

Prototipo de humedal artificial como sistema complementario a una PTAR



SHEILA GINIVA BUSTOS YAIMA
CHRISTIAN DANILO SANIN GONZALEZ

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C

Mayo 2022

Prototipo de humedal artificial como sistema complementario a una PTAR



SHEILA GINIVA BUSTOS YAIMA

CHRISTIAN DANILO SANIN GONZALEZ

Trabajo de grado para optar por el título de

INGENIEROS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

DOCENTE

JUAN DANIEL VALDERRAMA RINCÓN

BOGOTÁ D.C

MAYO 2022

Nota de aceptación:

Ing. Juan Daniel Valderrama Rincón
Director de Proyecto

Ing. Ivan Alejandro Avila Leon
Asesor de Proyecto

Andres Julian Martinez
Firma del Jurado

Andres Felipe Carvajal
Firma del jurado

Fecha: 31 de mayo de 2022

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias primeramente a Dios, mis padres: Emilia Yaima y Teófilo Bustos, mis hermanos, a Julián David Sierra el amor de mi vida quien ahora es mi Ángel. Por brindarme su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, cada uno de ellos aportó su grano de arena e hizo que esto fuera posible, me esforzaré porque siempre se sientan orgullosos de este ser humano que han formado y que aún siguen formando.

A mi gran amor sé que desde el cielo me cuidarás siempre y guiarás cada uno de mis pasos con amor como siempre lo hiciste en vida.

Le agradezco a mi madre Esperanza González que es el motor de mi vida, quien me motiva día tras día a ser un mejor humano y en esta nueva etapa a ser un excelente profesional. Por ella y para ella dedico este trabajo de investigación con el fin de que se siga sintiendo orgullosa de este pequeño hombre que tiene como hijo.

Al señor Jesús el único y gran Dios, todopoderoso quien multiplicó mis fuerzas cuando no tenía ninguna y me sentía desmayar, aunque no te pueda ver sé que tu mano nunca me dejara y a través de este proyecto de investigación te doy toda la gloria y la honra desde ahora y para siempre.

También agradecemos a cada uno de nuestros docentes que han sido un pilar fundamental para el desarrollo de esta etapa universitaria y de quienes nos llevamos los mejores conocimientos ya que siempre fueron unas personas íntegras y dedicadas a compartir sus conocimientos.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	11
4. OBJETIVOS.....	12
5. MARCO CONCEPTUAL.....	13
5.1 AGUAS RESIDUALES.....	13
5.2 HUMEDAL ARTIFICIAL.....	13
5.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA.....	15
5.4 NORMATIVIDAD.....	16
6. ESTADO DEL ARTE.....	18
7. METODOLOGÍA.....	26
7.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES.....	26
7.2 SUSTRATOS.....	26
7.3 PLANTAS UTILIZADAS.....	27
7.4 PREPARACIÓN DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA.....	27
7.5 MUESTREO Y MONITOREO.....	28
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
9. CONCLUSIONES.....	37
10. RECOMENDACIONES.....	39
11. BIBLIOGRAFÍA.....	40
12. ANEXOS.....	43

LISTA DE FIGURAS

	PÁG
FIGURA 1 Ubicación del municipio de la zona de estudio.....	10
FIGURA 2 Esquema de distribución de un humedal artificial.....	14
FIGURA 3 Esquema de funcionamiento de un humedal artificial.....	15
FIGURA 4 Diseño de humedal	24
FIGURA 5 Construcción del humedal.....	26
FIGURA 6 Construcción del humedal.....	26
FIGURA 7 Plantas utilizadas en el humedal.....	27

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Parámetros y valores máximos permisibles.....	17
TABLA 2 Características de los humedales.....	19
TABLA 3 Concentración de los parámetros al ingreso de los sistemas.....	21
TABLA 4 Diseño y detalles de los sistemas de humedales.....	23

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 Cambio en la conductividad debido al humedal.....	30
GRÁFICO 2 Porcentaje de remoción de color.....	31
GRÁFICO 3 Porcentaje de remoción de turbiedad.....	32
GRÁFICO 4 pH del efluente de cada ensayo.....	33
GRÁFICO 5 Porcentaje de remoción de SST.....	34
GRÁFICO 6 Porcentaje de remoción de DQO.....	35
GRÁFICO 7 Remoción de DQO.....	36

1.INTRODUCCIÓN

La contaminación de los cuerpos de agua ha incrementado en los últimos años debido a la carencia de plantas de tratamiento de aguas residuales a causa de su alto costo de construcción, operación y mantenimiento. El no tratamiento de estas aguas residuales es perjudicial para los animales que habitan en los cuerpos de agua que las reciben ya que éstos pueden ingerir contaminantes. Más adelante esto puede causar enfermedades en las personas que viven aledañas a las corrientes de aguas ya que en ocasiones ellas se alimentan de los peces que permanecen en estos cauces. Debido a lo anterior es importante la búsqueda de sistemas más económicos, fáciles de operar y, sobre todo, asequibles para las comunidades en general. Basados en experiencias anteriores se plantea la construcción de un prototipo de humedal artificial que permita mejorar la calidad del agua antes de ser vertida a los ríos y que incluso pueda ser utilizada para riegos de cultivos y para consumo de animales.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se han seleccionado varias especies de plantas provenientes de humedales y diferentes sustratos, que junto a los microorganismos trabajan en consorcio formando una simbiosis, permitiendo la reducción y degradación de los contaminantes del agua residual.

Los humedales artificiales utilizan componentes orgánicos que tienen un bajo costo en el mercado lo que disminuye el valor en la implementación, mantenimiento y la puesta en marcha, que, comparado con los sistemas convencionales, minimiza el impacto al medio ambiente (2009, Romero et al).

La metodología aplicada consistió en construir e implementar un prototipo de humedal con agua sintética que simulara un agua residual de tipo doméstico. Dicha agua tuvo componentes previamente establecidos que permitieron que fuera catalogada como agua residual. Seguido de esto se evaluó si los tiempos de retención son adecuados para obtener una reducción suficiente de los contaminantes y que esta agua al final del proceso pueda ser reutilizada para actividades del campo.

Basados en el desarrollo del proyecto de investigación y siendo conscientes de lo que conlleva el mantenimiento del humedal artificial, el reto más grande al cual nos vimos expuestos es la adaptación de las plantas al medio artificial. Al estar trabajando con seres vivos corremos el riesgo de que las plantas no sobrevivan y prosperen en el nuevo medio que se ha dispuesto para ellas, por lo que fue necesario evaluar también su crecimiento individual, la altura de los follajes, el número de hojas, la apariencia física y los demás parámetros que nos permitan identificar las necesidades tanto físicas como de alimento necesarios para un buen desempeño en cuanto a la degradación de contaminantes presentes en el agua sintética.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

“En Colombia existen 1101 municipios de los cuales solo el 48,2 % (541 municipios) tienen una planta de tratamiento de aguas residuales” (2018, Venegas). Esto genera una problemática ambiental enfocada a la contaminación de fuentes hídricas, ya que los municipios que no cuentan con una planta de tratamiento vierten sus aguas directamente a los ríos y quebradas. Estas fuentes hídricas muchas veces son utilizadas para consumo humano, riegos de cultivos y abastecimiento para especies bovinas y equinas, también proporcionan alimentos esenciales para el consumo de la comunidad. El riego es la principal fuente para la reutilización de aguas residuales y para esto es necesario controlar los parámetros de salinidad y macronutrientes presentes en el agua, ya que, si sobrepasan los niveles permitidos, podrían llegar a afectar el sistema agua y suelo-suelo y plantas. Esto también conlleva a una reducción de las cosechas y los productos serían de menor calidad (2001, Manga and Logreira).

El municipio de Funza-Cundinamarca tiene una población de aproximadamente 103.000 habitantes, se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca como se muestra en la figura 1. Sus aguas residuales son de carácter doméstico e industrial y “ cuenta con una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de sistema convencional, el efluente de esta PTAR es dirigido a los humedales Gualí y Tres Esquinas” los cuales reciben el 9% del agua total del municipio (2020,Navarrete), esto aumenta la capacidad de carga que tiene cada humedal y por ende se ve la necesidad de acoplar un sistema que permita una reducción aproximada de un 80% de la carga contaminante que contiene el agua residual proveniente de la PTAR y sea reutilizada para el sector agrícola que es una parte fundamental para el sustento alimenticio del país.

En consecuencia, a la problemática evidenciada se realiza el planteamiento de la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el tiempo de retención hidráulico óptimo que garantiza una mayor remoción de contaminantes en el humedal artificial como sistema complementario de la PTAR de Funza para la utilización de estas aguas en sistemas de riego del municipio?

Figura 1 Ubicación del municipio de la zona de estudio



Nota: La figura muestra la ubicación del municipio de Funza y zonas aledañas.

Fuente: Google maps

3. JUSTIFICACIÓN

Una de las razones por las cuales se debe realizar el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Funza radica en la disminución de la carga contaminante que tienen los humedales Gualí y Tres Esquinas, la segunda razón tiene que ver con la agricultura. Funza es un municipio que tiene como principal actividad económica la agricultura, al reducir la carga contaminante del efluente de la PTAR se podría disponer de ese recurso para el riego de cultivos y de esta manera reducir el consumo de agua potable del municipio.

La implementación de sistemas que permiten la remoción de contaminantes en aguas residuales, son alternativas que se han empleado en varios países del mundo teniendo con ello una respuesta satisfactoria en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Nitrógeno Total (NT), entre otros parámetros. El uso de estos humedales se convierte en una tecnología que se puede adaptar y diseñar en pequeños espacios permitiendo que los costos de mantenimiento y operación sean accesibles para comunidades de bajos recursos de las cuales Colombia tiene bastantes” (2016, Jaramillo, Agudelo & Peñuela).

Con el fin de dar respuesta a la problemática ya expuesta, se planteó un proyecto de investigación que consistió en la implementación de un prototipo de un humedal artificial que permita evaluar el porcentaje de remoción de contaminantes y de esa manera determinar el tiempo de retención en el cual hay mayor porcentaje de remoción mediante la toma de datos.

Este proyecto les brindó a los estudiantes de la universidad Antonio Nariño un sistema complementario y alternativo para la degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas, además les permitirá desarrollar proyectos que sean de bajo costo, útiles para ser implementados en las comunidades generando el mínimo impacto al medio ambiente.

4. OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de humedal artificial que permita complementar la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza.

Objetivos específicos

Realizar el diseño del humedal de acuerdo a las características del agua residual del municipio.

Construir el prototipo de humedal de acuerdo a las características encontradas anteriormente.

Encontrar el tiempo de retención óptimo donde se logre el mayor porcentaje de remoción y realizar la evaluación de los siguientes parámetros: DQO, SST, Conductividad eléctrica, color aparente y turbidez.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1 Aguas residuales

Son residuos que se pueden generar en una actividad diaria como cocinar, hacer aseo, etc. Estas aguas requieren de tratamientos previos a la disposición final debido a que contienen materia orgánica y contaminantes que pueden afectar los cuerpos de agua donde se disponen.

Las aguas residuales son producto de la utilización de agua potable de diferentes sectores de la economía como son el uso doméstico, industrial o comercial. Luego de este uso se incorporan al agua sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes como fósforo y nitrógeno, generando contaminación. Por lo tanto, se hace necesaria la depuración de estos contaminantes por medio de un tratamiento que permita la degradación de los mismos utilizando diferentes técnicas y procesos que mejoren la calidad del agua antes de ser vertidas a los ríos y quebradas (2008, Muñoz). El tratamiento de aguas residuales de forma convencional tiene incluido dentro de sus procesos el uso de sistemas físicos, químicos y biológicos para la eliminación y degradación de contaminantes presentes en el agua. Estos tratamientos generan residuos que deben ser manejados ocasionando un incremento en los costos y además tienen impactos en el medio ambiente. Lo que se busca con este proyecto es evaluar varias alternativas que de manera sostenible puedan arrojar resultados positivos para la eliminación de los contaminantes y minimizar los impactos al medio ambiente.

5.2 Humedal Artificial

Los humedales artificiales son estructuras construidas por el ser humano para aprovechar la sinergia que existe entre los sustratos, las plantas acuáticas y los microorganismos con el fin de realizar la absorción, retención y degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales. Estos sistemas usan en su estructura materiales sostenibles y amigables con el medio ambiente que requieren un uso mínimo de energía para su funcionamiento, por lo tanto,

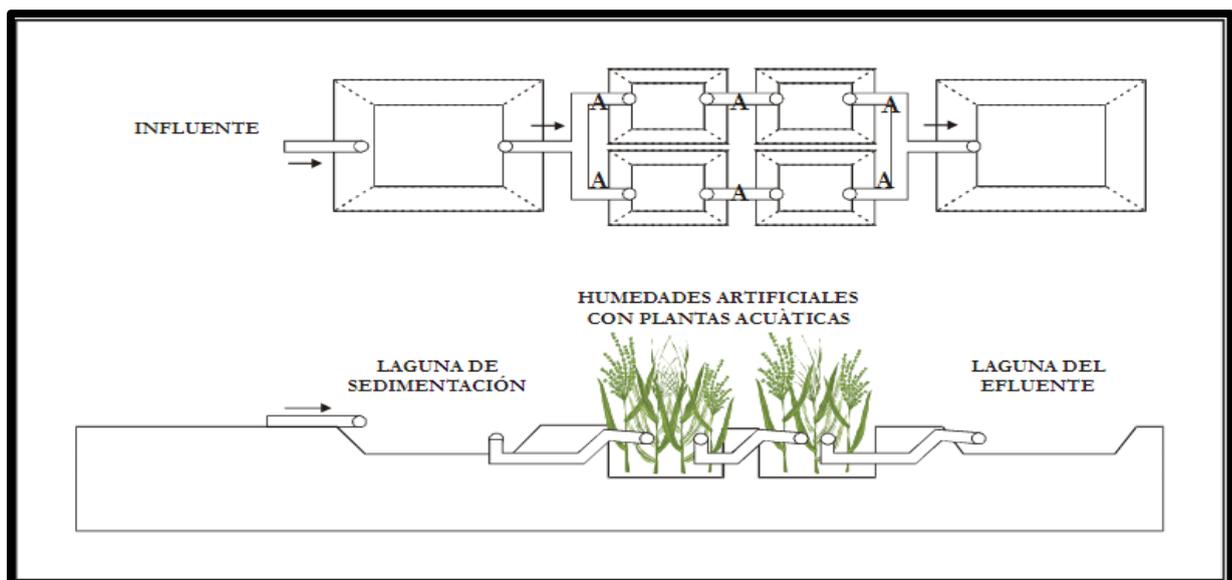
el impacto generado al medio ambiente es mínimo (2006, Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez).

En la figura 2 se muestra el esquema de planta y de corte de cómo se encuentra conformado un humedal artificial. Se puede observar una laguna de sedimentación la cual cumple con dos funciones: la primera es reducir la velocidad con la que el agua ingresa al humedal y la segunda es evitar el ingreso de sólidos de gran tamaño, los cuales podrían impedir el paso del agua hacia el humedal por medio de los tubos conductores.

En la segunda sección se encuentra el humedal con las plantas acuáticas en las cuales se encuentran los sustratos que son el soporte para el crecimiento y la estabilidad de las mismas, es allí donde se realiza la retención de sólidos de menor tamaño y absorción de sólidos disueltos, además de proporcionar las condiciones ideales para la supervivencia de los microorganismos encargados de la degradación de materia orgánica.

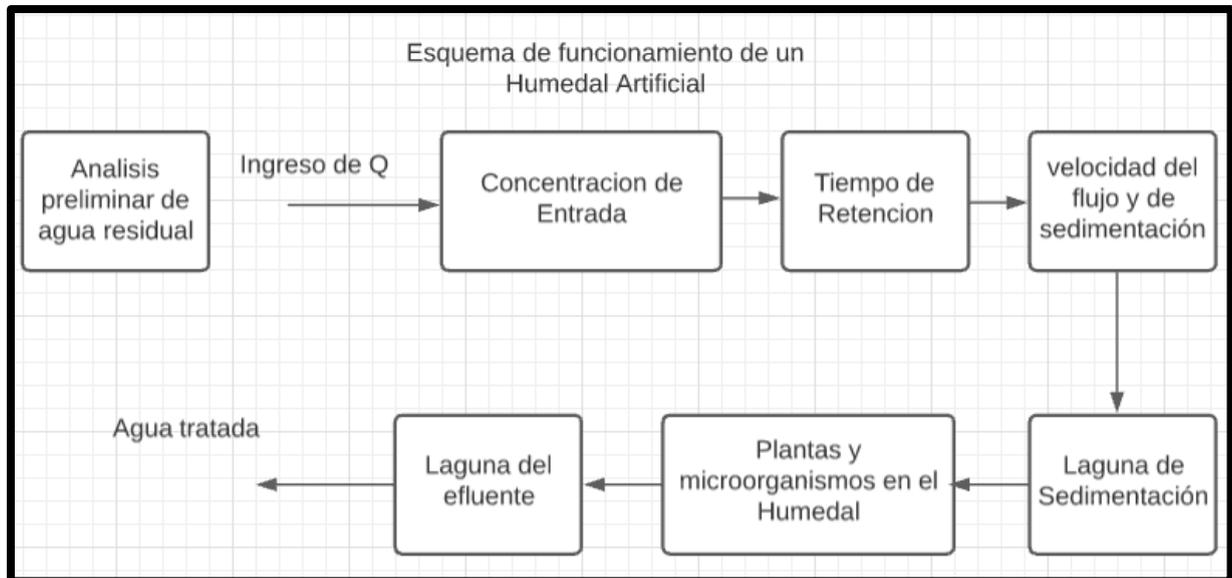
En la tercera sección tenemos una laguna donde sale el efluente con una carga menor de contaminantes y de allí se puede realizar el vertimiento hacia ríos y quebradas o darle un reuso al agua para riego de cultivos (Llagas Chafloque yand Guadalupe Gómez, 2006).

Figura 2. Esquema de distribución de un Humedal Artificial



Nota: sistema de humedales artificiales. Fuente: (Llagas Chafloque yand Guadalupe Gómez, 2006)

Figura 3. Esquema de funcionamiento de un Humedal Artificial.



Nota: funcionamiento de un prototipo de humedal. Fuente: Autores

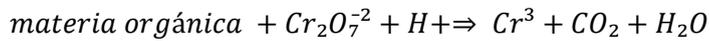
En la figura 3 podemos observar el esquema de funcionamiento y las variables a tener en cuenta para la construcción e implementación de un humedal artificial.

5.3 parámetros de calidad del agua

pH: Es la medida de la concentración del ion hidrógeno en el agua. Las aguas residuales con una concentración negativa del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente. Si el pH es menor a 6 permite el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH alto predomina el nitrógeno en forma amoniacal, el cual es tóxico. El valor ideal para los procesos que implican organismos vivos generalmente debe estar entre 6,5 y 8,5. (2000, Romero Rojas).

CONDUCTIVIDAD: Es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica, esta propiedad depende de la presencia de iones, concentración, temperatura, entre otros (2000, Romero Rojas).

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): “Se utiliza para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable por medio de un agente químico, por lo general se utiliza el dicromato de potasio en un medio ácido y a alta temperatura para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos” (2000, Romero Rojas).



TURBIEDAD: Constituye la medida óptica de las partículas que están suspendidas en el agua donde se puede llegar a perder su transparencia, en aguas residuales es un factor importante de control de calidad” (2000, Romero Rojas).

COLOR: “este parámetro en aguas residuales puede indicar el buen estado o deterioro de los procesos de tratamiento” (2000, Romero Rojas).

5.4 NORMATIVIDAD

Resolución 631 de 2015: parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de agua superficiales.

Esta resolución se utilizó para verificar los máximos permisibles para aguas residuales domésticas y sobre esto se realizó la investigación con sus debidos estudios

Tabla de caracterización básica:

En la tabla 1 podemos observar los parámetros con los cuales se realiza la caracterización de las aguas residuales y los valores máximos que se permiten para vertimientos de aguas residuales de origen doméstico contemplados en la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.

Tabla 1: *Parámetros y valores máximos permisibles para aguas residuales domésticas*

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS - ARD DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS - ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD - ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES, CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 Kg/día DBO ₅
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) ²	mg/L O ₂	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DB ₅) ³	mg/L O ₂		90,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y Reporte

Fuente: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible

6 ESTADO DEL ARTE

COMBINATION OF WETLAND SYSTEMS FOR THE DISINFECTION AND REMOVAL OF POLLUTANTS FROM WASTEWATER

En este artículo se realizó un estudio para evaluar la eficiencia que tienen los humedales artificiales como un sistema complementario a una PTAR que tiene como afluente aguas provenientes del sector doméstico. Se quiere recuperar estas aguas residuales y proporcionarles un nuevo uso para poder aliviar las demandas de agua y minimizar el impacto ambiental.

Se aplicó esta alternativa ya que es de bajo costo, fácil operación y puede complementar la PTAR para que esta pueda cumplir los límites máximos permisibles de la normatividad italiana. Para esto se realizó una evaluación previa de los factores climáticos que predominaban en el sector, así como también el terreno donde se instalarán los humedales y las especificaciones con las que opera la PTAR para posteriormente ser diseñados y operados los humedales artificiales.

En cada uno de los humedales fueron plantadas diferentes tipos de macrófitos y el área de cada uno fue variable. Para evaluar la eficiencia de estos humedales se recolectaron muestras de agua durante más de un año variando el tiempo de recolección de cada muestra que va de 2 a 3 semanas para luego realizar una caracterización de las muestras e identificar si los humedales son eficientes o no, los humedales contaban con un tiempo de retención de 2,3 días (Tabla 1) lo que fue un factor favorable ya que en la caracterización se pudo constatar que tenían una eficiencia para la reducción de parámetros como: DBO₅, DQO Y SST sin embargo los patógenos aún continuaban en el agua por lo que se propone que se realice un proceso de tratamiento que permita eliminar estos patógenos y poder hacer uso de esta agua para el sector agrícola sin generar ninguna afectación para la salud y el medio ambiente.

Este artículo es de gran importancia para nuestro proyecto debido a que allí se plantea la idea de un tiempo de retención hidráulico que es favorable para los humedales artificiales como un sistema complementario. Además, se evidencia la disminución de DQO y SST que fueron evaluados en el proyecto investigativo (2018, Russo, Marzob, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli).

Tabla 2

Características de los humedales artificiales construidos

Constructed wetlands	Operation time (year)	Flow rate (m ³ /day)	Width (m)	Length (m)	HRT (day)	Area (m ²)	Gravel				Macrophytes planted
							Type	Size (mm)	Nominal porosity	Depth (m)	
CW1	12	240	28.5	70	2.3	2000	Volcanic	8-15	0.47	0.6	<i>Phragmites australis</i>
CW2	6	240	28.5	70	2.3	2000					
CW3	6	150	20	60	2.3	1200					<i>Typha latifolia</i>

Nota: Datos tomados de la revista **Science of the Total Environment** (Russo, Marzob, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli)

INTEGRATED WETLAND SYSTEM FOR THE TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER AND EVALUATION OF ECOTOXICITY AND CYTOGENETIC PARAMETERS

Este artículo evaluó la eficiencia de un sistema integrado para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una propiedad rural al sur de Brasil. Este sistema está compuesto de un reactor UASB, 4 humedales artificiales y 2 fotorreactores. Se quiere evaluar la reducción de parámetros de carga y de los contaminantes tóxicos que pueden estar presentes en las aguas residuales; esto con el fin de minimizar los impactos ambientales y las contaminaciones de los cuerpos de agua donde son depositadas.

La selección de este sistema de tratamiento está basada en disminuir costos y aumentar efectividad, es por esto que se utilizaron humedales artificiales ya que estos son tecnologías eficientes para el tratamiento de aguas, así como tienen un bajo consumo energético y costos de mantenimiento.

Para la evaluación del sistema se tomaron 5 puntos de muestreo en cada una de las operaciones, esto con el fin de ser evaluados los parámetros en el laboratorio. El desarrollo de este proyecto tuvo un tiempo de un año donde semanalmente se realizaba la toma de muestras.

El agua residual utilizada para la investigación excede los límites máximos permisibles de la normatividad brasileña por lo que sería altamente contaminante para la vida acuática. Luego de la puesta en marcha y operación del sistema integrado se evidenció que la contaminación del cuerpo de agua había disminuido y que esta agua ya cumplía con los límites de la normatividad brasileña y con la normatividad europea.

Los humedales artificiales tienen una alta tasa de eliminación de contaminantes como se puede observar en la tabla 3 y que junto con otras operaciones hace que su efectividad aumenta y tengan una mayor eliminación de estos contaminantes que pueden llegar a ser tóxicos debido a las reacciones que pueden ocurrir entre ellos. La implementación de este sistema integrado puede ser una alternativa viable para el uso de esta agua en el sector agrícola (2018, Lutterbecka, Zerwesa, Radtke, Kohler, Kista & Machado).

Tabla 3

Concentración de los parámetros al ingreso de cada uno de los sistemas

Parameter	Sampling points (Fig. 1)						
	Raw wastewater (P1)	Anaerobic unit (P2)	SSFCWs 1-2 (P3)	SSFCWs 3-4 (P4)	UV ($\lambda = 254 \text{ nm}$) ^{***} (P5)	UWTD 91/271/EEC	CONSEMA/RS ⁺ resolution 128/06 $Q \leq 20 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$
COD ($\text{mg L}^{-1} \text{ O}_2$)	1074.5	356.9	94.5	15.7	9.6	125	≤ 330
BOD ₅ ($\text{mg L}^{-1} \text{ O}_2$)	903.68	262.5	95.2	4.7	4.2	25	≤ 120
Total P (mg L^{-1})	16.6	5.87	4.2	1.9	1.3	2	≤ 4 ^{***}
TKN (mg L^{-1})	232.9	47.7	19.7	1.1	1.0	15	≤ 20
Dissolved O ₂ (mg L^{-1})	0.16	0.0	1.45	1.60	3.2	-	-
Wastewater Eh (mV)	-49	-71.8	60	80	800	-	-

Nota: Datos tomados de la revista Ecological Engineering (Lutterbecka, Zerwesa, Radtke, Kohler, Kista & Machado)

CONSTRUCTION OF CONVENTIONAL WETLANDS FOR THE ELIMINATION OF MICROPOLLUTANTS AND BIOLOGICAL EFFECTS.

En este artículo se realiza una comparación de los diferentes tipos de humedales artificiales (humedales convencionales, intensificados con aireación, de flujo horizontal, intensificados con aireación de flujo vertical, alternativos y de dos etapas con filtros de arena) y una PTAR para evaluar su eficacia en la eliminación de los contaminantes convencionales de aguas residuales domésticas y de los micro contaminantes que generalmente se encuentran presentes en estas aguas. Para esta comparación se construyeron 7 humedales que constituyeron 5 etapas; cada una de éstas con variaciones en las profundidades, los medios de filtros, los caudales, el tipo de sistema y el tiempo de retención hidráulica (Tabla 4).

“La zona de estudio de este artículo se ubicó en Langenreichenbach- Alemania donde se utilizó agua residual doméstica de una PTAR que atiende aproximadamente 16000 habitantes” esta investigación tuvo una duración de aproximadamente un año donde se realizaban toma de muestras cada cierto tiempo y en zonas aleatorias de los diferentes tipos de tratamiento de los humedales para luego ser analizadas en el laboratorio, allí se realizaban las mediciones de los parámetros convencionales y adicionalmente se analizaron los

componentes de los micro contaminantes que se pueden encontrar comúnmente en las aguas residuales. Estos componentes se encuentran en las aguas debido a que son consumidos por los seres humanos en sus hogares cuando se presentan algunas dolencias.

El estudio en el laboratorio arrojó resultados favorables para todos los sistemas de humedales, pero algunos son más favorables que otros y esto se debe al uso de aireación con y sin plantas. La aireación le permite al sistema una mayor degradación de contaminantes.

Los humedales convencionales permiten una degradación menor que la de una PTAR y esto se debe a que el sistema toma una condición anaerobia que hace que se degraden en menor proporción los contaminantes. Los humedales de tipo intensificados son una alternativa factible que puede ser similar a la de una PTAR y los sistemas de humedales de dos etapas que constan de aireación y filtro de arena tienen un mayor porcentaje de eliminación de contaminantes que los de una PTAR, por lo que pueden ser un sistema de tratamiento secundario para aguas residuales domésticas. Se concluyó que el uso de plantas en los humedales no tiene una alta influencia, sino que el buen funcionamiento de estos depende de las características del ambiente en el que se desarrollan, así como de la oxigenación que tiene el agua contenida en estos humedales. Es recomendable el uso de humedales aireados y humedales de dos etapas, en los cuales se obtuvieron los mayores porcentajes de reducción (2021, Forquet, Nivala, Muller, Escherfg, Afferden, Reemtsma, Schlichting & König).

Tabla 4

Diseño y detalles de los diferentes sistemas de humedales artificiales de mayo de 2018-abril de 2019.

System Abbreviation ^a	System Type ^b	Effective depth ^c (cm)	Saturation Status	Filter Media	Total Surface Area (m ²)	Average Inflow (m ³ /d)	Nominal Hydraulic retention time (d)
Conventional H50p	HF	50	Saturated	8 – 16 mm gravel	5.6	0.2	5.5
Intensified VA, VAp	VF + Aeration	85	Saturated	8 – 16 mm gravel	6.2	0.6	3.5
HA, HAp	HF + Aeration	100	Saturated	8 – 16 mm gravel	5.6	0.6	3.7
R	Reciprocating	95	Alternating	8 – 16 mm gravel	13.2	1.4	3.0
Two-Stage^d VAp+VSp	VF + Aeration VF sand filter	85 (VAp) 85 (VSp)	Saturated (VAp) Unsaturated (VSp)	8 – 16 mm gravel (VAp) 1 – 3 mm sand (VSp)	5.6 (VAp) 5.6 (VSp)	0.6	3.5

Nota: Datos tomados de la revista wáter research (Forquet, Nivala, Muller, Escherfg, Afferden, Reemtsma, Schlichting & Kónig)

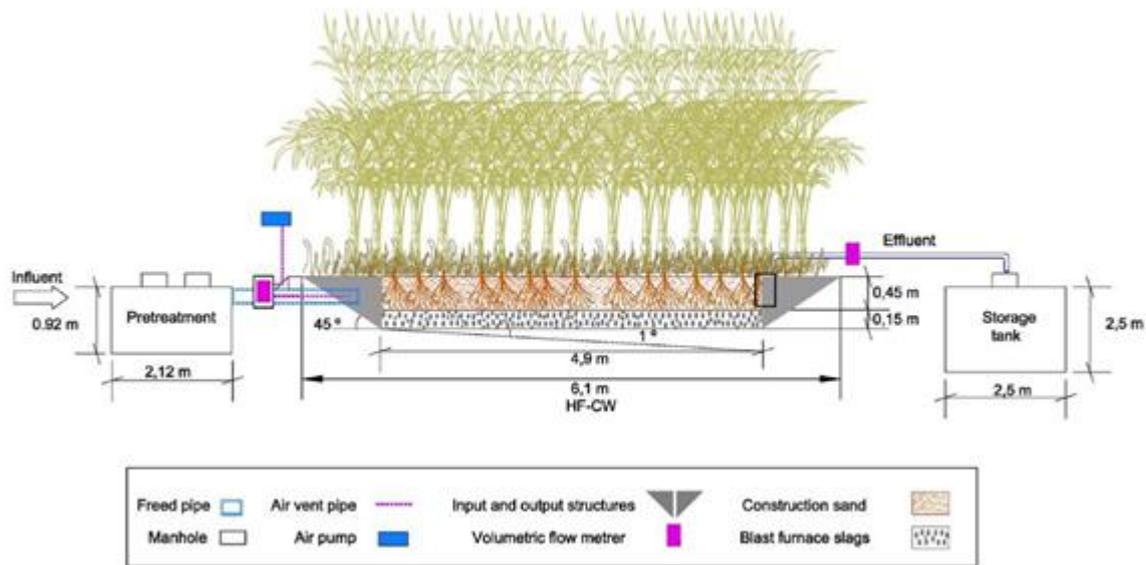
SUBSURFACE HORIZONTAL FLOW WETLAND FOR THE REUSE OF DOMESTIC WASTEWATER.

En este estudio se realizó una investigación para evaluar el rendimiento de un humedal artificial de flujo subterráneo horizontal al sureste de España donde se presenta escasez de agua debido a la salinización de los acuíferos por la proximidad con el mediterráneo y el aumento de la población. Además de esto, algunas zonas del sureste no cuentan con sistema de alcantarillado, lo que puede ser un riesgo para los acuíferos de agua subterránea que tienen cercanía a donde son arrojadas estas aguas.

Es por esto que se ha visto la necesidad de implementar alternativas que permitan la reutilización de las aguas residuales donde no se tiene un sistema de alcantarillado para reutilización de esta agua en riegos de cultivos, vertido de baños, riego de zonas verdes, entre otros. Con esta alternativa se estaría disminuyendo la demanda de agua potable en procesos donde no es indispensable el uso de esta agua y así minimizar los impactos ambientales que se puedan generar por esta causa. Para ésto, se planteó la mejora en el diseño del humedal para obtener una mayor eficiencia y además se evaluaron factores importantes como la condición climática del sector, el área disponible y el tipo de plantas a utilizar. Este sistema fue desarrollado en una vivienda retirada del sector donde se cuenta con un espacio suficiente

para la implementación del humedal. El diseño de este humedal se presenta en la figura 4 allí se detallan las dimensiones de éste.

Figura 4. *Diseño de humedal utilizado en la investigación*



Nota: Figura tomada de la revista *Bioresource Technology*

Luego de la puesta en marcha del humedal se realizaron muestreos a la entrada y salida del humedal y su análisis fue realizado por triplicado para así tener una mayor certeza de los datos que se obtenían. Esta investigación tuvo un tiempo de duración de un año donde se realizaron evaluaciones cada cierto tiempo para así poder conocer el estado y funcionamiento del humedal. Los datos permitieron concluir que el humedal sí es un sistema factible para la reutilización del agua residual para riego de cultivos y demás actividades que no requieren necesariamente de agua potable ya que se obtuvieron remociones de DQO hasta de un 99,1 %, SST de 97,5% y turbidez de 99,8%, lo cual hace que este sistema sea eficaz e implementable debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. Sin embargo, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas ya que tienen gran influencia debido a que en temperaturas elevadas hay una menor eficacia y en temperaturas bajas también se presentan bajas remociones (2017, Martínez, Martínez, Medina & Almela).

TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA PTAR DEL INPEC-YOPAL-CASANARE-COLOMBIA CON BIOFILTROS

Esta investigación evaluó un biofiltro a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la PTAR del centro carcelario de Yopal-Casanare con el fin de poder reutilizar estas aguas para riegos agrícolas y de pastos. Para el desarrollo de esta investigación se contemplaron 3 fases:

1. caracterización físico-química y microbiológica de parámetros del agua residual saliente de la PTAR
2. Diseño y construcción del humedal
3. Operación del sistema

Para el desarrollo de estas fases se tuvo en cuenta: características del sistema, área disponible, tipo de plantas a utilizar y los sustratos. La toma de muestras tuvo una duración de 1 mes donde cada semana se realizaron muestreos para poder evidenciar los cambios que se iban presentando en el humedal con el paso del tiempo.

Al finalizar la investigación se concluyó que el sistema es efectivo y el agua residual puede ser utilizada para riegos de cultivo ya que cumple con la normativa de límites máximos permisibles para reúso de agua. Sin embargo, un factor que influyó en que no se obtuvieron mejores resultados fue que el humedal es de tipo anaeróbico, lo que hace que se presente una dificultad para la degradación de la materia orgánica y además las plantas no alcanzaban a consumir las sales disponibles en el agua ya que el tiempo de retención hidráulico (TRH) era de 3.4 días y no era suficiente para la adaptación de estas plantas.

Ese documento fue fundamental para el desarrollo del proyecto de investigación debido a que allí se utilizan plantas que fueron eficientes para la degradación de la materia orgánica y el tiempo de retención que allí se encontró fue similar al obtenido de nuestra investigación lo que permitió concluir que puede ser un tiempo de retención óptimo. Sin embargo, para futuras mejoras en el humedal hay que tener en cuenta la aireación del sistema (2017, Higuera).

7. METODOLOGÍA

7.1 Construcción de los humedales

Los humedales artificiales se construyeron con recipientes plásticos de 21 x 47,5 x 62 cm de perímetro con el fin de dar espacio suficiente a las plantas para extender sus raíces y aumentar la profundidad de arraigamiento de las mismas (ver figura 5).

También se realizó la adquisición de tubos PVC de ½ “(codos uniones y empates) tanto para la salida del agua del humedal(ver figura 6) como para la estructura que sostiene el sistema eléctrico que simula las condiciones de luz a las que están expuestas las plantas. Este sistema eléctrico constaba de rosetas, cable dúplex, bombillos incandescentes y un *timer* que permite que las luces se apaguen en las horas de la noche.

Figura 5: *construcción del humedal*



Figura 6: *construcción del humedal con los sustratos*



Nota: Las figuras muestran el proceso de construcción del humedal.

Fuente: Autores

7.2 Sustratos

Los sustratos utilizados para el soporte de las plantas y el medio filtrante que aumenta la depuración de las aguas residuales están distribuidos por capas de la siguiente manera:

- Materia orgánica 7 cm

- Grava (2 a 4 mm) 5 cm
- Antracita (0,8 a 1,2 mm) 5 cm
- Arena (0,45 a 0,55 mm) 8 cm

7.3 Plantas utilizadas

Las plantas fueron distribuidas uniformemente por todo el humedal usando las siguientes especies: *Polygonum punctatum* (barbasco), *Eichhornia crassipes* (buchona cucharita), *Schoenoplectus californicus* (junco común), *Allium schoenoprasum* (junco cebollita), *Typha latifolia* (enea), *Hydrocotyle ranunculoides* (sombrellita)(ver figura 7).

Figura 7: Plantas utilizadas en el humedal



Fuente: Autores

7.4 Preparación del agua residual sintética

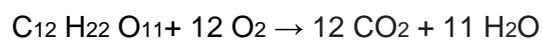
Para hacer el agua residual sintética se procedió a realizar los siguientes cálculos:

Densidad de la melaza: 1000 g/l

Contenido de azúcar 75%

1 g melaza contiene 0,75 g de azúcares

Oxidación de la melaza



$$\frac{12 \text{ molO}_2 * \frac{32 \text{ gO}_2}{1 \text{ molO}_2}}{1 \text{ molsacarosa} * \frac{342 \text{ g sacarosa}}{\text{molsacarosa}}} \equiv \frac{1.12 \text{ gO}_2}{\text{gsacarosa}} = \frac{1.12 \text{ g}}{\text{gsacarosa}} = \frac{1.12 \text{ mgO}_2}{\text{mgsacarosa}}$$

Entonces para 1 g melaza por litro

$$\frac{1 \text{ gmelaza}}{\text{l}} * \frac{0.75 \text{ gsacarosa}}{\text{gmelaza}} * \frac{1000 \text{ mgsacarosa}}{\text{gsacarosa}} * \frac{1.12 \text{ mgO}_2}{\text{mgsacarosa}} = \frac{840 \text{ mgO}_2}{\text{l}}$$

Para 300 mg O₂

$$300 \text{ mgO}_2 * \frac{1000 \text{ mgmelaza}}{840 \text{ mgO}_2} = 357 \text{ mgmelaza}$$

Se calcularon las cantidades de los compuestos adicionales a la melaza para crear el agua residual sintética con una DQO de 300 mg/l para un volumen de 12 l.

Cloruro de amonio (NH₄Cl)

$$\frac{0.5 \text{ g NH}_4\text{Cl} * 0.357 \text{ gmelaza}}{2.72 \text{ gmelaza}} = 0.065 \text{ gNH}_4\text{Cl} * 12 \text{ l} = 0.78 \text{ g NH}_4\text{Cl}$$

Fosfato mono potásico (KH₂PO₄)

$$\frac{0.25 \text{ g KH}_2\text{PO}_4 * 0.357 \text{ gmelaza}}{2.72 \text{ gmelaza}} = 0.0328 \text{ gKH}_2\text{PO}_4 * 12 \text{ l} = 0.46 \text{ g KH}_2\text{PO}_4$$

Cloruro de magnesio(MgCl₂)

$$\frac{0.30 \text{ g MgCl}_2 * 0.357 \text{ gmelaza}}{2.72 \text{ gmelaza}} = 0.039 \text{ gMgCl}_2 * 12 \text{ l} = 0.47 \text{ g MgCl}_2$$

Sulfato de sodio (Na₂SO₄)

$$\frac{1.70 \text{ g Na}_2\text{SO}_4 * 0.357 \text{ gmelaza}}{2.72 \text{ gmelaza}} = 0.22 \text{ gNa}_2\text{SO}_4 * 12 \text{ l} = 2.64 \text{ g Na}_2\text{SO}_4$$

Después de haber obtenido las cantidades de cada compuesto incluyendo la melaza se procedió a mezclar los compuestos con agua potable, se agitó hasta que la mezcla fuera uniforme.

7.5 Muestreo y monitoreo

Se procedió a realizar la caracterización del agua residual antes del ingreso al humedal, se midieron los parámetros de pH, conductividad eléctrica, turbiedad, color aparente, sólidos sedimentables totales y DQO (Demanda química de oxígeno)

Con el fin de determinar en cual tiempo de retención hidráulico (TRH) tenemos mayor degradación de contaminantes se realizan tres experimentos que con diferentes tiempos de retención: 2, 3 y 4 días.

En cada uno de estos tiempos se midieron los parámetros al ingreso y a la salida del agua en el humedal, esto con el fin de realizar una evaluación de remoción de contaminantes que está realizando el humedal artificial.

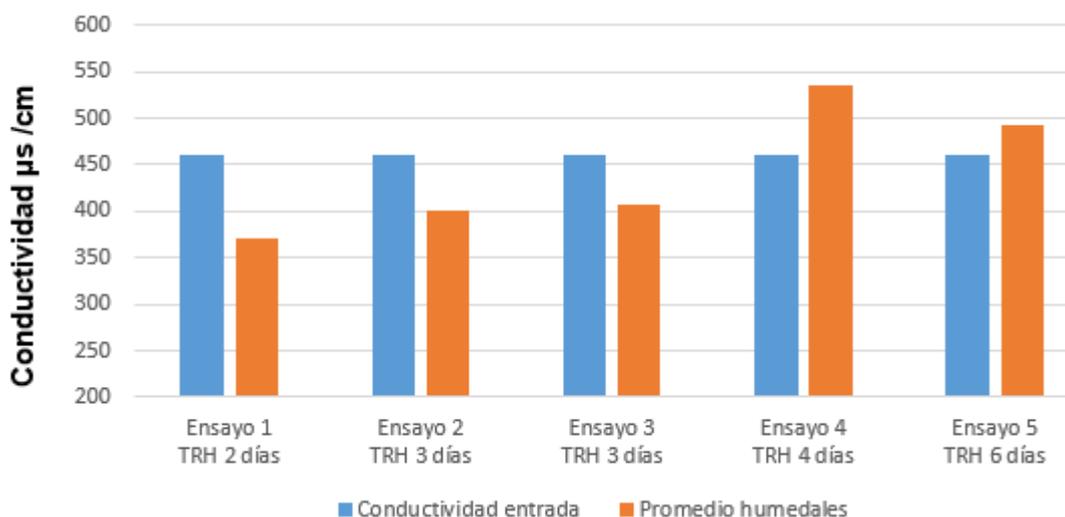
8.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Conductividad

En el gráfica 1 podemos ver la como a medida que se realizan los ensayos la conductividad aumentaba considerablemente en cada uno de los humedales la razón de ese aumento se debió a que el agua residual sintética contenía sales que al realizar intercambio catiónico con los minerales del humedal liberan nutrientes para las plantas que no eran captados en su totalidad.

Otra razón del aumento en la conductividad eléctrica en los dos últimos ensayos pudo ser la acumulación de sales en los humedales de ensayos anteriores que se incorporaron al agua, este ingreso de sales en el agua aumenta significativamente los valores de conductividad eléctrica.

Gráfica 1 *Cambio en la conductividad debido al humedal*



Nota: se muestran las comparaciones de los ensayos en los diferentes tiempos de retención

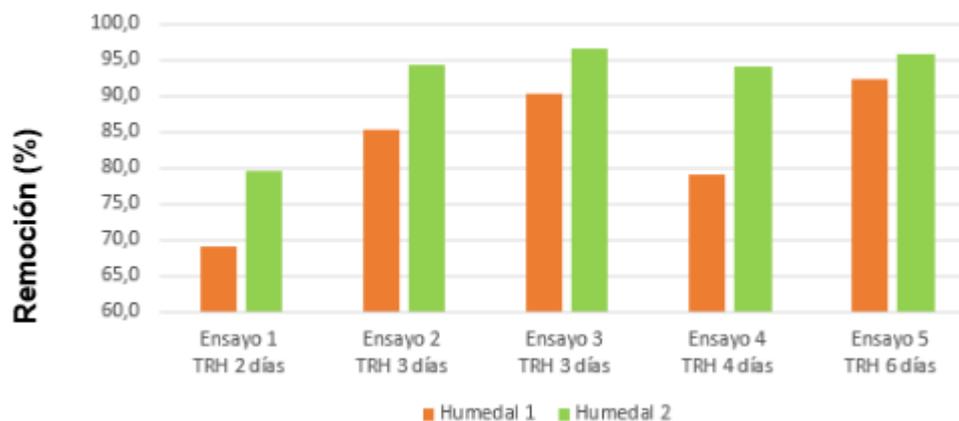
Fuente: Autores

8.2 Color

En la gráfica 2 podemos ver la alta capacidad que tuvieron los humedales para remover color aparente, esta remoción se debió a los medios filtrantes formados por los sustratos grava, antracita y arena que retiene el color del agua residual sintética. Otra explicación de la alta remoción del color aparente se dio por efecto de la incorporación del color en la estructura de las plantas presentes en el humedal.

Después de realizar una comparación entre los humedales, se destaca una mayor eficiencia de remoción del parámetro color aparente en el humedal número dos con eficiencias máximas que oscilan entre 90% y 95% después de cumplido el tiempo de retención hidráulico.

Grafica 2 Porcentaje de remoción de color



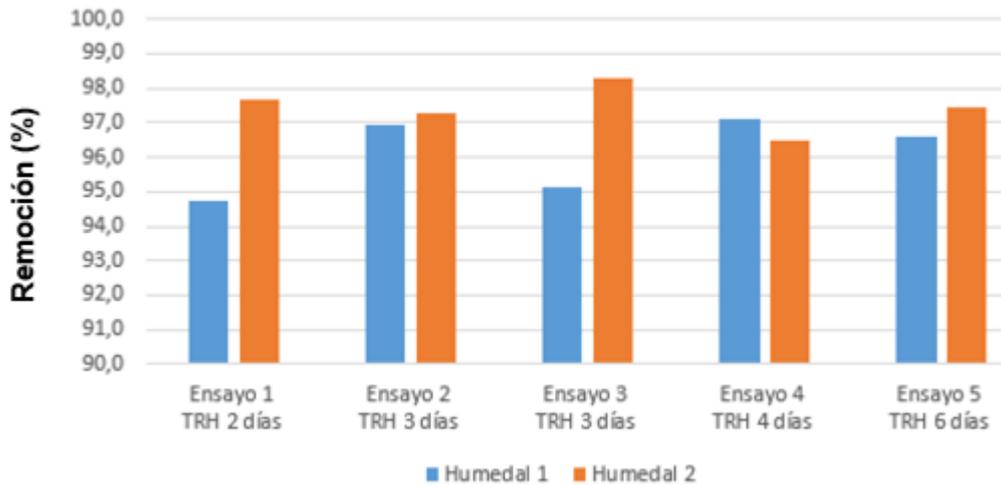
Nota: se muestran las comparaciones de los porcentajes de remoción del color en los diferentes tiempos de retención

Fuente: Autores

8.3 Turbidez

En la gráfica 3 se evidencia la capacidad que tienen los humedales para remover turbiedad, con porcentajes que van desde 94% hasta 97% esto debido a la estratificación del lecho filtrante compuesto de grava, antracita y arena que son sustratos con alta capacidad para retener partículas en suspensión las cuales dan origen a la turbidez del agua.

Gráfica 3 Porcentaje de remoción de turbiedad



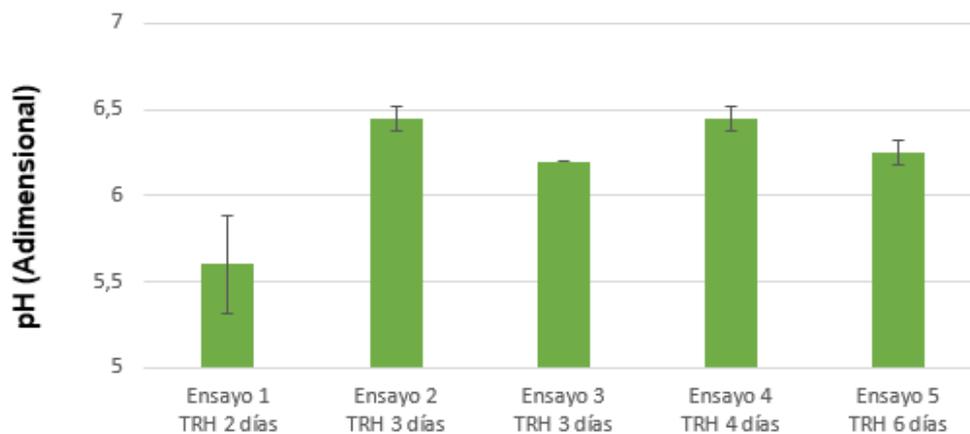
Nota: se muestran los porcentajes de remoción de turbiedad en los ensayos

Fuente: Autores

8.4 pH

En cuanto al parámetro de pH no se evidencia un aumento significativo con el transcurrir de los ensayos, por el contrario, después del primer ensayo el pH se empieza a equilibrar sin mostrar cambios drásticos. El agua tiene baja alcalinidad y el pH generalmente es de 4,5 a 6,5 que puedan generar perjuicio a las plantas.

Gráfica 4. pH del efluente de cada ensayo



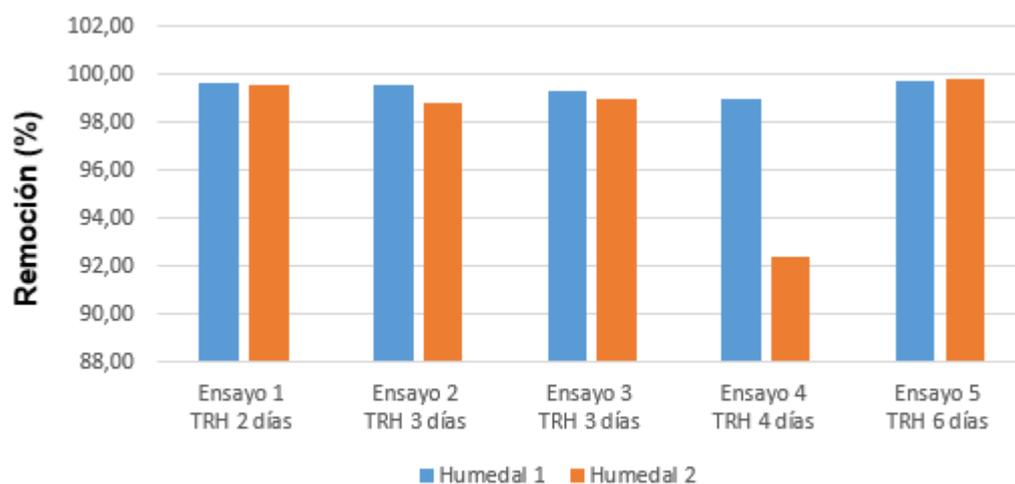
Nota: se muestran las comparaciones del comportamiento del pH en los ensayos

Fuente: Autores

8.5 Sólidos suspendidos totales,

En el gráfica 5 se muestra una alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales, para cada humedal la remoción está por encima del 90% lo que se ratifica la relación que existe entre la turbiedad y los sólidos suspendidos que son retenidos por el lecho filtrante permitiendo la separación de las partículas en suspensión de agua residual y que esta pueda ser utilizada para sistemas de riego en campos agrícolas.

Gráfica. 5 *Porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales*



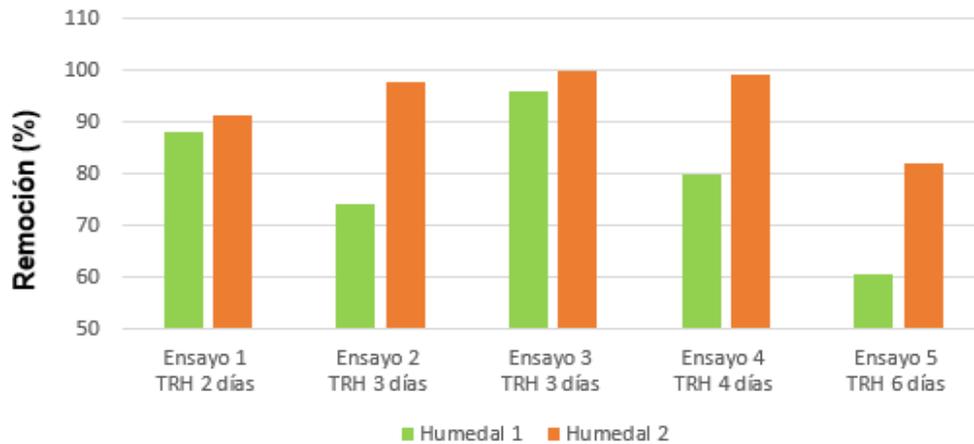
Nota: se muestran las comparaciones de los ensayos en los diferentes tiempos de retención

Fuente: Autores

8.6 DQO

La gráfica 6 permite evaluar el tiempo de retención hidráulico óptimo para la degradación de la DQO que es el parámetro de mayor importancia para el proyecto de investigación. Los ensayos arrojaron como resultado para cada uno de los humedales un TRH óptimo para degradar materia orgánica de 3 días donde se alcanzó un porcentaje de remoción entre el 99% y el 100% esto debido al proceso de adaptación de las plantas al humedal y la simbiosis entre los microorganismos, el sustrato y las plantas que aumentan la capacidad del humedal de remover DQO del agua residual.

Gráfica 6 Porcentaje de Remoción de DQO



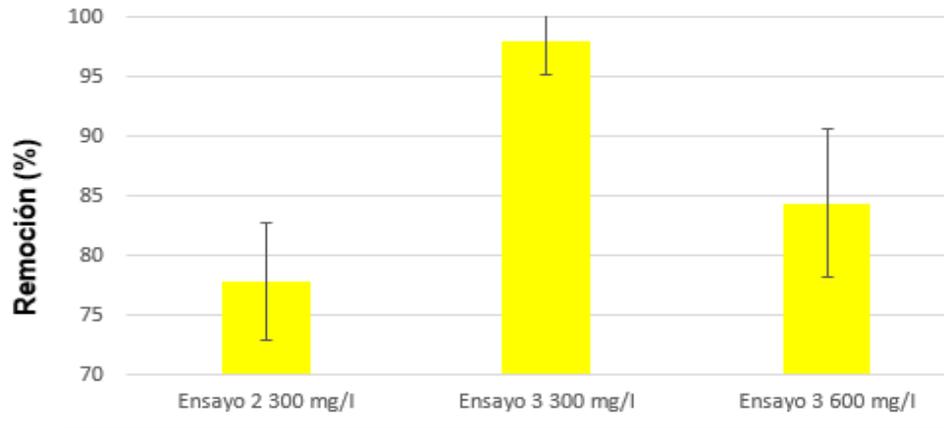
Nota: se muestran las comparaciones de los tiempos de retención ideales

Fuente: Autores

Después de escoger el TRH óptimo para la degradación de materia orgánica de 3 días se realizó un último ensayo en el cual se quería evaluar la versatilidad del humedal para remover una DQO más alta en el caso de 600 mg/l, la cual se compara con los tiempos de retención de 3 días donde ya se tenía un porcentaje alto de degradación de DQO.

La gráfica 7 muestra que los humedales artificiales tienen la capacidad de degradar materia orgánica para una DQO de 600 mg/l en un porcentaje del 84% lo que lo permite que el humedal degrade aguas residuales con una DQO que se encuentre en un rango entre 300 mg/l y 600 mg/l.

Gráfica. 7 Remoción de DQO (THR 3 días)



Nota: se muestran las comparaciones de remoción de DQO de 300 y 600 mg/l

Fuente: Autores

9.CONCLUSIONES

Se realizó el diseño del prototipo de los humedales teniendo en cuenta la caracterización del agua residual del municipio de Funza esto con el fin de preparar un agua residual sintética que se asemejara al efluente de la PTAR de Funza.

La construcción de los humedales se realizó con base al diseño planteado anteriormente y se utilizaron materiales de segundo uso que se encontraban disponibles en el laboratorio de ingeniería ambiental de la sede circunvalar de la Universidad Antonio Nariño, permitiendo que este prototipo de humedal pueda ser construido por poblaciones de bajos recursos dando alcance a la pertinencia social planteada dentro del proyecto.

Los humedales artificiales mostraron valores significativos de remoción en la mayoría de los parámetros evaluados, dando resultados de remoción que oscilan entre un 80 y 100% demostrando de esta manera que son una alternativa eficiente para la depuración de aguas residuales como sistema complementario a una PTAR y eventualmente podrían convertirse en un sistema secundario para la depuración de aguas residuales domésticas de municipios con bajo presupuesto para la construcción de sistemas de saneamiento básico.

El desarrollo de la investigación permitió encontrar el tiempo de retención(THR) ideal donde fuera más eficiente la remoción de DQO que fue el parámetro al cual se le dio una mayor relevancia debido a los problemas que puede generar en un agua residual con alta carga de DQO, los humedales mostraron que con este sistema se está cumpliendo la normatividad (Resolución 631 de 2015) que plantea que “este parámetro debe tener 200 mg/l como límite máximo permisible”

Después de encontrar el THR más eficiente para la degradación de DQO (3 días) se realizó un último ensayo con el fin de evaluar la versatilidad de los humedales al estar expuestos a una carga orgánica de 600 mg/l dando como resultado una eficiencia de remoción entre 80-

88% lo cual indica que los humedales tienen la capacidad de degradar aguas residuales con cargas orgánicas que superen de 2 a 3 veces el máximo permisible de la normatividad

10. RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto las plantas fueron afectadas por plagas (mosca blanca y pulgones) lo que hizo que las plantas se marchitarán y algunas de ellas murieran se recomienda encerrar los humedales con poli sombra o mallas sintéticas con el fin de prevenir el ingreso de plagas a los humedales.

Si se realizan experimentos con otros tipos de humedales y se mejoran los que ya han sido evaluados en el actual proyecto de investigación sería posible implementar un sistema de humedales que permitan el tratamiento de agua residuales de manera económica y ser utilizados como sistema de tratamiento secundario reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

11. BIBLIOGRAFÍA

Venegas,A. (2018 marzo 16). Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, *La república*.

<https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>

Manga, J. Logreira, Nury; Serralt, J. (9 de julio de 2001). Reuso de aguas residuales: un recurso hídrico disponible, *Redalyc.org*, volumen 1 (9). pág. 12-21

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85200902>

Navarrete, A. (2020) propuesta de mejora de procesos para la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas].

Archivo digital.

Jaramillo,M, Agudelo, R, Peñuela,G. (2016). Optimización del tratamiento de aguas residuales de un cultivo de flores utilizando un humedal artificial de flujo subterráneo horizontal. *Semantic Scholar*.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-wastewater-treatment-from-a-flower-Jaramillo-Gallego-Agudelo-Cadavid/e9377f2cc7b8e1e4f4a79cc147ab78ac110dfef1>

Muñoz,A. (Junio de 2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales* [Tesis de pregrado, Universidad autónoma del estado de Hidalgo]. Archivo digital.

<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/?sequence=1>

Llagas,W.Guadalupe,E. (15 de julio de 2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Volumen 15 (17).

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/699/552>

Romero Rojas, J. A. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015)" Resolución 631 de 2015-parametros y valores máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales.pdf.

Russo,N, Marzob,A, Randazzo,C, Caggia,C, Toscano,A, Cirelli,G.(28 de noviembre de 2018) constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants. *Science direct*. Vol.656.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.417>

Lutterbecka,C, Zerwesa,F, Radtkeb,J, Kohlerc,A, Kista,L, Machadoa,E.(22 de febrero de 2018) integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property- evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics. *Science direct*. Vol 155 pg. 1-8

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.004>

Forquet,N, Nivala,J, Muller,R, Escherfg,B, Afferden,M, Reemtsma,T, Schlichting,R, König,M. (12 de junio de 2021) removal of micropollutants and biological effects by conventional and intensified constructed wetlands treating municipal wastewater. *science direct*

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117349> Volume 201,

Martinez,P, Martinez,N, Medina,J, Almela,L. (28 de febrero de 2017) domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland: a case study in the so utheast of spain. *Science direct*. Vol 201.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117349>

Higuera,S. (2017) Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC de Yopal. *Universidad Nacional Abierta y a distancia*. vol 8

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1842>

Romero,M,Colín,A,Sanchez,S,Ortiz,L. (2009 enero) Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales. *Universidad Nacional Autonoma de Mexico. vol 25 (3) pág. 157-167* <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37012012004>

Romero Rojas, J. A. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería

12. ANEXOS

12.1 Anexo 1 *Datos de entrada del humedal 1 y 2*

Parametros de entrada	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6
	TRH 2 días	TRH 3 días	TRH 3 días	TRH 4 días	TRH 6 días	TRH 3 días
DQO (mg/l)	300	300	300	300	300	600
Solidos suspendidos	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
Conductividad (μ s)	460	460	460	460	460	
Turbiedad (FTU)	167	167	167	167	167	
Color (PCU)	39	74	104	162	49	
PH humedal 1	6,09	6,8	6,1	6,46	6,02	
PH humedal 2	5,43	6,7	6,04	6,51	6,23	

12.2 Anexo 2 *Datos de salida humedal 1*

Parametros de salida humedal 1	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 5
	TRH 2 días	TRH 3 días	TRH 3 días	TRH 4 días	TRH 6 días	TRH 6 días
DQO (mg/l)	36	77	12	60	118	120
PH	5,6	6,17	6,36	6,57	6,3	
Conductividad (μ s)	297	396	410	464	469	
Turbiedad (FTU)	8,83	5,07	8,1	4,86	5,7	
Color (PCU)	39	74	104	162	49	
Solidos suspendidos	0,0021	0,0026	0,0042	0,0058	0,0015	

12.3 *Datos de salida Humedal 2*

Parametros de salida humedal 2	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6
	TRH 2 días	TRH 3 días	TRH 3 días	TRH 4 días	TRH 6 días	TRH 3 días
DQO (mg/l)	26	7	0	2	54	67
PH	5,42	6,19	6,39	6,38	6,4	
Conductividad (μ s)	445	406	404	606	515	
Turbiedad (FTU)	3,92	4,56	2,9	5,91	4,3	
Color (PCU)	21	28	30	146	17	
Solidos suspendidos	0,002	0,007	0,006	0,045	0,001	