales en Colombia.....	20
¿Qué es un humedal artificial?	21
Tipos de humedales artificiales	22
Humedal construido en superficie de agua libre	22
Humedal de flujo horizontal	23
Humedal de flujo vertical	23
Humedal de flujo vertical francés.....	24
Humedal híbrido	25
Humedal de deflector y flujo subterráneo	26
Humedal aireado.....	26
Tipos vegetación y medios de remoción utilizados	27
Marco referencial	34
Metodología	34

Estado del arte	36
<i>Áreas de estudio</i>	36
<i>La articulación con el urbanismo: La flor y la mariposa</i>	40
<i>Lixiviados ¿es posible?</i>	41
<i>Como sistema individual de tratamiento de vertimientos domésticos</i>	43
<i>Para el saneamiento en instituciones educativas</i>	45
<i>El tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica</i>	46
<i>Su aplicación en la acuicultura – industria de los mariscos</i>	47
<i>El sistema para tratar aguas residuales en destilerías</i>	48
<i>Tratamiento de efluentes industriales – industria textil</i>	49
<i>Tratamiento de aguas residuales de un centro de cuidado animal – éxito de combinar sistemas de humedales artificiales</i>	50
<i>La industria azucarera</i>	51
<i>Integración de los humedales artificiales con los cuerpos de agua naturales urbanos y fortalecimiento de los servicios ecosistémicos</i>	52
A nivel local	54
<i>Piloto a escala real en un centro educativo</i>	54
<i>Como estructura de refuerzo en PTAR obsoleta</i>	55
Resultados y discusión.....	58
Discusión de los resultados	58
Remoción de parámetros.....	61
Viabilidad de la implementación de los sistemas de humedales artificiales en Colombia.....	65
De la disponibilidad de las especies de macrófitos.....	66
Conclusiones y recomendaciones	68
Conclusiones	68
Recomendaciones.....	69
Bibliografía	70

Lista de tablas

Tabla 1 *Concentraciones de los parámetros del lixiviado en el influente y efluente*..... 42

Tabla 2 *Especies y nombres comunes utilizados en las investigaciones consultadas* 58

Lista de figuras

Figura 1 <i>Humedal en superficie de agua libre</i>	22
Figura 2 <i>Humedal de flujo horizontal</i>	23
Figura 3 <i>Humedal de flujo vertical</i>	24
Figura 4 <i>Humedal de flujo vertical francés</i>	25
Figura 5 <i>Esquema de humedal híbrido</i>	26
Figura 6 <i>Cabomba caroliniana</i>	27
Figura 7 <i>Especie de la Familia Typha</i>	28
Figura 8 <i>Pistia stratiotes o “repollito de agua”</i>	29
Figura 9 <i>Heliconia indica</i>	30
Figura 10 <i>Canna indica</i>	30
Figura 11 <i>Cyperus involucratus</i>	31
Figura 12 <i>Cyperus papyrus en inmediaciones de los drenajes de “lagos del dique” – Xalapa, México</i>	32
Figura 13 <i>Phragmites australis en el humedal artificial de la localidad de Zbenice – República Checa</i>	33
Figura 14 <i>Diagrama de flujo de la metodología</i>	35
Figura 15 <i>Ubicaciones geograficas de los estudios realizados en la revisión</i>	38
Figura 16 <i>Esquemático longitudinal humedal artificial de Jinia (Uganda)</i>	39
Figura 17 <i>Panorámica del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Flor y la Mariposa</i>	41
Figura 18 <i>Esquema del humedal de flujo de superficie de Palau Burung</i>	43

Figura 19 <i>Diagrama y fotografía real del sistema de cascada y humedal artificial</i>	44
Figura 20 <i>Configuración del piloto del humedal de flujo de sub superficie en el campus de la universidad de Jimma</i>	45
Figura 21 <i>Fotografía del humedal de flujo subsuperficial, Tres Ríos (Costa Rica)</i>	47
Figura 22 <i>Estado de las plantas de Heliconia y Cyperus papyrus en el HFV durante 2020 y 2021</i>	49
Figura 23 <i>Fotografía del humedal de flujo libre y el de flujo sub superficial, Santa Fe (Argentina)</i>	51
Figura 24 <i>Configuración y ubicación de los humedal artificiales Hsin-Hai (izq) y Daniaopi (der) – Taipei</i>	53
Figura 25 <i>Humedal Centro Experimental Javeriano en Cogua (Cundinamarca)</i>	55
Figura 26 <i>Humedal artificial de flujo subsuperficial para coadyuvar el proceso del tratamiento de las aguas residuales urbanas en la PTAR del municipio de Buenavista</i>	57
Figura 27 <i>Relación de los estudios realizados y las especies utilizadas en cada uno de ellos</i> ...	60
Figura 28 <i>Remoción de la DBO en los estudios revisados</i>	62
Figura 29 <i>Remoción de la DQO en los estudios realizados</i>	63
Figura 30 <i>Eficiencia de la remoción de los SST</i>	64

Introducción

La presente monografía surge de la necesidad de comprender el avance en el uso de tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales en Colombia. Esto cobra especial relevancia dado que el país, que cuenta con una considerable población rural, se ha comprometido a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030, en particular el sexto objetivo: agua limpia y saneamiento.

En el marco de este ODS, el gobierno ha realizado actualizaciones en sus Reglamentos de Agua Potable y Saneamiento Básico, comúnmente conocidos como RAS y el cual consta de once títulos o secciones identificados de la A a la K. Específicamente, se han realizado modificaciones en el título E (denominado tratamiento de aguas residuales versión 2021), referente como su título lo menciona al tratamiento de aguas residuales, y en el título J, (que se denomina Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural) que aborda y describe las alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural. Sin embargo, es relevante destacar que, aunque se mencionan las características técnicas de los sistemas de humedales artificiales en el anexo 2 del Título E, estos no son mencionados en el título J. Esto es notable ya que el sector rural podría beneficiarse significativamente de la implementación de lagunajes artificiales para el tratamiento de aguas residuales, dado que, según Navarro-Frómata & Durán-Domínguez (2019), estos sistemas son sostenibles, de diseño sencillo, con bajos costos de construcción y operación, lo que permite sistemas de saneamiento descentralizados.

Por tanto, este trabajo se enfocará en recopilar información acerca de los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en Colombia. Asimismo, se compararán con la situación actual de estos sistemas en países con condiciones climáticas similares a las de nuestro país, ya que, como sugieren Kadlec & Reddy (2001, p.43), varios

procesos en los humedales, como las reacciones mediadas por microorganismos y la descomposición de la materia orgánica, están influenciados por la temperatura.

Una vez establecido el tema central de esta monografía, se procedió a investigar en bases de datos científicas y académicas (*Scopus, ScienceDirect, Dialnet, Scielo, Repositorio institucional*), donde se evaluaron un total de 42 artículos de literatura e investigaciones relacionadas. A partir de esta revisión, surgió el siguiente cuestionamiento: ¿Cuántos sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se han implementado en Colombia y en regiones tropicales similares a la nuestra, y qué eficiencia han demostrado? Esta pregunta se formuló teniendo en cuenta casos de éxito tanto en países de la región como en otras partes del mundo.

Planteamiento del problema

En Colombia, la implementación de tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales es un componente fundamental en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos para 2030, en particular, el sexto objetivo que se enfoca en la provisión de agua limpia y saneamiento. A pesar de que el gobierno ha realizado modificaciones en sus Reglamentos de Agua Potable y Saneamiento Básico, específicamente en el título E, referente al tratamiento de aguas residuales, y en el título J, que se enfoca en las alternativas tecnológicas para el agua y saneamiento en zonas rurales, la información disponible se limita mayormente a los sistemas de humedales artificiales en el anexo 2 del título E.

No obstante, los humedales artificiales representan sistemas de tratamiento de aguas residuales con características destacables, como su sostenibilidad, facilidad de diseño, costos reducidos tanto en construcción como en operación respecto a sistemas convencionales que usan sistemas de aireación y sistema de lodos activados y su capacidad para respaldar sistemas descentralizados de saneamiento. Estas cualidades los convierten en una alternativa viable y prometedora para abordar las necesidades del sector rural en Colombia en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales. Es relevante mencionar que en el título J del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico el cual ya mencionamos anteriormente, no se mencionan otras opciones de tratamiento más allá de los sistemas de humedales artificiales.

En consecuencia, resulta imperativo evaluar el grado de desarrollo alcanzado en la implementación de tecnologías alternativas, en particular, los sistemas de humedales artificiales, tanto en Colombia como en regiones con condiciones climáticas similares, y examinar su

eficacia en la eliminación de contaminantes presentes en el agua residual. Este estudio también busca resaltar la importancia de ampliar el alcance del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico para incluir y promover otras soluciones de tratamiento de aguas residuales, como los lagunajes artificiales, que podrían desempeñar un papel crucial en el logro de los objetivos de agua limpia y saneamiento en el país.

Justificación

El acceso al agua potable y al saneamiento básico constituye un derecho humano fundamental que los Estados deben garantizar, y Colombia no es una excepción. Cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos para 2030, particularmente el sexto objetivo relacionado con el acceso a agua limpia y saneamiento, no solo es una responsabilidad moral, sino también una necesidad apremiante para mejorar la calidad de vida de la población y preservar nuestro entorno natural.

En este contexto, la implementación de tecnologías alternativas, en especial los sistemas de humedales artificiales, emerge como una solución de gran relevancia. Estos sistemas ofrecen una propuesta sostenible, de bajo coste y de fácil implementación para el tratamiento de aguas residuales en entornos rurales. Su potencial para promover sistemas de saneamiento descentralizados es especialmente valioso en un país como Colombia, que cuenta con una significativa población rural. (15.8% según Departamento Nacional de Estadística (2018))

Sin embargo, para tomar decisiones informadas y diseñar políticas públicas eficaces en esta dirección, es imprescindible contar con información actualizada y precisa sobre la implementación y efectividad de estos sistemas tanto en Colombia como en regiones tropicales similares. Esta monografía se propone recopilar y analizar minuciosamente los datos disponibles acerca de los sistemas de humedales artificiales utilizados en el tratamiento de aguas residuales en Colombia. Además, se llevará a cabo una comparativa exhaustiva de su eficacia en relación con otros sistemas utilizados en la región.

El propósito último de este estudio es proporcionar información pertinente y valiosa a los responsables de la toma de decisiones gubernamentales, a los investigadores interesados en el

campo del saneamiento ambiental, así como a la sociedad en general. Este conocimiento permitirá fundamentar políticas públicas más efectivas, fomentar la adopción de tecnologías sustentables y, en última instancia, contribuir a la mejora del acceso al agua limpia y al saneamiento básico en Colombia y en otros contextos similares en todo el mundo.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la implementación y la efectividad de los sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en Colombia a través de la revisión de masas documentales.

Objetivos específicos

Determinar la cantidad de sistemas exitosos de tratamiento de humedales artificiales en Colombia.

Establecer si existe la viabilidad para la masificación de los sistemas de humedales artificiales en Colombia.

Comparar la efectividad de remoción de cada uno de los sistemas mencionados, contrastándolos con sistemas operando dentro de la zona tropical.

Marco teórico

¿Que son aguas residuales?

Tchobanoglous et al. (2003) define las aguas residuales como el suministro de agua de la comunidad después de haber sido utilizadas en una variedad de aplicaciones. En la literatura y en las regulaciones gubernamentales, se utilizan diversos términos para describir los componentes individuales presentes en las aguas residuales.

Esto ha generado una terminología comúnmente utilizada para comprender conceptos y términos clave en el tratamiento de aguas residuales. El primer término se refiere a un compuesto o elemento individual, como el nitrógeno amoníaco. El segundo término, "característica," se utiliza para agrupar constituyentes, ya sea en función de sus propiedades físicas o biológicas. Por último, el término "lodo" ha sido empleado durante muchos años para hacer referencia a los residuos producidos durante el tratamiento de aguas residuales.

Normatividad de Aguas Residuales en Colombia

En Colombia, la normatividad referente a las aguas residuales regula los vertimientos mediante la Resolución 0631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Esta resolución reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y se basa en el principio de la actualización de los parámetros y concentraciones de componentes presentes en los vertimientos. Dicha actualización responde a las cambiantes realidades urbanas, industriales y ambientales del país. La normativa permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua debido a los vertimientos producidos por las 73 actividades productivas en ocho sectores económicos del país.

El control se lleva a cabo a través de la medición de la concentración de las sustancias vertidas en los cuerpos de agua, lo que afecta la calidad del agua. Esto permite que las

autoridades ambientales realicen seguimiento y control del cumplimiento de las concentraciones máximas permitidas, resultado de las actividades industriales, comerciales o de servicios que vierten sus residuos en cuerpos de agua superficiales o en sistemas de alcantarillado.

¿Qué es un humedal artificial?

Según García-Ávila et al. (2023), un humedal artificial es una tecnología no convencional o natural diseñada para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas son conocidos por su bajo costo y facilidad de operación. Consisten en células o canales poco profundos (generalmente menos de 1 metro de profundidad) donde los principales componentes son el sustrato (que puede ser grava, arena, plástico, rocas de río, entre otros), microorganismos y vegetación; estas últimas, sean nativas o no, se cultivan en el sustrato. Gracias a la acción de los microorganismos adheridos al sustrato y las raíces de la vegetación, la materia orgánica presente en el agua residual se degrada de manera efectiva.

- Moulisová et al. (2023) los definen como sistemas diseñados que utilizan procesos naturales que involucran la interacción entre la vegetación de los humedales, el suelo y las comunidades microbianas asociadas para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas pueden variar en diseño y tipos, incluyendo sistemas de flujo horizontal subsuperficial o superficial, sistemas de flujo vertical, y combinaciones de estos. Durante las cinco décadas de su uso, su desempeño ha sido rigurosamente evaluado en función de sus diseños y tipos de aguas residuales, estas últimas Parde (2000) las divide en aguas residuales agrícolas, aguas residuales industriales de la industria láctea, aguas residuales industriales de curtiembres, aguas residuales industriales textiles, aguas residuales de la industria de pulpa y papel y aguas residuales de drenaje ácido de minas. Lo anterior ha establecido un amplio conocimiento sobre los mecanismos de tratamiento y los procesos

subyacentes. Las plantas desempeñan un papel fundamental en los humedales construidos, ya que sus raíces proporcionan superficies para la adhesión de microorganismos y suministran oxígeno y compuestos orgánicos esenciales para su metabolismo.

Tipos de humedales artificiales

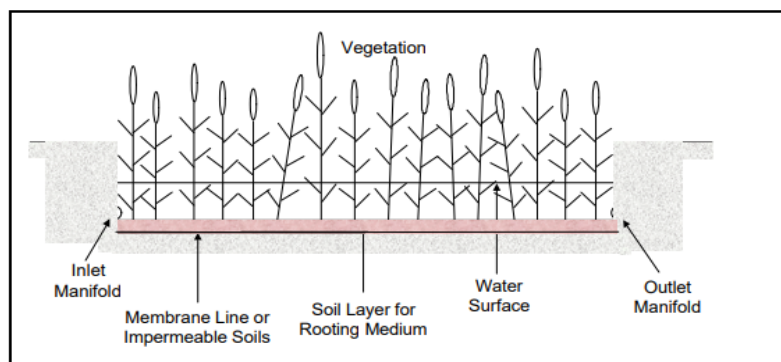
Los humedales artificiales de acuerdo con el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico en su título E (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021) los define como componentes de post tratamiento en procesos tecnológicos descentralizados, los cuales según Parde et al., (2021) se describen a continuación:

Humedal construido en superficie de agua libre

Es un humedal natural en el que las aguas fluyen sobre la superficie, utilizando plantas emergentes como la *Phragmites scirpus*, sumergidas como la *Elodea* y flotantes como la *Lemna* y la *Eichomia*, presentando este tipo de humedales una eliminación media de metales (hierro, cobre, zinc y plomo) DBO, SST y nitrógeno. Dada estas remociones se establece su amplia aplicación en tratamiento de aguas residuales agrícolas, de minería y de industria textil.

Figura 1

Humedal en superficie de agua libre



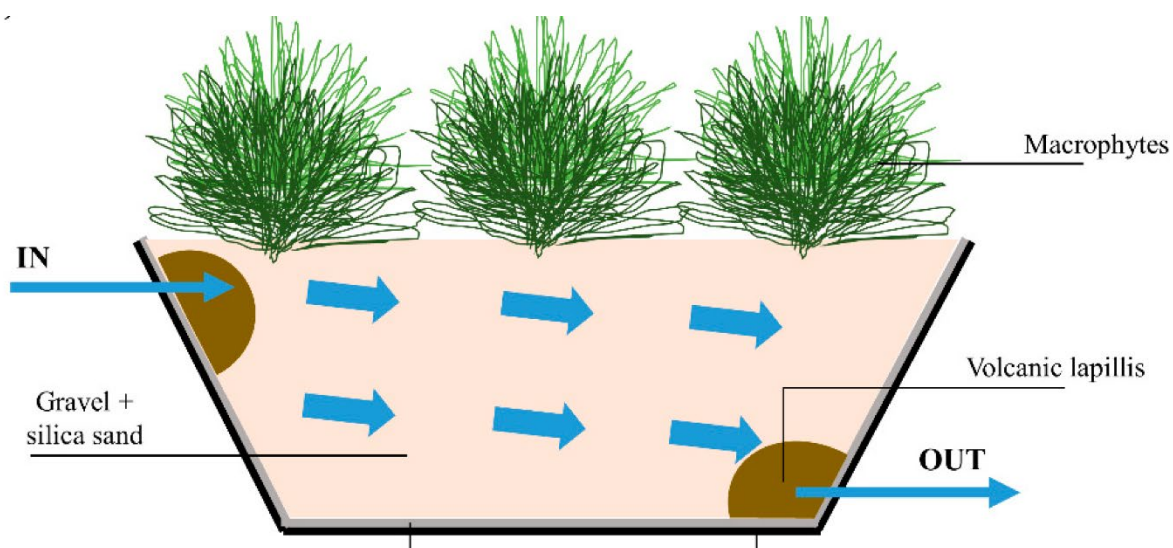
Fuente: Recuperado de United States Environmental Protection Agency (2000, p.1)

Humedal de flujo horizontal

Conocido como sistema de cañaveral, en este el agua residual fluye horizontalmente en el lecho del humedal, donde sufren de condiciones aeróbicas y anaeróbicas; la condición aeróbica ocurre en la zona radicular y la materia orgánica se degrada por condición anaeróbica. El sistema tiene eficiencia en la remoción de DBO, DQO, nitrógeno, fosfatos y SST y trata aguas residuales industriales, agrícolas y domésticas

Figura 2

Humedal de flujo horizontal



Fuente: Recuperado de Collivignarelli et al., (2020, p.3)

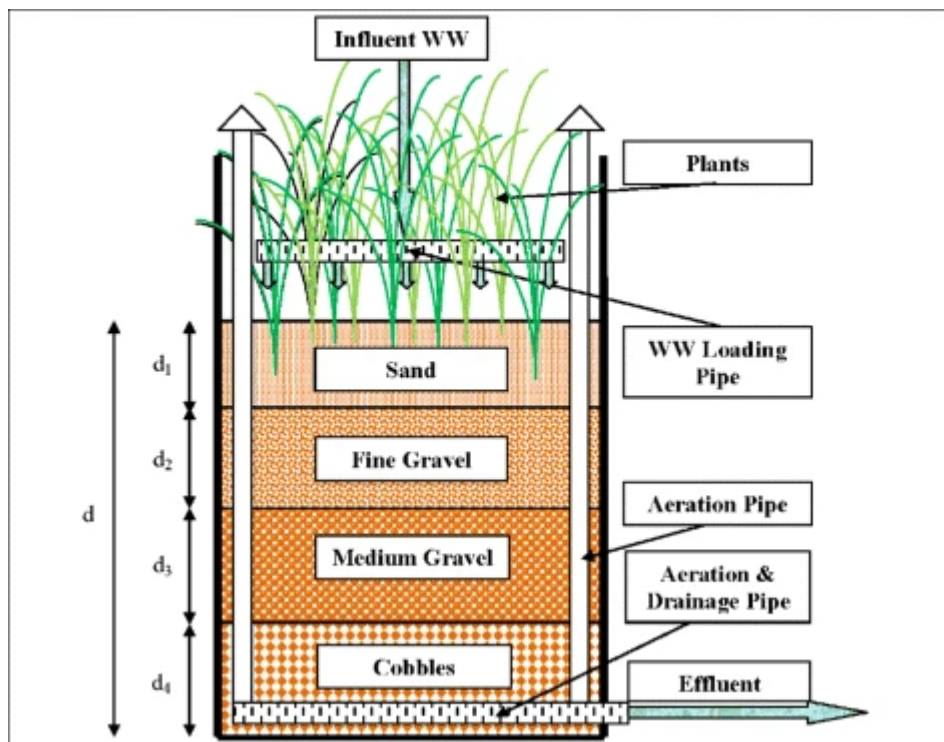
Humedal de flujo vertical

En este tipo de humedales, las aguas se sumergen desde la parte superior del humedal y drenado desde el fondo; el agua fluye a través del lecho ofreciendo condiciones aeróbicas presentando alta nitrificación DBO, DQO y remoción de otros contaminantes, requiere un área

de 1 a 3 m²/población equivalente, pero requiere más mantenimiento que un humedal de flujo horizontal.

Figura 3

Humedal de flujo vertical



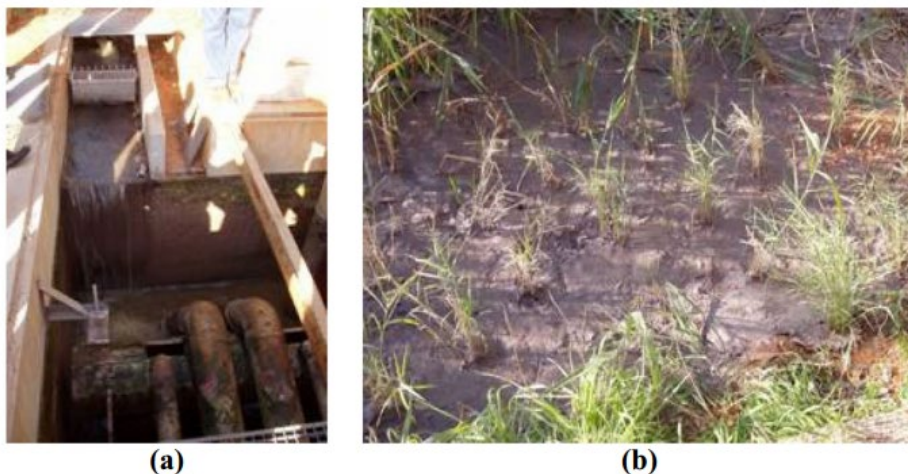
Fuente: Recuperado de Tsihrintzis, (2017, p.3253)

Humedal de flujo vertical francés

Es un humedal que consta de una sección dispuesta de manera paralela y una en serie, tiene una eficiencia de remoción similar al de flujo vertical. El requisito de área para el humedal es de 2.0 a 2.5 m²/habitante equivalente y no es sensible a los cambios de carga hidráulica.

Figura 4

Humedal de flujo vertical francés



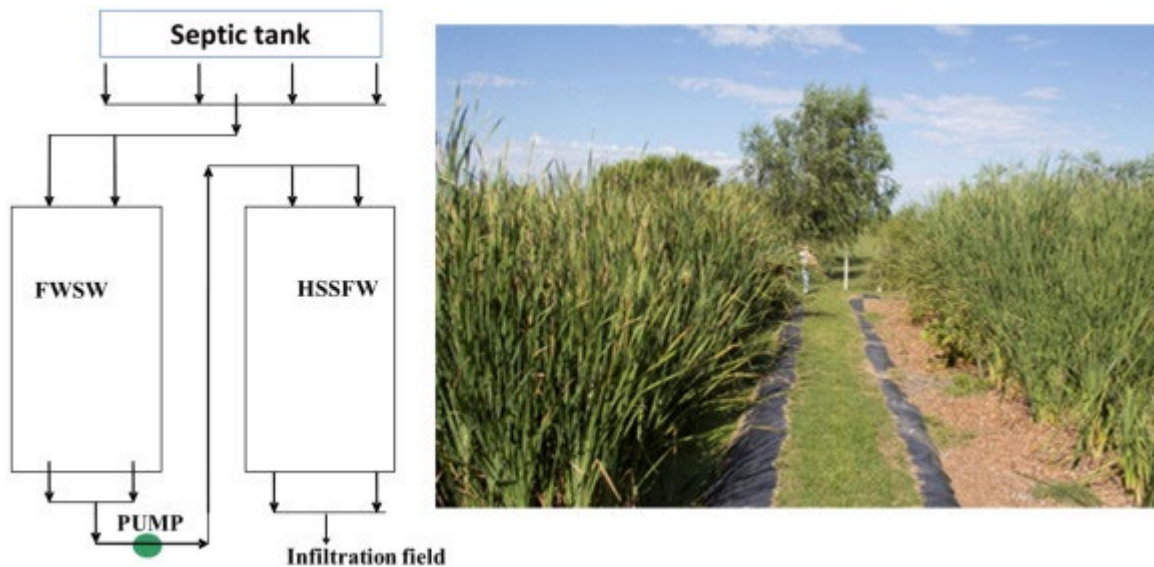
Fuente: Recuperado de Tsihrintzis, (2017, p.3254). La sección (a) de la imagen muestra el ingreso de las aguas residuales al humedal, el cual se encuentra en la localidad de Rousillon, Francia, seguido (b), muestra los lodos acumulados en la parte alta del sustrato, característica propia de este sistema de tratamiento

Humedal híbrido

Es un sistema con tratamiento multietapa, lo que significa una combinación del humedal de flujo vertical y humedal de flujo horizontal, su eficiencia de remoción de nutrientes como P y N es alta en comparación con otros sistemas y su eficiencia está entre un 65% a 85%, apto para tratamiento de aguas residuales domesticas en centros poblados, y aguas residuales procedentes de plantas de beneficio animal (mataderos).

Figura 5

Esquema de humedal híbrido. Nótese que estos sistemas necesitan bombeo



Fuente: Recuperado de Maine et al., (2022, p.2)

Humedal de deflector y flujo subterráneo

Consiste en un deflector vertical a lo ancho del humedal que guía las aguas haciendo que fluyan arriba y hacia abajo a través del lecho, lo que se traduce en un mayor tiempo de retención hidráulica y más tiempo de contacto entre el agua y los medios filtrantes, mejorando la remoción en DBO, haciéndolo la solución óptima para el tratamiento de aguas residuales de comunidades pequeñas rurales.

Humedal aireado

Este humedal tiene como finalidad cumplir con los requerimientos de oxígeno, requiere más energía y debido a la baja disponibilidad de oxígeno, la materia orgánica se degrada más lento, razón por la cual, al airear la eficiencia aumenta. Esto debido a que trata aguas residuales de industria alimenticia con concentraciones de DBO mayor a 500mg/L

Tipos vegetación y medios de remoción utilizados

Tanaka et al., (2011, pp. 47-51) determina que el tipo de vegetación utilizado para estas estructuras de tratamiento son los macrófitos las cuales caracteriza en tres grupos basado en su relación entre el nivel del agua y su crecimiento, de acuerdo con el autor son:

Macrófitos sumergidos

Son los que crecen completamente por debajo de la superficie del agua, como la hierba de cinta *Vallisneria sp.*, la *Cabomba caroliniana* y la *Myriophyllum spicatum* las cuales en los cuerpos de agua tienen como función el suministro de alimento y hábitat para la fauna silvestre y la variación diurna en las concentraciones de oxígeno disuelto.

Figura 6

Cabomba caroliniana



Fuente: Recuperado de Schneider et al., (2021, p.32)

Macrófitos emergentes

Son aquellos que están enraizados en los sedimentos y tienen partes que sobresalen por encima de la superficie del agua como el caso de la cola de gato *Typha latifolia*, puntas de flecha *Sagittaria latifolia*, los juncos *Scirpus lacustris*, y la *Phragmites australis*. Su impacto en los cuerpos de agua consiste en incrementar la evotranspiración por lo tanto incrementa la pérdida de agua en el humedal.

Figura 7

Especie de la Familia Typha



Fuente: Recuperado de Schneider et al., (2021, p.153)

Macrófitos flotantes

En los humedales tropicales se da de manera sustancial el crecimiento de macrófitos flotantes como la lechuga de agua *Pistia stratiotes* y el jacinto de agua *E. crassipes*, los cuales presentan impactos tanto positivos como negativos, entre los positivos se encuentran la regulación de la temperatura del agua, lo que permite hábitat ideal para peces e invertebrados y

en los negativos la minimización de la fotosíntesis y la abrupta disminución del intercambio gaseoso entre la columna de agua y la atmosfera creando así condiciones anóxicas.

Figura 8

Pistia stratiotes o “repollito de agua”



Fuente: Recuperado de Schneider et al., (2021, p.56).

Otros autores como Lombard-Latune & Molle (2021) afirman que para la construcción y puesta en marcha de humedales artificiales en zonas tropicales las especies vegetales más idóneas son las de las familias *Zingiberales*, *Ciperáceas* (*Cyperus*) y las *gramíneas* (*poales*), describiendo las siguientes especies a continuación:

Heliconia indica

Planta del orden de las heliconiáceas, familia *Zingiberales*, estas toleran inundaciones permanentes y sustratos saturados, eficiencia en la remoción de metales mediante absorción radicular y poca siega o poda anual.

Figura 9*Heliconia indica*

Fuente: Recuperado de Lombard-Latune & Molle (2021, p.48)

Canna indica

También hace parte del orden de la familia *Zingiberales*, puede sembrarse en diversidad de sustratos como grava, arena o mezclas orgánicas, tolerancia a aguas con pH de 5.0 a 9.0 y una gran absorción de P y N. ideal para temperaturas ambiente de 15 °C a 30 °C.

Figura 10*Canna Indica*

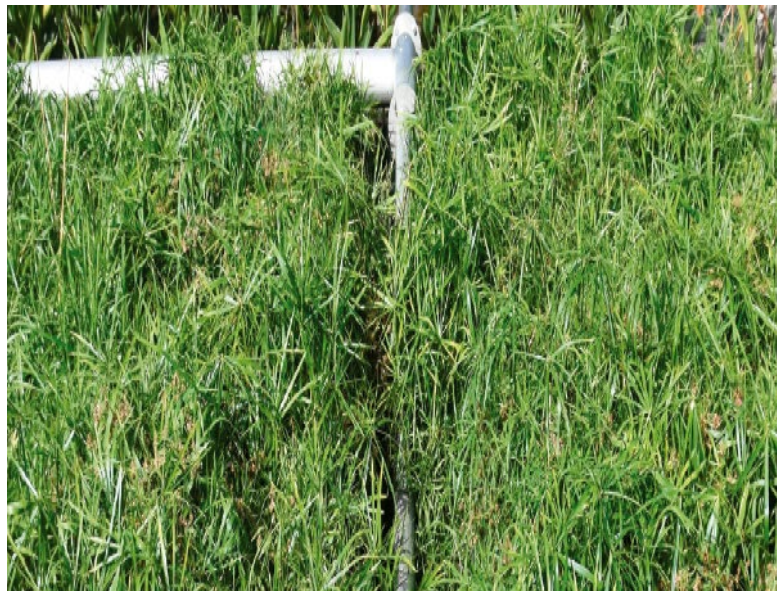
Fuente: Recuperado de Lombard-Latune & Molle (2021, p.49)

Cyperus involucratus

Como su nombre lo indica hace parte de la familia de las *ciperáceas*. Se desarrollan rápidamente y cubren con rapidez la estructura de los filtros, soportan flujos muy lentos de agua y remoción de fósforo.

Figura 11

Cyperus involucratus



Fuente: Recuperado de Lombard-Latune & Molle (2021, p.51)

Cyperus papyrus

La especie más utilizada e investigada en el tratamiento mediante humedales artificiales. Tiene a su favor su alta oxigenación del sustrato lo que permite la nitrificación, alta remoción de materia orgánica del 80 al 90% (Okurut, 2000) y una remoción de aproximadamente del 90% de

los coliformes fecales por filtración. Cuenta con tallos más altos que la *Cyperus involucratus* y resiste mejor las condiciones anóxicas frente a otras especies.

Figura 12

Cyperus papyrus en inmediaciones de los drenajes de “lagos del dique” – Xalapa, México



Fuente: Recuperado de Del Refugio Cabañas-Mendoza et al. (2024, p.2)

Phragmites australis y *Phragmites mauritanis*

Estas gramíneas, conocidas en América como carrizos *Phragmites australis* es una gran caña perenne emergente, nativa de más de 260 países, incluida Australia, y está ampliamente distribuida globalmente y según Březinová & Vymazal, (2021) es particularmente adecuada para la fitoestabilización de metales como Zn, Mn, Pb, Cd, Ni y C.

Figura 13

Phragmites australis en el humedal artificial de la localidad de Zbenice – República Checa



Fuente: Recuperado de Březinová & Vymazal, (2021, p.3)

Marco referencial

Metodología

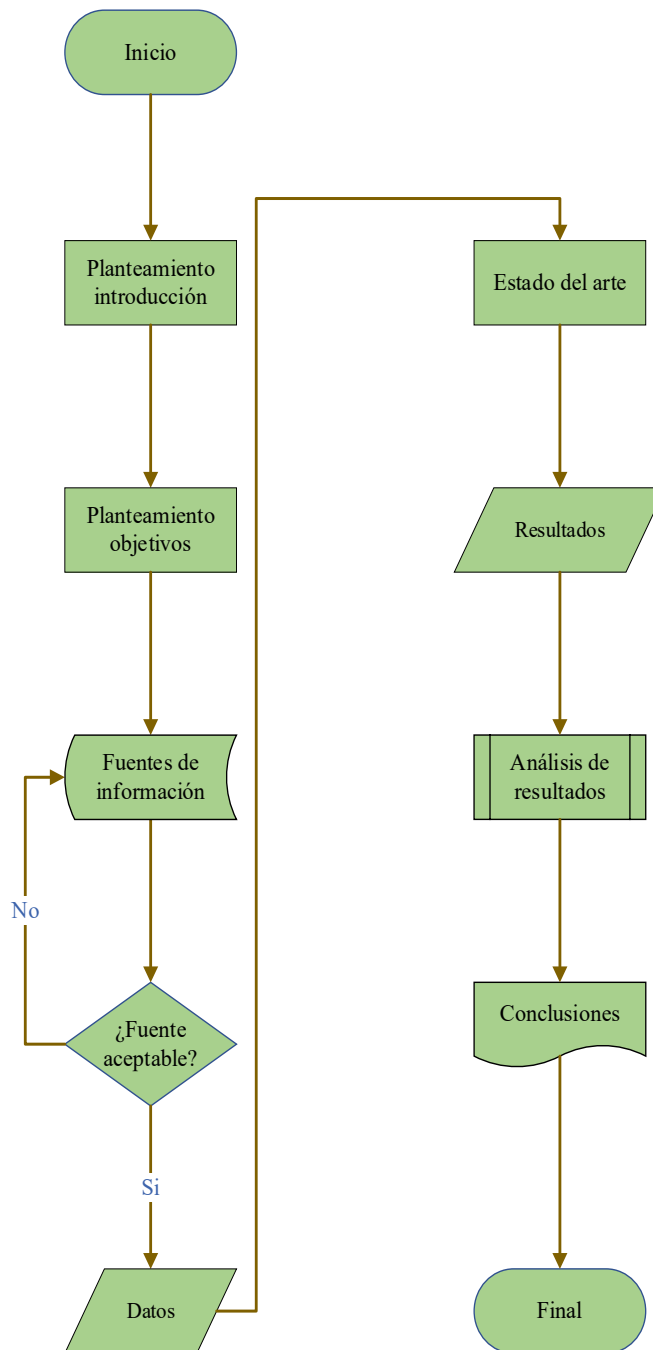
Para dar desarrollo al objeto de esta monografía se estableció como protocolo para el desarrollo de esta los lineamientos de la declaración PRISMA, teniendo en cuenta que según Urrútia & Bonfill (2010) establecen que esta declaración permite la revisión sistemática de masas documentales libre de sesgos, razón por la cual el protocolo consta de los siguientes pasos:

- Planteamiento de la introducción
- Planteamiento de los objetivos
- Aplicar criterios de selección
- Selección de las fuentes de información
- Generación de listado de datos obtenidos
- Estado del arte
- Análisis de resultados
- Conclusiones

Los planteamientos hacen parte de los la introducción, objetivos y marco teórico de esta monografía , en cuanto a la selección de las fuentes de información, se ha establecido como primer criterio seleccionar los estudios en tratamiento de aguas residuales por lagunaje o humedales artificiales posteriores al año 2000, además teniendo en cuenta que la temperatura tiene efecto directamente proporcional a las tasas de remoción (De La Mora-Orozco et al., 2020) se buscaron estudios en países o regiones con climas tropicales similares a la climatología colombiana. Las fuentes de información provienen de las bases de datos *Elsevier*, *Scopus*, *ScienceDirect* y *Dialnet* las cuales hacen parte de la oferta bibliográfica de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y documentos del repositorio institucional de la universidad.

Figura 14

Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Autoría propia

En cuanto a los datos obtenidos luego de consultar en las fuentes mencionadas se llegó a un total de 42 documentos, los cuales, y teniendo en cuenta los criterios mencionados se llegó a un total de 15 estudios pertinentes para esta monografía. El criterio principal para ser objeto de la monografía es que el artículo sea sobre un sistema de tratamiento mediante humedal artificial que este ubicado en la región tropical del mundo, para permitir comparar o determinar su uso en Colombia; esto teniendo en cuenta que la temperatura es una condicionante importante en los sistemas de tratamiento de agua.

Estado del arte

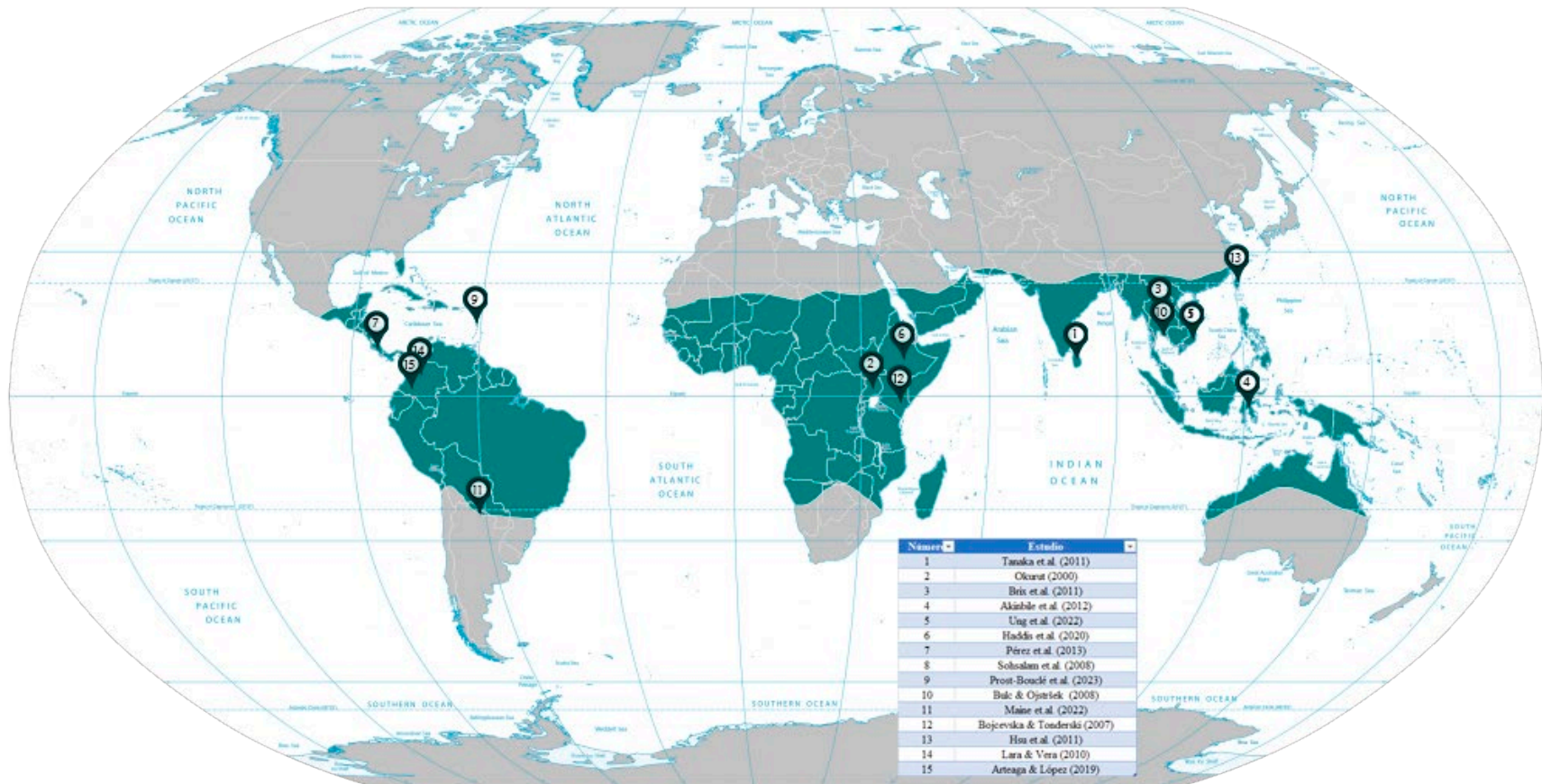
Áreas de estudio

Los artículos objeto de estudio comienzan con la investigación de Tanaka et al., (2011 p.3) quienes manifiestan que las áreas tropicales las cuales son aquellas ubicadas en el globo entre los 23.5 grados de latitud norte en el trópico de cáncer y los 23.5 grados de latitud sur en el trópico de capricornio teniendo como medianía el ecuador. Los autores también afirman que los territorios y/o países ubicados dentro de esta zona experimentan un rápido crecimiento demográfico y económico donde el saneamiento básico no va acorde al ritmo de este desarrollo, sumado al hecho que las soluciones implementadas no son acordes a las realidades sociales, económicas y culturales del lugar lo que hace que sean sistemas con alto consumo energético, que requieren además personal con alta experticia y baja sustentabilidad. Su piloto estuvo establecido en Sri Lanka (7°N, 80°E) en el cual en un humedal artificial construido en mampostería y cultivado con *Scirpus grossus* logró remociones del 46.6% de DBO, 41.3% de NH₄, 57.1 de NO₃-, 75.3% de coliformes fecales, 21.1% de P y 55.9% de SST, desafortunadamente el estudio no registra las concentraciones iniciales. Como nota relevante también se encontró que, debido a la exposición a la corriente del agua, el recubrimiento plástico

de la mampostería se perdió, conllevando a fisuras en las paredes, por lo que se recomienda su construcción en concreto o en su defecto, usar juntas de dilatación en los muros de mampostería.

Figura 15

Ubicaciones de los estudios usados en la revisión

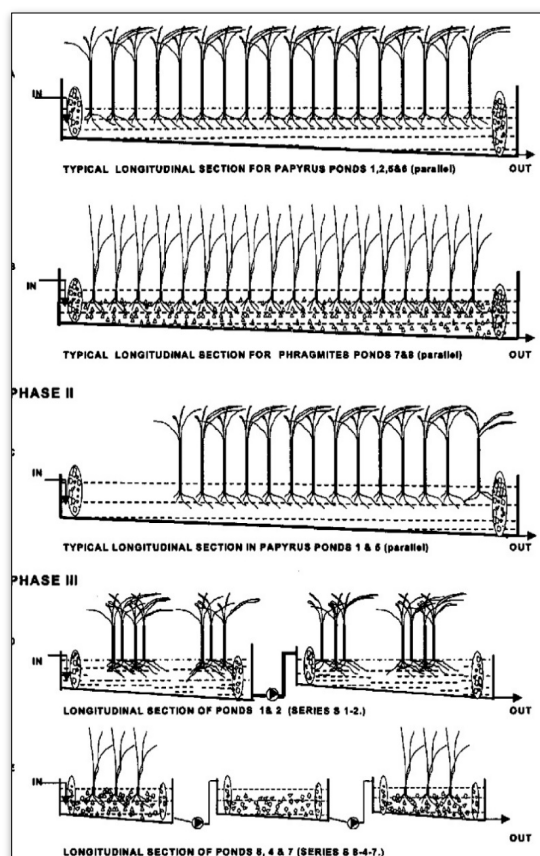


Fuente: Autoría propia utilizando como mapa base el mapa de zonas tropicales de meteoblue.com (2011)

Otro caso de aplicación exitosa en zona tropical es el descrito por Okurut (2000) en el cual mediante un humedal piloto construido en la municipalidad de Jinja en Uganda (0° N, 33° E) de 40 m³ para el beneficio de 4000 habitantes. En este piloto se utilizaron las especies *Phragmites mauritanus* y *Cyperus papyrus* en las cuales se lograron tasas de remoción del 70% para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), 70% para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), 80% de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), 99% para coliformes fecales; 45% para el Fósforo (P) 77% para Nitrógeno (N) y 90% para Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺)

Figura 16

Esquemático longitudinal humedal artificial de Jinja (Uganda)



Fuente: Recuperado de Okurut (2000, p.31)

En cuanto a los detalles relevantes de la puesta en marcha de esta estructura, el autor menciona que el costo de construcción fue de US\$ 70.667 (sin incluir el costo del terreno), se tuvo en consideración que el lugar del humedal debe ser retirado de las áreas residenciales debido al riesgo de la proliferación de mosquitos transmisores de la malaria ya que el humedal trabaja de forma continua o intermitente.

La articulación con el urbanismo: La flor y la mariposa

Un ejemplo de articulación de los sistemas de tratamiento con el urbanismo es el descrito por Brix et al., (2011) en las islas Koh Phi Phi (Tailandia); principal destino turístico. Luego del Tsunami que devastó la isla en 2004, el gobierno local determinó la construcción del sistema de depuración de agua residual pero emulando de forma simbólica la forma de una flor y las alas de mariposa, en la cual se disponen un sistema de lagunaje artificial de tres etapas, el primero un humedal artificial de flujo vertical, el segundo un humedal de flujo horizontal y uno de flujo superficial, el cual atiende una población fija de 3000 habitantes (con un caudal de diseño de 400m³/día) y una flotante de aproximadamente un millón de habitantes anual. Las especies vegetales utilizadas son *Canna indica* y *Heliconia indica* en el humedal uno, *Canna indica* en el segundo humedal y *Cyperus papyrus* en el tercer humedal; estas según el autor por su efectividad en común para remover nutrientes y la alta capacidad de oxigenación por parte del *Cyperus papyrus*.

En cuanto a su eficiencia, el autor manifiesta que tiene una capacidad de tratamiento de 400 m³/día y presentando una remoción de 84% de la DBO, 95% de los SST, 99% de la NO₃-, 50% de P y 90% en remoción de aceites y grasas.

En cuanto al costo de construcción, el sistema tuvo un costo de US\$700.000 y un costo aproximado de operación anual de US\$ 6.300 y, el cual no está discriminado por el autor; sumado al problema que tiene actualmente el hecho que los centros vacacionales y las casas después de la reconstrucción de la isla, no cuentan en su mayoría con trampas de grasa, lo cual, en épocas de alto régimen de lluvias, colmatan los humedales.

Figura 17

Panorámica del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Flor y la Mariposa



Fuente: Recuperado de Brix et al., (2011, p.732)

Lixiviados ¿es posible?

Akinbile et al., (2012) describe el piloto de un humedal artificial utilizando como efluente el lixiviado del relleno sanitario de Palau Burung, en Indonesia (5°N, 0.0° E). El humedal a

escala tiene un volumen de 0.075 m³ sembrado con 15 plantas adultas de la variedad *Cyperus haspan*, teniendo como sustrato arena y grava.

La eficiencia del piloto demuestro ser muy alta, ya que las 15 plantas de *Cyperus haspan* tuvieron tasas de remoción del 86.6% en la turbidez, 98.8% en los SST, 91.8% en la DQO, 78.7% en la DBO, 53.8% en la remoción de NH₃- 99.7% en el P, y en remoción de metales presento una eficiencia del 59% en el Fe, 75% en el Mg, 70.5% en el Mn y 89.4% en el Zinc, las concentraciones iniciales y finales encontradas por los autores fueron las siguientes:

Tabla 1

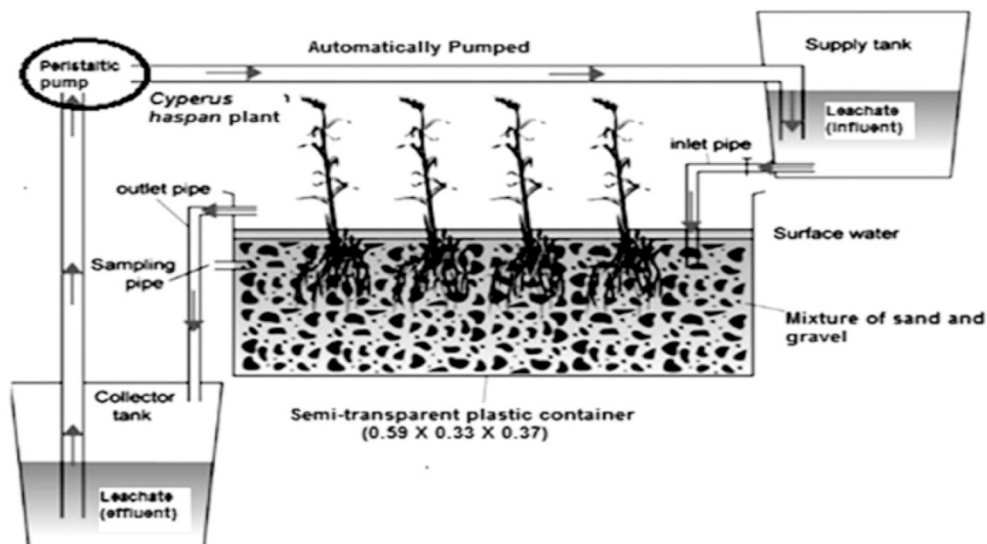
concentraciones de los parámetros del lixiviado en el influente y efluente

No.	Parameters	Units	Operating duration (days)			
			Influent	Effluent 1	Effluent 7	Effluent 14
Concentrations						
1	pH	-	8.42	7.81	7.7	7.43
2	Color	Units	3360	1228	922	600
3	Turbidity	NTU	140	85	72	29.5
4	TSS	mg/L	685	276	115	13
5	COD _{cr}	mg/L	923.4	561.5	451.7	183
6	BOD ₅	mg/L	686	269	208	183.6
7	P	mg/L	117	47	25	0.5
8	N	mg/L	400	265	200	164
9	NH ₃ -N	mg/L	238	167	140	128
10	Fe	mg/L	6.19	4.03	3.58	2.69
11	Mn	mg/L	24.8	17.6	14.2	8.73
12	Mg	mg/L	660	322	298	227
13	Zn	mg/L	7.43	1.79	1.66	0.84

Nota: tomado de Akinbile et al., (2012, p.1390)

Figura 18

Esquema del humedal de flujo de superficie de Palau Burung



Fuente: Recuperado de Akinbile et al., (2012, p.1389)

Puede suponerse que las altas tasas de remoción se deben gracias a que es un piloto a escala pequeña, en condiciones controladas, aunque los autores manifiestan que el éxito del piloto se debe al seleccionar la *Cyperus haspan* como especie a sembrar en el humedal y el uso de la zeolita como sustrato, la cual cuenta con una alta porosidad.

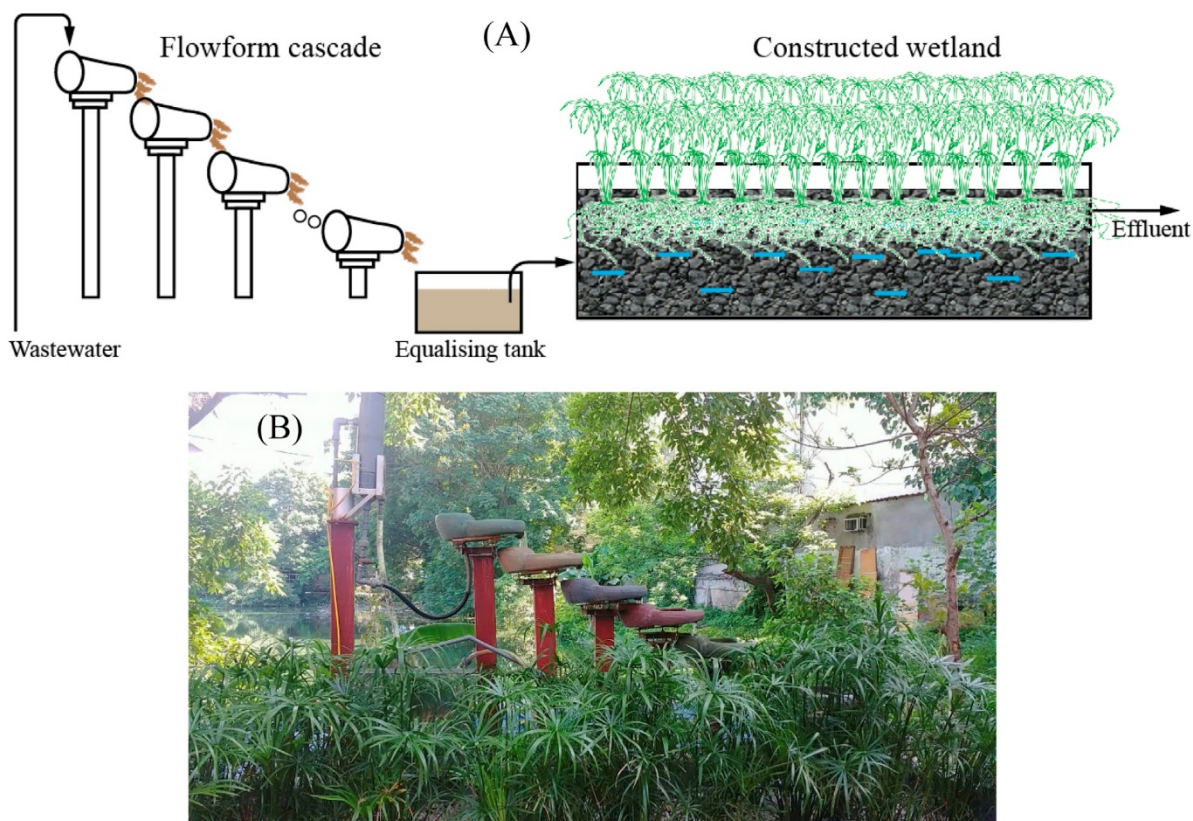
Como sistema individual de tratamiento de vertimientos domésticos

Como sistema individual para tratamiento de aguas domésticas, Ung et al., (2022) en Hanoi (Vietnam) presenta un sistema que mediante la oxigenación del influente mediante 11 cascadas con una diferencia de altura de 0.15m cada una, para luego en un humedal artificial de 5 m³, tratar las aguas residuales domésticas que actualmente tienen contaminado y eutrofizado el lago Kim Lien. El humedal tiene como sustrato grava de 20 mm y como especie vegetal para el proceso utilizaron la *Cyperus involucratus*, especie nativa la cual no representó costo alguno para

el proyecto y que tiene como característica sus densas raíces que ayudan a remover P y N y un 70 al 90% de cargas orgánica.

Figura 19

Diagrama y fotografía real del sistema de cascada y humedal artificial en Hanoi (Vietnam)



Fuente: Recuperado de Ung et al., (2022, p.3)

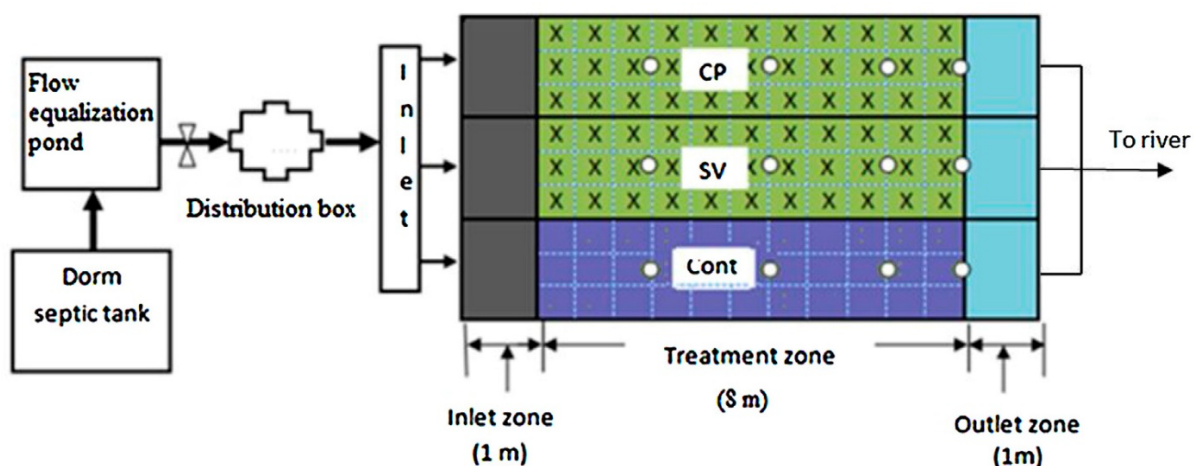
En cuanto a la eficiencia del sistema en mención, los autores reportan tasas de remoción del 86.6% de DBO, 79.6% de NH_4^+ , 86.9% de P (en forma de fosfatos) y el 92.2% de la remoción de SST. Desafortunadamente, el estudio no describió los costos.

Para el saneamiento en instituciones educativas

Haddis et al., (2020) en su investigación da a conocer la aplicación de los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales en establecimientos educativos. Puntualmente fue la construcción de un humedal para tratar el agua residual de uno de los dormitorios de la universidad Jimma, ubicada en la ciudad del mismo nombre al suroeste de Etiopía.

Figura 20

Configuración del piloto del humedal de flujo de subsuperficie en el campus de la universidad de Jimma



Fuente: Recuperado de Haddis et al., (2020, p.40)

El humedal con una dimensión de 2.0 m x 2.0 m x 0.7 m (2.80 m³) fue creado para tratar un caudal de 2.40 m³/día el cual se divide en tres tabiques. En el primero se utilizó macrófitos de la especie *Scirpus validus* conocido localmente como Ketema; en el segundo se utiliza la especie *Cyperus papyrus* conocido localmente como Dengel y el tercero no se usó macrófitos, solo el sustrato. El proyecto presento desafíos como la nula disponibilidad en el mercado etíope de válvulas de control y bombas peristálticas, la falta de flujo constante de agua residual por la

escasez de agua potable y la apetencia por simios y aves de la *Scirpus validus* y la *Cyperus papyrus* para alimentarse.

En cuanto a la eficiencia del humedal, los autores reportaron tasas de remoción del 75.91% en SST, 65.17% en DQO y 80.85% en DBO.

El tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica

En la región de Tres Ríos (Costa Rica) Pérez et al., (2013) describe la implementación de un sistema de humedal artificial se flujo horizontal subsuperficial de 12 m de ancho por 3.0 m de largo con grava de 1.5 a 2.5 cm y utilizando como bio remediador la especie *Cyperus papyrus* en una densidad de 4 plantas por m²; para tratar las aguas negras provenientes de un laboratorio farmacéutico.

La investigación evaluó la eficiencia de este sistema el cual fue construido de forma que la entrada del agua residual al sistema fuera de forma perpendicular a la superficie del lecho, con lo cual, según los autores se generaba un flujo tipo pistón asegurando así mejor eficiencia del sustrato.

El proyecto evidenció la tolerancia de la especie vegetal a las aguas residuales y presentó tasas de remoción en el sistema de 72% de DQO, 91% de DBO, 61.9%, 75% de P soluble y 73% de remoción de SST.

Figura 21

Fotografía del humedal de flujo subsuperficial, Tres Ríos (Costa Rica)



Fuente: Recuperado de Pérez et al., (2013, p.334)

Su aplicación en la acuicultura – industria de los mariscos

Sohsalam et al., (2008), evalúa la eficiencia de un sistema de lagunaje artificial para el tratamiento de aguas residuales de una fábrica de mariscos en Bangkok (Tailandia). El efluente de acuerdo a los investigadores se compone principalmente de sólidos suspendidos, orgánicos y nutrientes

El humedal el cual es de flujo superficial consta de un estanque de flujo vertical de 6 m³ y con un tiempo de retención hidráulica de 1 día y un caudal de 395 litros/día, con macrófitos de las especies *Cyperus involucratus* y *Typha augustifolia* dispuestos con una distancia de 0,2 metros entre ellos

En cuanto a la efectividad, los autores determinaron que el sistema presenta tasas de remoción del 77% de P, 92% de N total, 99% de la DBO y 90% de los SST.

El sistema para tratar aguas residuales en destilerías

Prost-Boucle et al., (2023) en su investigación en la isla de Martinica en el caribe, encontró que las aguas residuales de destilería son un tipo de aguas residuales difíciles de tratar debido a su bajo pH (pH = 3.3), alto contenido de cloruro y sulfato, altas concentraciones de materia orgánica sumado al hecho que la producción de ron es intermitente durante la temporada (5 meses al año). El objetivo de los investigadores era utilizar humedales de flujo vertical para el pulido de tratamiento, así como para la separación de lodos / agua y el tratamiento de lodos durante años. El humedal de flujo vertical HFV están plantados con *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus*.

El monitoreo ocurrió durante las temporadas de producción de ron. La cadena de tratamiento permitió una eliminación media global de TSS del 92% y 96% para la materia orgánica (DQO y DBO₅). La carga aplicada al filtro en funcionamiento fue 78 kg SST/ m² /año durante el período de destilación. La carga aplicada era demasiado alta para las plantas probadas y provocaba la muerte de la planta y la obstrucción de la superficie de los filtros. Sin embargo, él estudió permitió especificar la forma de operar toda la planta de tratamiento, así como las cargas diarias aceptables que deben aplicarse en los HFV permitiendo así una solución efectiva y sostenible basada en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales de destilería de ron. Desafortunadamente, los autores no mencionan los costos de operación, ni la utilidad económica producto de la mejora en el tratamiento.

Figura 22

Estado de las plantas de Heliconia y Cyperus papyrus en el HFV durante 2020 y 2021



Fuente: Recuperado de Prost-Boucle et al., (2023, p.9)

Tratamiento de efluentes industriales – industria textil

La industria textil se caracteriza por generar efluentes con altas concentraciones de colorantes, razón por la cual Bulc & Ojstršek, (2008) realizaron mediante un sistema piloto la optimización de un sistema de lagunaje artificial de flujo vertical de 12 m³ con un caudal de 1m³/día mediante la adición de una batería de dos humedales artificiales de flujo horizontal con

un volumen total de 20m³; sembrados en su totalidad con *Phragmites australis* con una densidad de siembra de 5 plantas /m².

En el piloto se obtuvieron tasas de remoción del 90% del color, 84% de la DQO, 88% de los sulfatos, 80% de surfactantes aniónicos, 89% del COT, 93% de los SST, 66% de la BDO y 52% del N orgánico.

El humedal presentó una tasa de remoción negativa de -331% en el NH₄, explicada por los autores por la falta de oxígeno en el efluente.

Tratamiento de aguas residuales de un centro de cuidado animal – éxito de combinar sistemas de humedales artificiales

En Santa Fe (Argentina) una fábrica de productos alimenticios para perros y gatos cuenta con una guardería para 150 animales entre caninos y felinos con los cuales hacen estudios no invasivos de necesidad nutricional para el desarrollo de nuevos productos. La fábrica construyó un sistema de lagunaje híbrido consistente en un humedal de superficie de flujo libre y un humedal de flujo subsuperficial., teniendo en cuenta que el efluente a tratar por el sistema consistía en el agua usada en el baño de las mascotas, heces y orina producto de la limpieza de los pisos de las perreras y efluentes sanitarios.

La investigación de Maine et al., (2022) evaluó la eficiencia de este sistema, la cual consta de dos humedales previamente descritos de 12 m por 22 m cada uno con una columna de agua de 0.40 m y con un caudal de trabajo de 4000 a 7000 litros por día, con TRH de 7 a 14 días en el humedal de flujo libre y 6 a 8 días en el de flujo subsuperficial. El sistema utiliza plantas jóvenes de *Typha domingensis* a una razón de 3 plantas por m².

El proyecto evidenció la tolerancia de la especie vegetal a las aguas residuales y presentó tasas de remoción en el sistema de 66.9% de DQO, 74.9% de DBO, 61.9% de NH₄⁻, 5.7% de NO₃⁻ y 56.9% de P. en el sistema 2, las tasas de remoción fueron de 82.8% DQO, 88.3% de DBO, 83% de NH₄⁻, 20.4% de NO₃⁻ y 62.1% de P.

Figura 23

Fotografía del humedal de flujo libre y el de flujo subsuperficial, Santa Fe (Argentina)



Fuente: Recuperado de Maine et al., (2022, p.2)

La industria azucarera

Bojcevska & Tonderski, (2007) mediante un humedal piloto de flujo libre, mediante 8 humedales de 3 m x 20 m cada uno construidos en la Chemelil Sugar Company en la provincia de Nyanza en Kenia, para tratar el agua residual producto del procesamiento y/o fabricación del azúcar.

Los humedales 1,3,5,7 fueron sembrados con *C papyrus* a una densidad de 4 plantas por estanque y los humedales 2,4,6,8 con *Echinochloa pyramidalis* con la misma densidad de siembra de los estanques impares y con una altura de la lámina de agua de 0.4 m en promedio para un volumen total aproximado del sistema de 192 m³; con TRH de 5 días en las lagunas 1 a la 4 y de 1.8 días en las lagunas 5 a 8.

En cuanto a las remociones el estudio se centró en las concentraciones de SST (76%), NH₄- (36%) y P (29%).

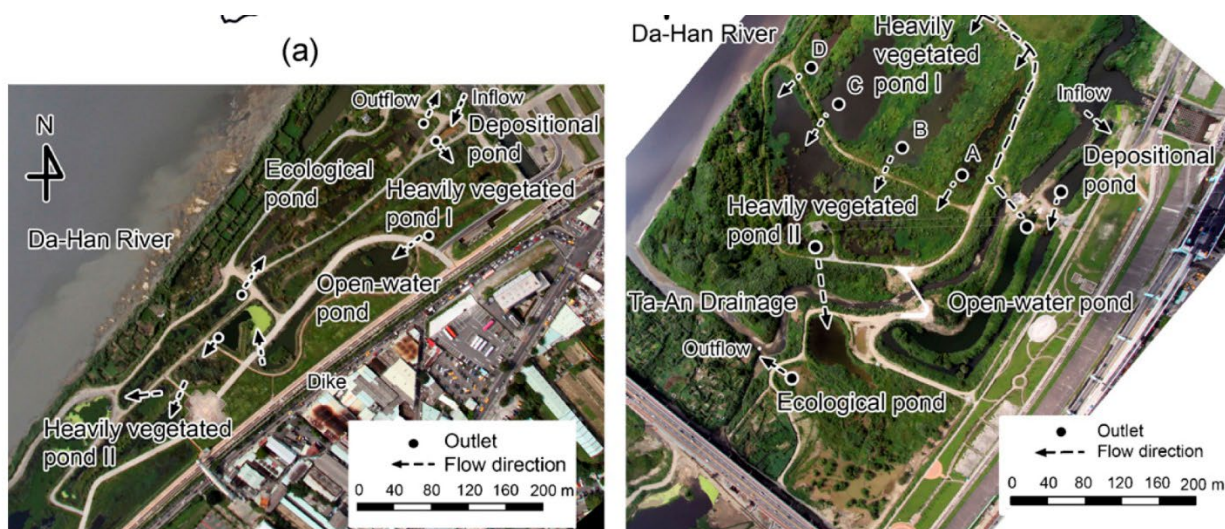
Integración de los humedales artificiales con los cuerpos de agua naturales urbanos y fortalecimiento de los servicios ecosistémicos

Hsu et al., (2011) nos expone el caso de éxito de dos humedales artificiales de flujo superficial construidos y dispuestos en serie en Taipei, capital de Taiwán, los cuales tratan las aguas residuales domésticas de la ciudad. El primer humedal artificial se denomina Hsin-Hai II, tiene un área de 4.70 Ha y un flujo de 2700 m³/día y un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 5.5 días. El segundo se denomina Daniaopi y tiene un área de 13 Ha y un flujo de 11000 m³/día y un TRH de 5 días.

Figura 24

Configuración y ubicación de los humedales artificiales Hsin-Hai (izq) y Daniaopi (der) –

Taipei



Fuente: Recuperado de Hsu et al., (2011, p.1535)

El humedal cuenta con el valor agregado que a partir de su construcción los autores evidenciaron la presencia de animales entre los cuales se contaron 58 especies de aves, 07 de peces y 34 de macroinvertebrados acuáticos, permitiendo así que el área de los humedales además de prestar servicios ecosistémicos de regulación, presten también servicios ecosistémicos culturales. Su costo operacional aproximado es de U\$ 6.000 anuales por hectárea al año, como los sistemas evaluados suman 5 hectáreas el costo total de operación se estima en U\$ 30.000 por año.

Los macrófitos utilizados en el humedal son de las especies *Bracharia mutica*, *Colocasia esculenta*, *Cyperus imbricatus*, *Eirchonia crassipes* y *Eleocharis dulcis*. En cuanto a la eficiencia

del sistema, los autores determinaron remociones del 59.85% de DBO, 64.48 de DQO, 56.6% del N Total y 63.9% del P.

A nivel local

A nivel local, lastimosamente los proyectos de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales en su inmensa mayoría solo se han limitado a proyectos de investigación a escala de laboratorio, sin embargo, rescatamos en este documento los proyectos más relevantes llevados a cabo in situ, los cuales son los siguientes:

Piloto a escala real en un centro educativo

Lara y Vera (2010) analizaron y evaluaron la eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial el cual fue construido en el Centro Experimental de la Universidad Javeriana en el municipio de Cagua (Cundinamarca) el sistema fue construido para tratar el efluente generado de la vivienda que hay en el centro y las aulas.

El sistema consiste en un pozo séptico de 2 m³ como pretratamiento y un humedal rectangular de 5.80 metros de largo por 2.0 metros de ancho y una profundidad efectiva de 0.60 metros para un volumen de efluente a tratar de 6.96 m³, con siembra de *Juncus bogotensis* en sistema de siembra local conocido como “tres bolillos” a 0.30 m de distancia; para tratar una descarga de 1.34 m³/día con un tiempo de retención hidráulica de 1.6 días.

El tratamiento arrojó índices de remoción del DBO de 66%; 43% de N; 28% del P; 44% de SST y 90% en Coliformes. Los autores indican que las remociones son bajas debido a que las raíces de las plantas aún no han crecido lo suficiente para aumentar la eficiencia del sistema, pero una vez aumente la densidad de las raíces, los porcentajes de remoción aumentarían.

Figura 25

Humedal Centro Experimental Javeriano en Cogua (Cundinamarca)



Fuente: Recuperado de Lara y Vera (2010, p.51)

Como estructura de refuerzo en PTAR obsoleta

Arteaga y López (2019) en su investigación construyeron un humedal artificial de flujo subsuperficial para coadyuvar el proceso del tratamiento de las aguas residuales urbanas en la PTAR del municipio de Buenavista en el departamento del Quindío. Para ello los investigadores construyeron la estructura piloto de 2.0 metros de largo por 1.0 metro de ancho con una profundidad efectiva de 0.60 metros en las inmediaciones de la PTAR. Esta estructura mediante una derivación recibía parte del efluente de la PTAR, la cual, según los autores presentaba fallas en sus componentes, presentando bajas remociones de concentraciones en el efluente.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos concluyeron que el humedal artificial funcionó efectivamente como etapa complementaria al efluente de la PTAR, aunque con ciertas

limitaciones operativas. En el primer muestreo (2 meses), se observaron remociones significativas de Sólidos Suspendidos Totales (SST) que disminuyeron de 28.2 mg/L en la PTAR a 7.9 mg/L en el humedal (71.9% de eficiencia), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se redujo de 78.5 mg/L a 35.2 mg/L (55.2% de remoción) y para el caso de las grasas y aceites, la concentración bajó drásticamente de 34.4 mg/L a 3.4 mg/L (90.1% de eficiencia).

Sin embargo, hacia el tercer muestreo (6 meses), la eficiencia varió ya que la remoción de SST cayó a 55.5%, mientras que la DBO mostró solo 15.9% de remoción, atribuido al taponamiento del tubo de entrada y la colmatación del lecho (evidenciado por el aumento del nivel de agua sobre el sustrato); las grasas y aceites mantuvieron alta eficiencia (91.8% de remoción), pasando de 11.1 mg/L a 0.9 mg/L, gracias al filtrado físico del lecho de grava. En cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el humedal logró una remoción inicial del 41% (de 278 mg/L a 164 mg/L), pero esta cayó al 10% en el tercer muestreo. Como era esperado, los valores de DQO fueron consistentemente mayores que los de DBO, confirmando la presencia de compuestos no biodegradables. Sumado a estas conclusiones, los investigadores reconocen que los porcentajes de remoción en el sistema son producto de la colmatación producida por sólidos grandes ya que la estructura de la PTAR es incapaz de cribarlos.

Figura 26

Humedal artificial de flujo subsuperficial para coadyuvar el proceso del tratamiento de las aguas residuales urbanas en la PTAR del municipio de Buenavista



Fuente: Recuperado de Arteaga y López (2019, p.19)

Resultados y discusión

Discusión de los resultados

Las especies utilizadas para el tratamiento en zonas tropicales

Las investigaciones consultadas utilizaron alrededor de 16 especies, la mayoría se inclinaron por una sola especie mientras otras utilizaron combinaciones de dos o más especies. A través del portal *Naturalista Co* del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt se logró identificar el nombre común de las especies, su origen y el estado del establecimiento de la especie en el país, dando como resultado los siguientes datos:

Tabla 2

Especies y nombres comunes utilizados en las investigaciones consultadas

Especie	nombre común	origen	Estado de establecimiento en Colombia
<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro del mediterráneo	africano	Introducido
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	europeo	Introducido
<i>Canna indica</i>	Achira	Suramericano	Nativo
<i>Typha domingensis</i>	Cola de gato	Norteamericano	Introducido
<i>Canna fláccida</i>	Pañuelo de los Everglades	Norteamericano	Introducido
<i>Phragmites mauritanus</i>	Caña africana	africano	no presente
<i>Cyperus haspan</i>	Papiro enano	Suramericano	Nativo

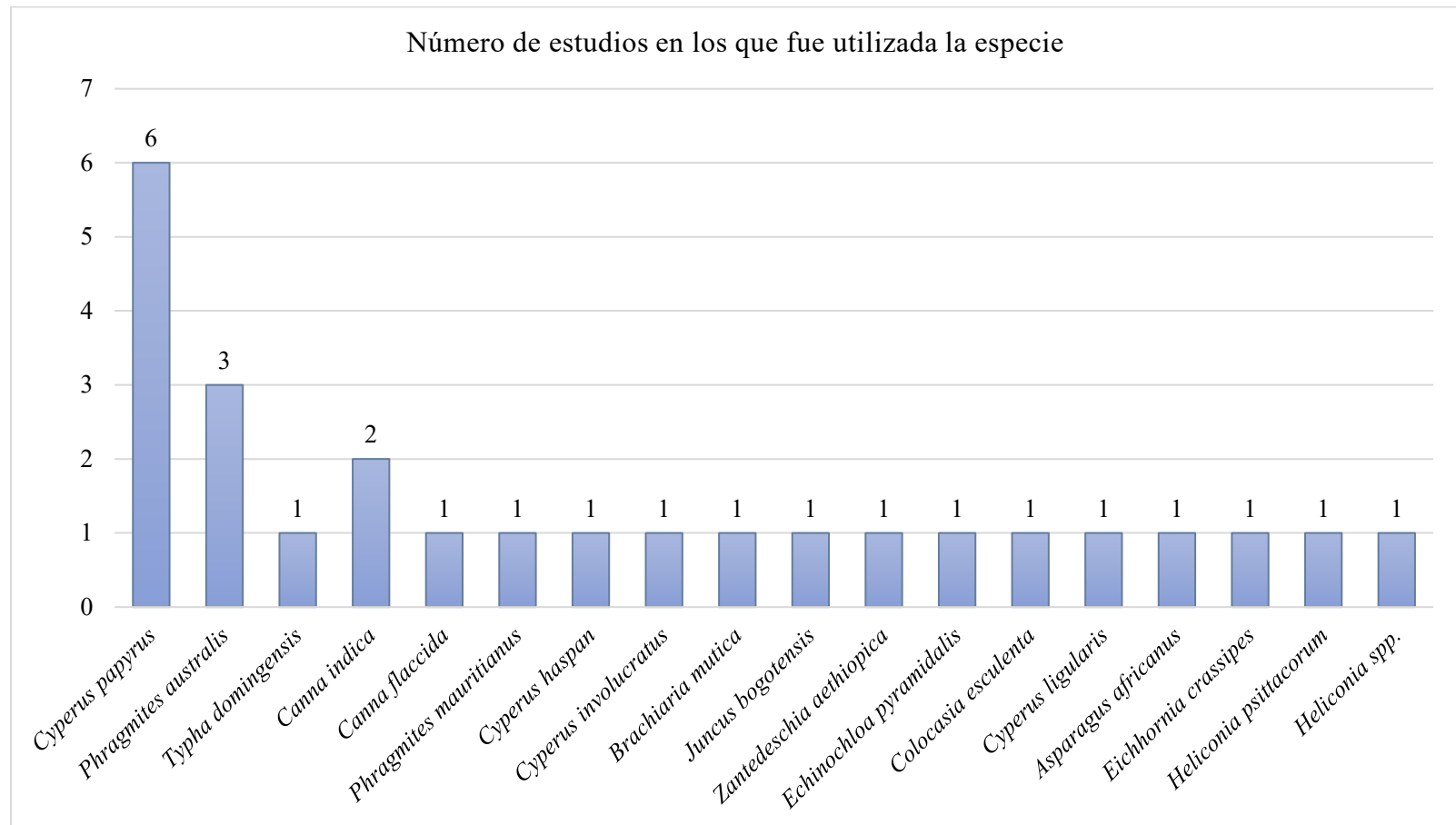
<i>Cyperus involucratus</i>	Papiro sombrilla	africano	Introducido
<i>Bracharia mutica</i>	Pasto par	africano	Introducido
<i>Juncus bogotensis</i>	Junco	Suramericano	Nativo
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Cala de Etiopía, lirio de agua o cartucho	africano	Introducido
<i>Echinochloa pyramidalis</i>	Pasto mijillo	africano	Introducido
<i>Colocasia esculenta</i>	papa china	asiático	Introducido
<i>Cyperus imbricatus</i>	Borde de teja	Centroamérica	Introducido
<i>Agapanthus africanus</i>	Lirio africano	africano	Introducido
<i>Eirchonia crassipes</i>	Buchn de agua	Suramericano	Nativo

Nota: autoría propia.

La selección de los investigadores para el tratamiento mediante lagunaje artificial en zonas tropicales se inclin en gran parte por las especies *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis* y *Canna indica*, esta última nativa de Colombia, otras especies nativas utilizadas en las investigaciones fue la *Junco bogotensis* y la *Eirchonia crassipes*; la distribución del número de estudios según la especie utilizada, se describe en la gráfica a continuación.

Figura 27

Relación de los estudios realizados y las especies utilizadas en cada uno de ellos



Fuente: Autoría propia

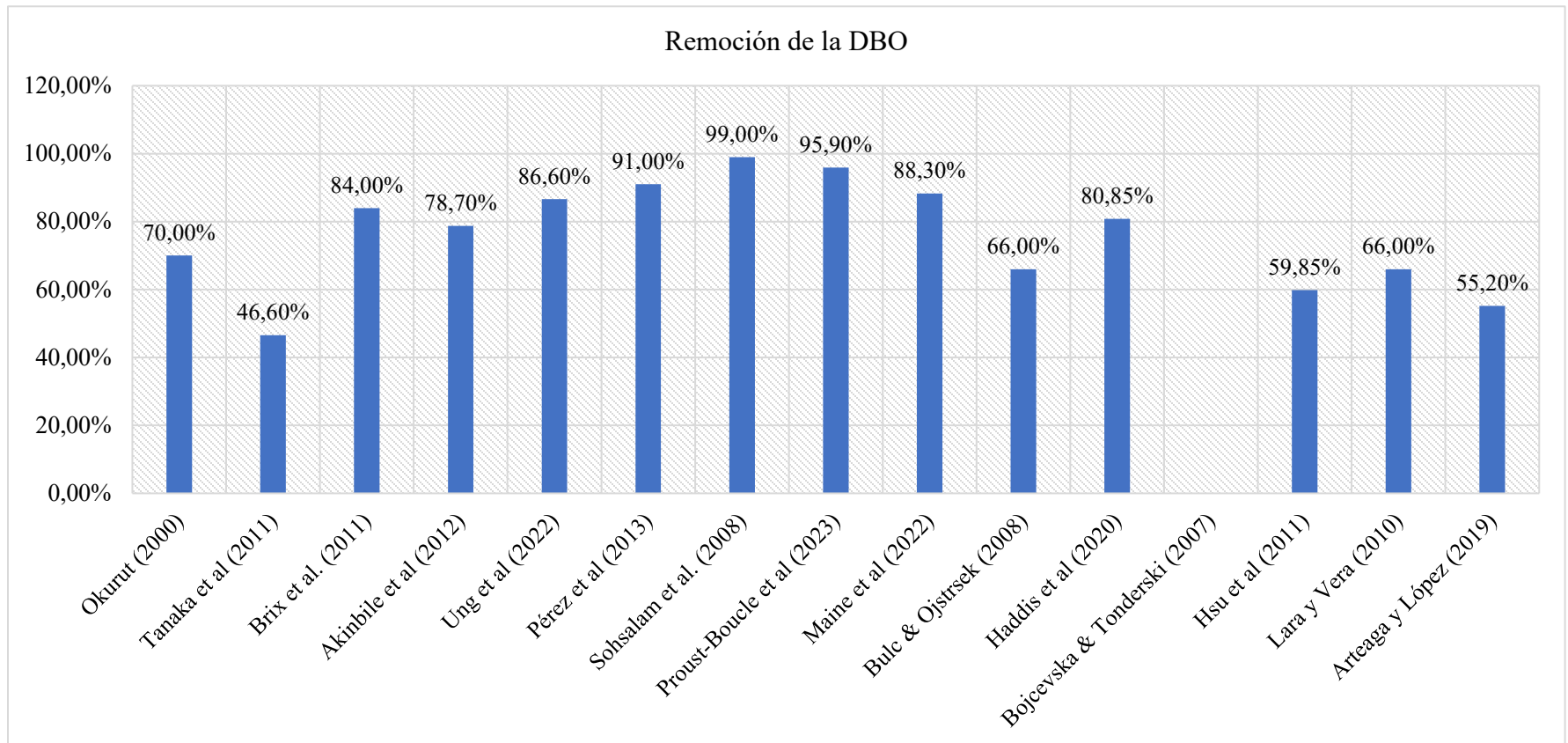
Remoción de parámetros

Demanda Biológica de Oxígeno

De los estudios consultados, se destaca que únicamente uno de ellos (Bojcevska & Tonderski, 2007) no incluyó un análisis específico sobre la remoción de este parámetro en particular. En contraste, los demás estudios proporcionaron resultados notables, reportando tasas de remoción que oscilaron entre un mínimo del 46.60% y un máximo del 99%. El promedio de remoción calculado a partir de estos estudios se situó en un sólido 76.28%, evidenciando la eficacia general de los sistemas de tratamiento estudiados en la eliminación de este parámetro de interés. Estos hallazgos resaltan la relevancia y la prometedora eficacia de dichos sistemas en la remoción de este componente en particular. El gráfico hace parte de la figura número 21.

Demanda Química de Oxígeno

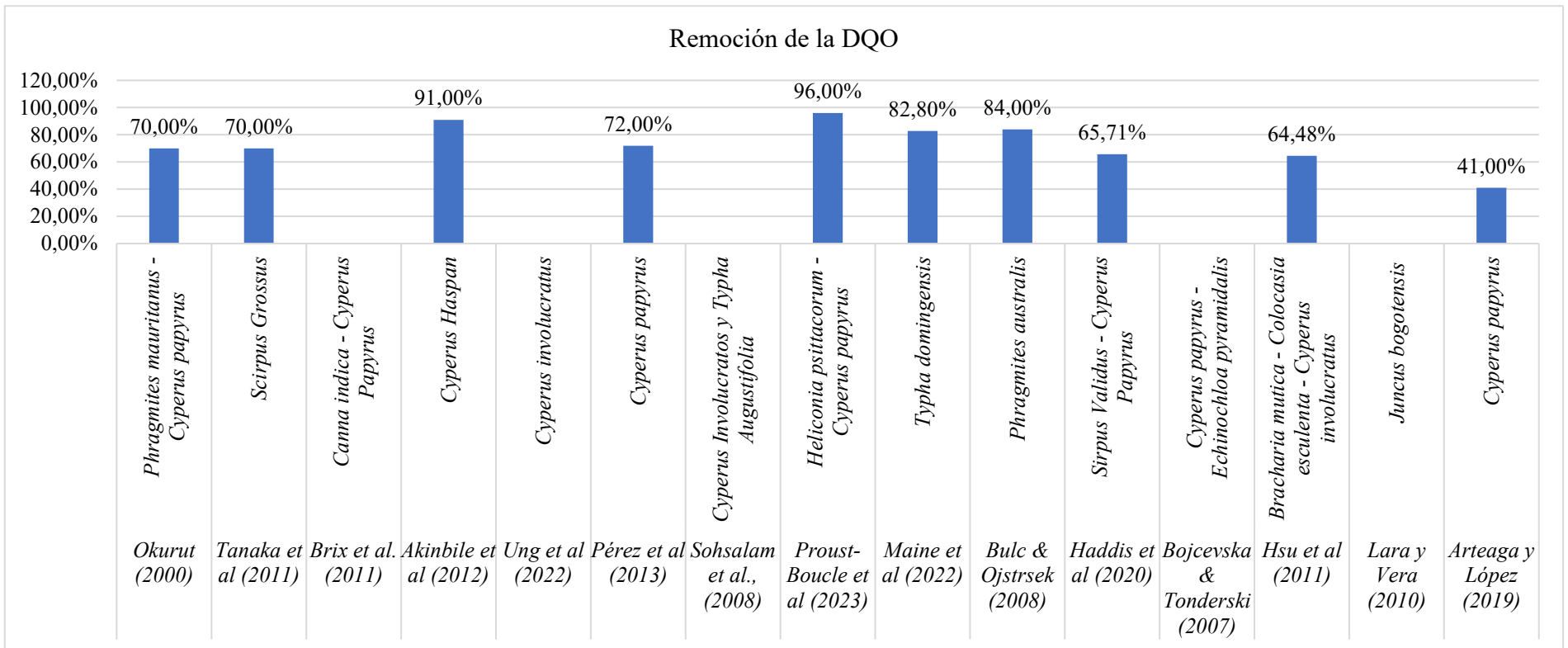
En relación a los estudios consultados, es importante mencionar que tanto Ung et al. (2022) como Bojcevska & Tonderski (2007) no llevaron a cabo un análisis específico sobre la remoción de este parámetro particular. Sin embargo, los restantes estudios presentaron resultados significativos en cuanto a la eliminación de dicho componente. Los índices de remoción informados variaron en un rango considerable, oscilando desde un mínimo del 41% hasta un máximo del 96%. El promedio de remoción calculado a partir de estos estudios se situó en un sólido 73.7%. Este alto índice de remoción resulta notable, especialmente si se considera la diversidad de especies utilizadas en los diferentes sistemas de tratamiento evaluados. Estos hallazgos subrayan la eficacia general de los sistemas estudiados en lo que respecta a la remoción de este parámetro, a pesar de la variabilidad en las condiciones y especies empleadas en las investigaciones. Puede verse el comportamiento en la gráfica número 22

Figura 28*Remoción de la DBO en los estudios revisados*

Fuente: Autoría propia

Figura 29

Remoción de la DQO en los estudios realizados



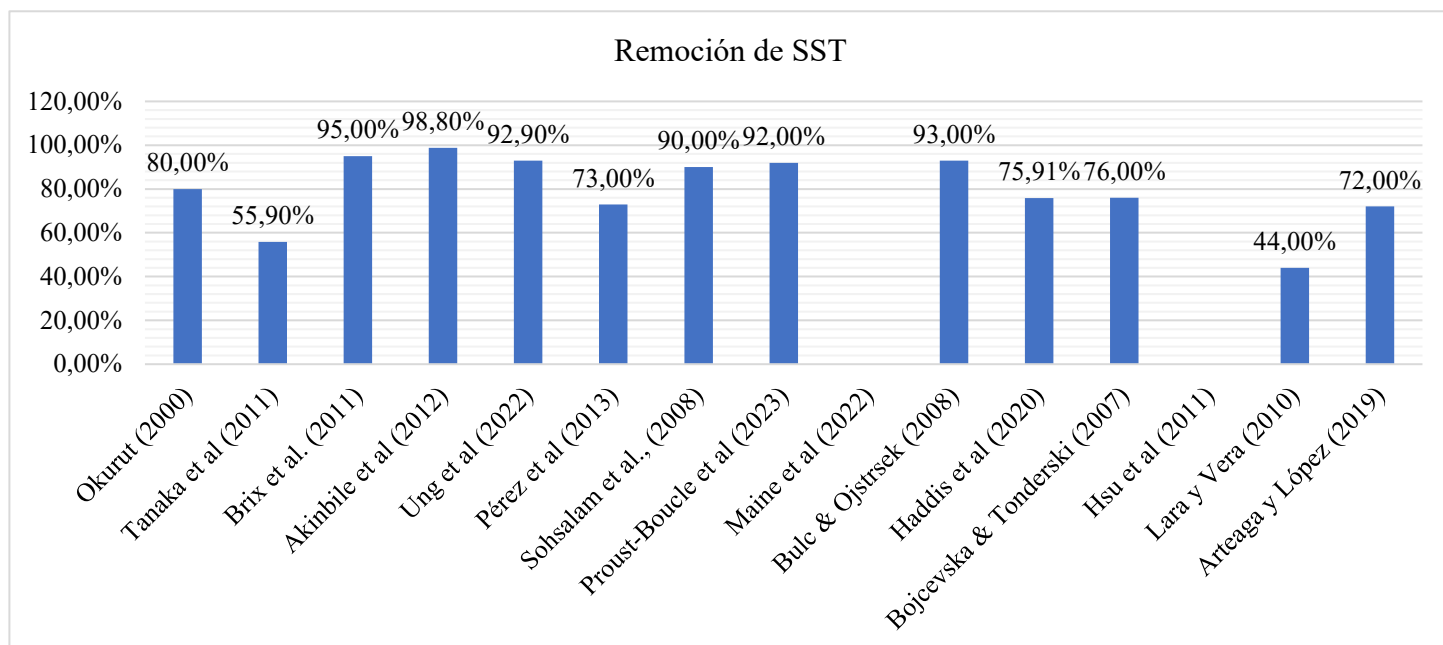
Fuente: Autoría propia

Sólidos suspendidos totales

En relación a los sólidos suspendidos totales, es relevante destacar que, con la excepción de los estudios de Hsu et al. (2011), y Maine et al. (2022), los demás estudios revelaron eficiencias de remoción que abarcaron un amplio rango, desde un mínimo del 44% hasta un impresionante 98.8%. De manera notable, se observó que las especies pertenecientes a las familias *Cyperus* y *Phragmites* exhibieron las tasas de remoción más sobresalientes. Estos resultados resaltan la capacidad particularmente efectiva de estas especies en la eliminación de sólidos suspendidos totales en los sistemas de tratamiento evaluados.

Figura 30

Eficiencia de la remoción de los SST



Fuente: Autoría propia

Viabilidad de la implementación de los sistemas de humedales artificiales en Colombia

Como se evidenció anteriormente, la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es una opción sostenible y efectiva que se ha utilizado en diversas partes del mundo. En el caso de Colombia, hay un potencial significativo para la implementación de humedales artificiales por varias razones:

La diversidad de ecosistemas: Colombia cuenta con una amplia variedad de ecosistemas, lo que permite adaptar los humedales artificiales a diferentes condiciones climáticas y geográficas.

La creciente contaminación de cuerpos de aguas: Muchas áreas en Colombia enfrentan desafíos relacionados con la contaminación del agua, ya sea debido a la agricultura, la industria o la urbanización desordenada. Los humedales artificiales pueden ser una solución efectiva para abordar estos problemas.

La sostenibilidad ambiental: En Colombia se ha mostrado un interés creciente en enfoques ambientalmente sostenibles, los humedales artificiales se alinean con estos principios al ofrecer una solución de tratamiento de aguas residuales que utiliza procesos naturales.

Normativa reciente La legislación ambiental en Colombia respalda la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Prueba de esto es la actualización del título E del Reglamento Básico de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, el cual en su anexo 2 determina que los humedales artificiales son estructuras de depuración de aguas residuales los cuales y según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021) tienen como ventajas:

“Sencillez de operación, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y al corte y retirada de la vegetación una vez seca o de acuerdo a los esquemas de poda.

Consumo energético nulo, si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales.

Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.

Al operar con elevados tiempos de retención, toleran bien los picos de caudal y carga”

(p.68).

Participación Comunitaria: La implementación de humedales artificiales también puede involucrar a las comunidades locales en la gestión sostenible del agua, promoviendo la conciencia ambiental y la participación activa.

De la disponibilidad de las especies de macrófitos

Como se observó en la tabla 1, los macrófitos que se han utilizado en proyectos de tratamiento de aguas en diferentes partes del mundo, y que podrían ser apropiadas para Colombia, incluyen:

Typha spp. (Espadaña): Tiene una alta capacidad para remover nutrientes y metales pesados del agua.

Phragmites australis (Carrizo): puede tolerar una variedad de condiciones ambientales. También es eficaz en la eliminación de nutrientes y contaminantes del agua.

Eichhornia crassipes (*Jacinto de agua*): Esta planta flotante es conocida por su capacidad para absorber nutrientes del agua. Sin embargo, puede proliferar rápidamente y convertirse en una planta invasora si no se controla adecuadamente.

Cyperus spp. (*Ciprés de agua*): Plantas que crecen en áreas húmedas y pueden ser útiles en la absorción de nutrientes y en la retención de sedimentos.

Es importante destacar que la selección de especies específicas debe basarse en las condiciones locales, los requerimientos del sitio y los objetivos de tratamiento.

Ahora bien, considerando la existencia de normativa y/o reglamentación en el tema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, la disponibilidad en Colombia de especies macrófitas y los casos de éxito en los estudios revisados en zonas tropicales con características climatológicas similares a las de nuestro país, es pertinente afirmar que el uso de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales son viables, más aún cuando evidenciamos en la revisión bibliográfica la escasez de estos sistemas a nivel nacional y sus cualidades como su eficiencia, fácil operación y el ser amigables con el entorno dejando de lado el uso recurrente y abusivo de estructuras de concreto, de difícil operación y manutención en localidades rurales y/o apartadas.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El uso de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales ha demostrado ser una solución eficiente en diversas áreas de estudio, como zonas tropicales, turísticas, instituciones educativas, industria farmacéutica, agricultura y destilerías; estos han mostrado altas tasas de remoción de contaminantes, incluyendo demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes como nitrógeno y fósforo, coliformes fecales y metales.

Se han identificado especies vegetales adecuadas para el tratamiento en humedales artificiales, como *Scirpus grossus*, *Phragmites mauritanus*, *Cyperus papyrus* y *Heliconia indica*, que han demostrado ser eficientes en la remoción de contaminantes.

Los costos de construcción y operación de los humedales artificiales varían según el tamaño y la ubicación del sistema, pero en general, se consideran relativamente bajos en comparación con otras tecnologías de tratamiento.

Los resultados obtenidos en los estudios que demuestran que los humedales artificiales son eficientes en la remoción de diversos contaminantes presentes en las aguas residuales. Donde se pudieron observar diferencias en las tasas de remoción de contaminantes entre los diferentes humedales estudiados, lo que puede atribuirse a factores como el tamaño del sistema, las especies vegetales utilizadas, el sustrato empleado y las condiciones ambientales, a pesar de los desafíos encontrados en algunos estudios, como la disponibilidad de equipos y la presencia de animales que afectan la vegetación, los humedales artificiales han demostrado ser una opción viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en diversas aplicaciones.

Es importante tener en cuenta las limitaciones y consideraciones específicas de cada aplicación, como los niveles de carga orgánica, la composición de los efluentes y las condiciones ambientales, para garantizar el rendimiento óptimo de los humedales artificiales.

Recomendaciones

Promover la educación y conciencia ambiental para garantizar el correcto funcionamiento y mantenimiento de los humedales artificiales, especialmente en áreas turísticas y comunitarias.

Se recomienda tener en cuenta las condiciones ambientales y las características del sitio antes de implementar un humedal artificial, para garantizar su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

Es importante considerar las necesidades locales y las realidades sociales, económicas y culturales al diseñar e implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las soluciones deben adaptarse a las condiciones específicas de cada comunidad o región.

Mantenimiento y monitoreo: Es importante establecer un programa de mantenimiento y monitoreo regular para los humedales artificiales. Esto incluye inspecciones periódicas, limpieza de los humedales, control de plagas y enfermedades de las plantas, y seguimiento de los parámetros de calidad del agua. El mantenimiento adecuado garantizará un rendimiento óptimo a largo plazo

Bibliografía

- Akinbile, C., Yusoff, M., & Ahmad Zuki, A. (2012). Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste Management*, 32(7), 1387-1393. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.002>
- ta, C. A. & López, E. (2019). *Diseño y puesta en marcha de un humedal artificial a nivel piloto como tratamiento complementario para la depuración de las aguas residuales tratadas en la PTAR del Municipio de Buenavista Departamento del Quindío*. [Proyecto de investigación]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/30201>
- Bojcevska, H., & Tonderski, K. (2007). Impact of loads, season, and plant species on the performance of a tropical constructed wetland polishing effluent from sugar factory stabilization ponds. *Ecological Engineering*, 29(1), 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.07.015>
- Březinová, T. D., & Vymazal, J. (2021). Distribution of heavy metals in *Phragmites australis* growing in constructed treatment wetlands and comparison with natural unpolluted sites. *Ecological Engineering*, 175, 106505. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106505>
- Brix, H., Koottatep, T., Fryd, O., & Laugesen, C. (2011). The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi—System design and lessons learned during implementation and operation. *Ecological Engineering*, 37(5), 729-735. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.035>

- Bulc, T., & Ojstršek, A. (2008). The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. *Journal Of Hazardous Materials*, 155(1-2), 76-82.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.068>
- Collivignarelli, M. C., Carnevale Miino, M., Gomez, F. H., Torretta, V., Rada, E. C., & Sorlini, S. (2020). Horizontal flow constructed wetland for greywater treatment and Reuse: An experimental case. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2317. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072317>
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R., González-Acuña, I., Gómez-Rosales, S., & Flores-López, H. (2020). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 11, 1-17.
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Del Refugio Cabañas-Mendoza, M., Olguín, E. J., Sánchez-Galván, G., Melo, F. J., & Barrientos, M. S. A. (2024). Contribution of the root system of *Cyperus papyrus* and *Pontederia sagittata* to microplastic removal in floating treatment Wetlands in two urban ponds. *Ecological Engineering*, 206, 107334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107334>
- García-Ávila, F., Avilés-Añazco, A., Cabello-Torres, R., Guanuchi-Quito, A., Cadme-Galabay, M., Gutiérrez-Ortega, H., Alvarez-Ochoa, R., & Zhindón-Arévalo, C. (2023). Application of ornamental plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A scientometric analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100307.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100307>

Haddis, A., Van der Bruggen, B., & Smets, I. (2020). Constructed wetlands as nature based solutions in removing organic pollutants from wastewater under irregular flow conditions in a tropical climate. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(1), 38-47.

<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.001>

Hsu, C., Hsieh, H., Yang, L., Wu, S., Chang, J., & Hsiao, S. et al. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 37(10), 1533-1545. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.002>

Kadlec, R. H., & Reddy, K. R. (2001). Temperature Effects in Treatment Wetlands. *Water Environment Research*, 73(5), 543–557. <http://www.jstor.org/stable/25045537>

Lara, J.A, & Vera, I. (2010). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. *Ingeniería Y Universidad*, 9(1). Recuperado de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/901>

Lombard-Latune, R., & Molle, P. (2017). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. <https://hal.science/hal-03242968v1>

Maine, M., Sanchez, G., Hadad, H., Caffaratti, S., del Carmen Pedro, M., & Di Luca, G. et al. (2022). Hybrid wetland system for a pet-care center wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 182, 106700. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106700>

meteoblue.com. (2011). *Tropical zone*. meteoblue - weather close to you. Recuperado el 20 septiembre, 2023, de <https://content.meteoblue.com/es/investigacion-educacion/recursos-educativos/meteoscool/zonas-climaticas-generales/zona-tropical>.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Anexo No.2 Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico – RAS Título E - TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.*

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Noviembre 15, 2023,

<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-2-tecnologias-ar-titulo-e-final.pdf>

Moulisová, L., Čížková, H., Dušek, J., & Kazda, M. (2023). Root and rhizome traits of the common reed (*Phragmites australis*) in a constructed wetland for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 186, 106832. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106832>

Navarro-Frómeta, A., & Durán-Domínguez, M. (2019). El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar. *Revista Cubana De Química*, 31(1), 87-104. Recuperado el 22 julio de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000400087.

Okurut, T. (2000). *A pilot study on municipal wastewater treatment using a constructed wetland in Uganda* [Ebook]. Rotterdam: A.A Balkema Publishers. Recuperado el 25 agosto 2022 de https://www.researchgate.net/publication/40146543_A_pilot_study_on_municipal_waste_water_treatment_using_a_constructed_wetland_in_Uganda

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment, and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>

Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., & Agüero, J. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332–340. <https://www.redalyc.org/pdf/4759/475947762019.pdf>

Prost-Boucle, S., Pelus, L., Becheau, E., Cervoise, L., Troesch, S., & Molle, P. (2023). Combination of sequencing batch reactor and vertical flow treatment wetlands: A full-scale experience for rum distillery wastewater treatment in a tropical climate. *Nature-Based Solutions*, 3, 100056. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100056>

Schneider, B., Hadad, H., & Rodriguez, E. (2021). *Plantas acuáticas del río Paraná Medio*. Universidad Nacional del Litoral. Universidad Nacional del Litoral. Recuperado el 29 de noviembre, 2022, de <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/xmlui/bitstream/handle/11185/6737/edunl-plantas-acuaticas-digital.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Sohsalam, P., Englande, A. J., & Sirianuntapiboon, S. (2008). Seafood wastewater treatment in constructed wetland: Tropical case. *Bioresource Technology*, 99(5), 1218–1224. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.014>

Tanaka, N., Ng, W., & Jinadasa, K. (2011). *Wetlands for Tropical Applications - Wastewater Treatment by Constructed Wetlands* [Ebook]. Imperial College Press. Recuperado el 25 agosto de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/308376601_Wetlands_for_tropical_applications_Wastewater_treatment_by_constructed_wetlands.

Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, D. (2003). Wastewater Engineering: An Overview. En *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed., Vol. I, pp. 1–23). essay, Metcalf & Eddy, Inc.

Tsihrintzis, V. A. (2017). The use of vertical flow constructed wetlands in wastewater treatment. *Water Resources Management*, 31(10), 3245–3270. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1710-x>

Ung, H., Leu, B., Tran, H., Nguyen, L., Nghiem, L., & Hoang, N. et al. (2022). Combining flowform cascade with constructed wetland to enhance domestic wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102537. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102537>

United States Environmental Protection Agency. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet Free Water Surface Wetlands*. United States Environmental Protection Agency. United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 25 marzo, 2023, de https://www3.epa.gov/npdes/pubs/free_water_surface_wetlands.pdf.

Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507-511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>