



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA EN
CONSTRUCCIONES**

**“Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la
primera etapa modificada del sistema francés”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

Autores:

**EDY FABRICIO CONTRERAS GUTIÉRREZ
KARINA PAOLA IÑIGUEZ CÁRDENAS**

Director:

MARÍA BELÉN ARÉVALO DURAZNO

CUENCA, ECUADOR

2023

DEDICATORIA

Principalmente a mi mamá Gladys, porque ha sido siempre mi mayor apoyo, sin ella no hubiese alcanzado este logro, ya q siempre ha sido mi fortaleza, ella siempre me ha apoyado a pesar de todos los malos momentos q he vivido en la universidad.

A mi papá Ely, a mis hermanos Jessenia y Andrés, quienes día a día de una u otra manera me han apoyado hasta el último momento en toda mi carrera.

A mi hija María Emilia mi mayor inspiración y a mi esposa Valeria, que a pesar de las largas noches y duros momentos hemos luchado y podido seguir adelante.

Fabricio Contreras Gutiérrez.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero agradecer a Dios por haberme dado la oportunidad de llegar hasta aquí y darme la capacidad para culminar mi carrera universitaria.

Agradezco infinitamente a mi mamá, a mi papá, a mis hermanos por haberme impulsado a alcanzar esta meta lograda, porque gracias al apoyo de todos ellos, todo fue posible.

Agradezco también a nuestra tutora de tesis quien con su gran capacidad nos ha apoyado con su tiempo en todo momento para guiarnos en nuestro proyecto

DEDICATORIA

A mi mamá Susana, quien ha sido mi fortaleza y mi apoyo a lo largo de todo este tiempo, quien con sus palabras supo guiarme e impulsarme, sin duda, sin ella nada de esto fuera posible.

A mis hermanas Carmen y Johanna y a mi hermano Daniel, quienes me enseñaron a luchar por mis metas a pesar de toda adversidad, quienes día a día estuvieron presentes en este proceso.

A mi esposo Andrés, mi compañero de luchas, quien me apoyó en este trayecto con amor y paciencia, quien en los momentos más difíciles estuvo ahí para fortalecerme.

A mi hija Martina quien fue mi motor, mi inspiración, por la que no me permití desmayar, sin duda este logro es por ella y para ella.

A mis sobrinos Jheicob, Josué, Jeremías y a mi sobrina Victoria que con su amor e inocencia me inspiraron a superarme, ellos que con sus abrazos y preguntas me llenaban de ánimo para continuar.

A mi cuñada Gabriela y mi cuñado Raúl que al ser parte de esta hermosa familia estuvieron de una u otra forma aportando para que esta meta se cumpla.

Las palabras quedan cortas para dedicarles a cada uno de ustedes este logro.

Karina Iñiguez Cárdenas.

AGRADECIMIENTO

Ante todo, quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta aquí, por darme la vida y la capacidad para lograr mis metas, gracias a él todo ha sido posible.

Agradezco a mi mamá por enseñarme a ser una mujer luchadora y estar conmigo en todo momento de mi vida, por darme su amor incondicional que me ha impulsado a seguir adelante.

A mis hermanas por darme su amor y cariño, por luchar junto a mi mamá para que pueda obtener este logro, sin ellas nada de esto hubiese sido posible, a toda mi familia que sin duda son las columnas que me mantuvieron firme en este proceso.

A mi esposo por soportar junto a mí todas las malas noches, los momentos de presión y aun así seguirme apoyando.

A nuestra tutora de tesis Ingeniera María Belén Arévalo Durazno por su tiempo y dedicación, por guiarnos con paciencia para poder elaborar este proyecto.

Karina Iñiguez Cárdenas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1. Humedales artificiales.....	4
1.1.2. Tipos de humedales artificiales.....	4
1.1.3. Humedales de flujo subsuperficial vertical “Sistema Francés”	6
1.2. Tipos de vegetación en los humedales.....	8
1.3. Características de las aguas residuales.....	10
1.4. Criterios de calidad de agua establecidos en la Norma Ecuatoriana (TULSMA)	12
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
2.1. Área de estudio.....	15
2.2. Descripción del humedal piloto de tratamiento	16
2.2. Funcionamiento de los humedales pilotos.....	21
2.3. Monitoreo.....	21

2.4. Procesamiento de datos	23
CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1. Análisis de resultados del agua de entrada y salida	24
3.2. Comparación de datos con la normativa vigente	30
3.3. Evaluación de la planta piloto	32
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de humedales artificiales según el flujo de agua.....	4
Figura 2: Esquema de un humedal de flujo superficial.	5
Figura 3: Esquema simplificado de humedal artificial (a) flujo horizontal, (b) flujo vertical.	5
Figura 4: Perfil de estratos del Sistema de Humedales estilo francés; arriba: primera etapa; abajo: segunda etapa.	7
Figura 5: PTAR de Ucubamba.....	15
Figura 6: Mapa de las plantas de tratamiento de aguas residuales.	16
Figura 7: Tanque de carga de 1000 l.....	17
Figura 8: Tanques de 200 litros, receptores del efluente.....	17
Figura 9: Humedales dispuestos en paralelo.....	18
Figura 10: Tuberías de distribución de las aguas residuales.....	19
Figura 11: Esquema de humedales pilotos.	19
Figura 12: Vegetación <i>Lolium perenne</i> adaptada en el humedal.	20
Figura 13: Concentración de ST en (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.....	24
Figura 14: Eficiencia de remoción de ST.....	25
Figura 15: Concentración de SST en (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.....	26
Figura 16: Eficiencia de remoción SST,	27
Figura 17: Concentraciones DBO, (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.	27
Figura 18: Eficiencia de remoción DBO.....	28
Figura 19: Concentraciones de DQO (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.....	29
Figura 20: Eficiencia de remoción DQO.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de especies más utilizadas en humedales para tratamiento de aguas residuales.	9
Tabla 2: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.....	13
Tabla 3: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.	14
Tabla 4: Características de <i>Lolium perenne</i>	20
Tabla 5: Datos para la toma de muestras.....	22
Tabla 6: Cantidad de muestras analizadas	23
Tabla 7: Promedios de concentraciones de ST, SST, DBO y DQO en el efluente.....	31
Tabla 8: Promedios de remoción para ST, SST, DBO y DQO en los humedales pilotos	33

“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE LA PRIMERA ETAPA MODIFICADA DEL SISTEMA FRANCÉS”

RESUMEN

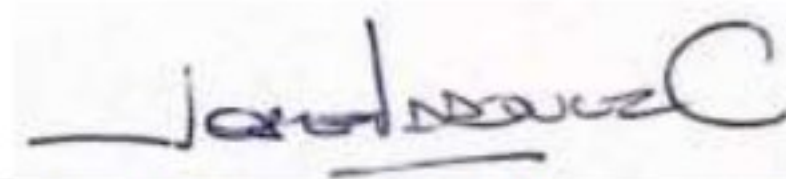
El presente trabajo corresponde al análisis y evaluación de un sistema de tratamiento de agua residual mediante la primera etapa del sistema francés modificado, aplicando cargas hidráulicas propias para un sistema de alcantarillado combinado. Durante el lapso de cuatro meses se realizó el proceso de toma de muestras de agua residual a la entrada y salida de los humedales de flujo subsuperficial vertical tipo francés.

El procesamiento de la información permitió calcular las eficiencias de remoción para los ST, SST, DBO₅ y DQO, a partir de las concentraciones de cada una de ellas tanto en el afluente como en el efluente. Se determinó que las concentraciones del efluente tratado cumplen con los límites de la normativa vigente para descarga a cuerpos hídricos.

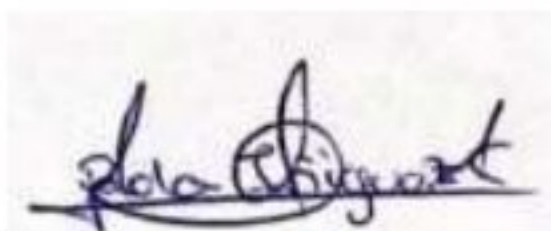
Palabras claves: agua residual, sistema francés, humedales.



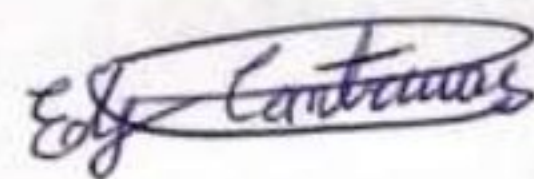
Ing. María Belén Arévalo Durazno
Directora del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vásquez Calero
Director de escuela



Karina Paola Iñiguez Cárdenas



Edy Fabricio Contreras Gutiérrez


Autores

**“DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT THROUGH THE FIRST
MODIFIED STAGE OF THE FRENCH SYSTEM”**

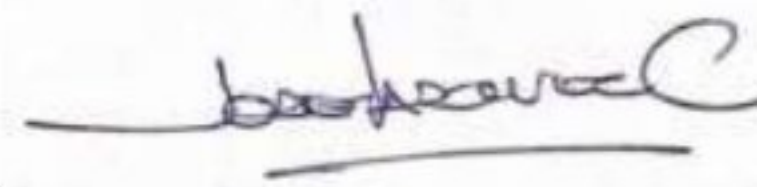
ABSTRACT

This study corresponds to the analysis and evaluation of a wastewater treatment system through the modified first stage of the French system, applying hydraulic loads for a combined sewerage system. During a period of four months, wastewater samples were taken at the inlet and outlet of the French-type vertical subsurface flow wetlands. The processing of the information allowed us to calculate the removal efficiencies for ST, TSS, BOD and COD, based on their concentrations both in the influent and effluent. It could be determined that the effluent concentrations complied with the limits of the current regulations for discharge into fresh water bodies.

Keywords: wastewater, French system, wetlands.

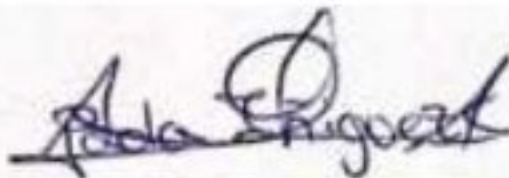


Ing. María Belén Arévalo Durazno
Thesis Director

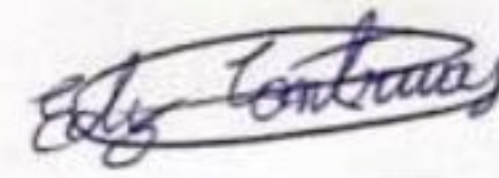


Ing. José Fernando Vásquez Calero
Faculty Director

Translated by:



Karina Paola Iñiguez Cárdenas



Edy Fabricio Contreras Gutiérrez

Authors

“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE LA PRIMERA ETAPA MODIFICADA DEL SISTEMA FRANCÉS”

INTRODUCCIÓN

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables (Isaza, 2005). Solo un 22 % de la población de América Latina y el Caribe tiene acceso a los servicios de saneamiento, situación que se agrava en el medio rural (Navarro-Frómeta et al., 2020).

Hace aproximadamente más de cuarenta años, en determinadas zonas de Europa se han usado los sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Actualmente estos sistemas de humedales se están aplicando de forma creciente en todo el mundo para tratar aguas residuales de diferentes tipos, entre ellas las aguas residuales domésticas, industriales, drenajes ácidos de minas, desechos agrícolas y ganaderos, lixiviados de rellenos sanitarios, así como la degradación de compuestos orgánicos persistentes (Alarcón et al., 2018, p. 14).

Normalmente en las comunidades rurales las aguas residuales tienen un tratamiento primario (fosas sépticas), después de realizar este tratamiento se presenta un problema para tratar los lodos de las fosas, por esta razón es necesario investigar un sistema que sea capaz de tratar agua y lodos conjuntamente. En Francia, alrededor de 1990 se creó un tratamiento especial de flujo vertical con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HHAA FS) para aguas residuales crudas llamado "Sistema Francés" (Hoffmann et al., 2011), los cuales están diseñados para tratar agua y lodos al mismo tiempo, disminuyendo costos de operación y mantenimiento.

En la ciudad de Cuenca, el 90% de las aguas residuales de la zona urbana son tratadas en la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Ucubamba, en las zonas rurales

existen 32 plantas pequeñas, de las cuales pocas siguen en funcionamiento, si bien en algunas de estas plantas se usan humedales artificiales, estos son solamente para un tratamiento secundario de los efluentes, mas no ha sido un sistema implementado para tratar directamente las aguas residuales crudas.

Ya que la zona urbana cuenta con una PTAR efectiva para el tratamiento de las aguas, la problemática se enfoca en las zonas rurales, en donde se busca implementar humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical estilo francés, para sustituir a las plantas existentes en estas zonas, debido a que este sistema tiene bajos costos de operación y mantenimiento, lo cual presenta una ventaja para los gobiernos descentralizados los cuales cuentan con bajos presupuestos en su administración.

La finalidad de este estudio es conocer las eficiencias de la primera etapa modificada del sistema francés, mediante la determinación de porcentajes de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales provenientes de un alcantarillado combinado, como son los Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Totales (ST), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), para lo cual se realizó toma de muestras puntuales en campo, tanto del afluente como del efluente, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de la PTAR de Ucubamba.

También, se evaluó el sistema realizando la comparación de los resultados obtenidos en laboratorio, con los límites de descarga a cuerpos de agua dulce establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

Objetivos

Objetivo General

Analizar y evaluar la primera etapa modificada del sistema francés para tratamiento de aguas residuales provenientes de un alcantarillado combinado.

Objetivos Específicos

1. Recopilar información basada en el estado del arte.
2. Monitorear el agua residual a la entrada y salida de los humedales piloto.
3. Análisis de resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

1.1. Humedales artificiales

Los Humedales Artificiales, también conocidos como humedales construidos o humedales de tratamiento (HT), son sistemas utilizados para el tratamiento de aguas residuales, diseñados para separar los contaminantes del agua residual y llevar a cabo el manejo y disposición de residuos de forma adecuada. Son estanques pocos profundos con especies de plantas emergentes, que optimizan el proceso, aprovechando las interacciones con los microorganismos y la atmósfera.

1.1.2. Tipos de humedales artificiales

En la figura 1 se puede observar un esquema de clasificación de los tipos de humedales artificiales según el flujo de agua:

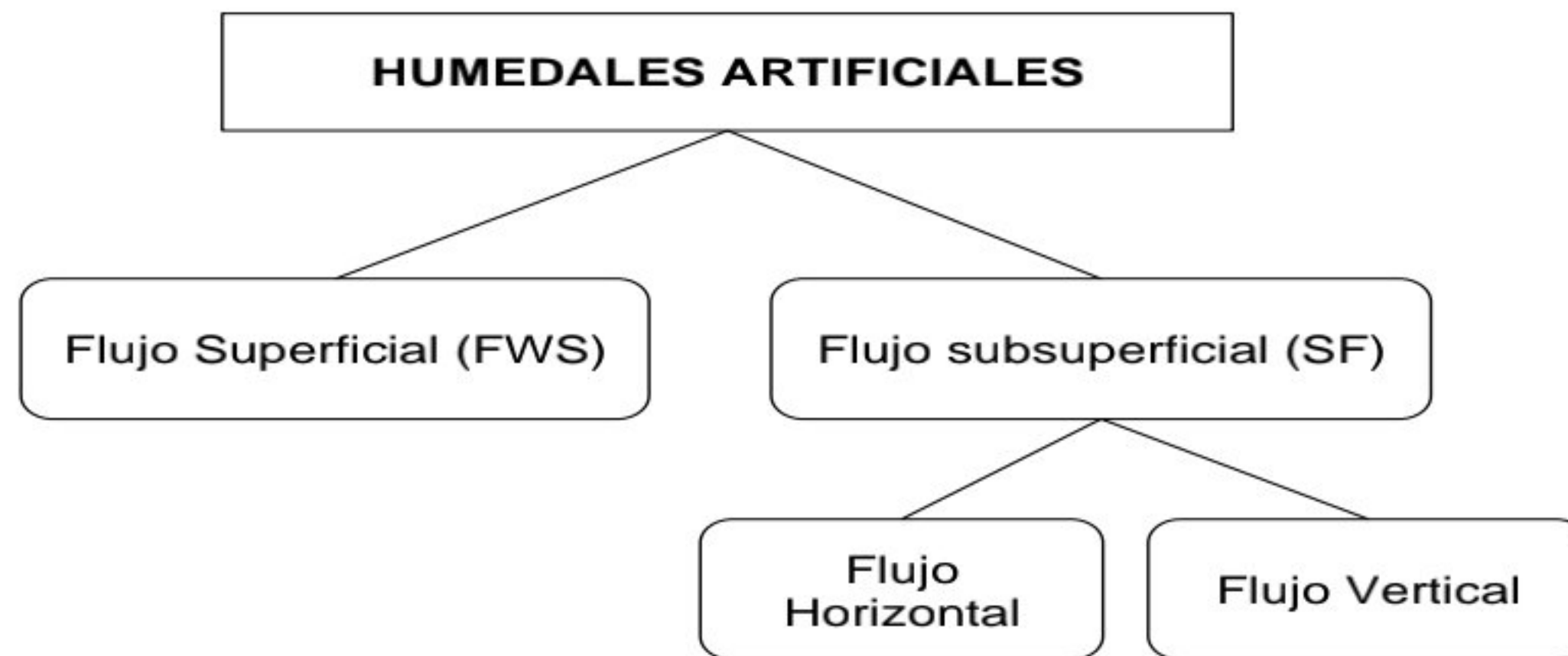


Figura 1: Clasificación de humedales artificiales según el flujo de agua.

Fuente: Elaboración propia

- **Humedales de flujo superficial:** en el cual el agua fluye lentamente sobre la superficie del suelo con vegetación. Los tallos, hojas y raíces proporcionan el oxígeno al humedal (Silva & Zamora, 2005). Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales, la figura 2 muestra un esquema de un humedal de flujo superficial. A diferencia de las lagunas de tratamiento convencionales, los

humedales construidos tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas (Delgadillo et al., 2010).

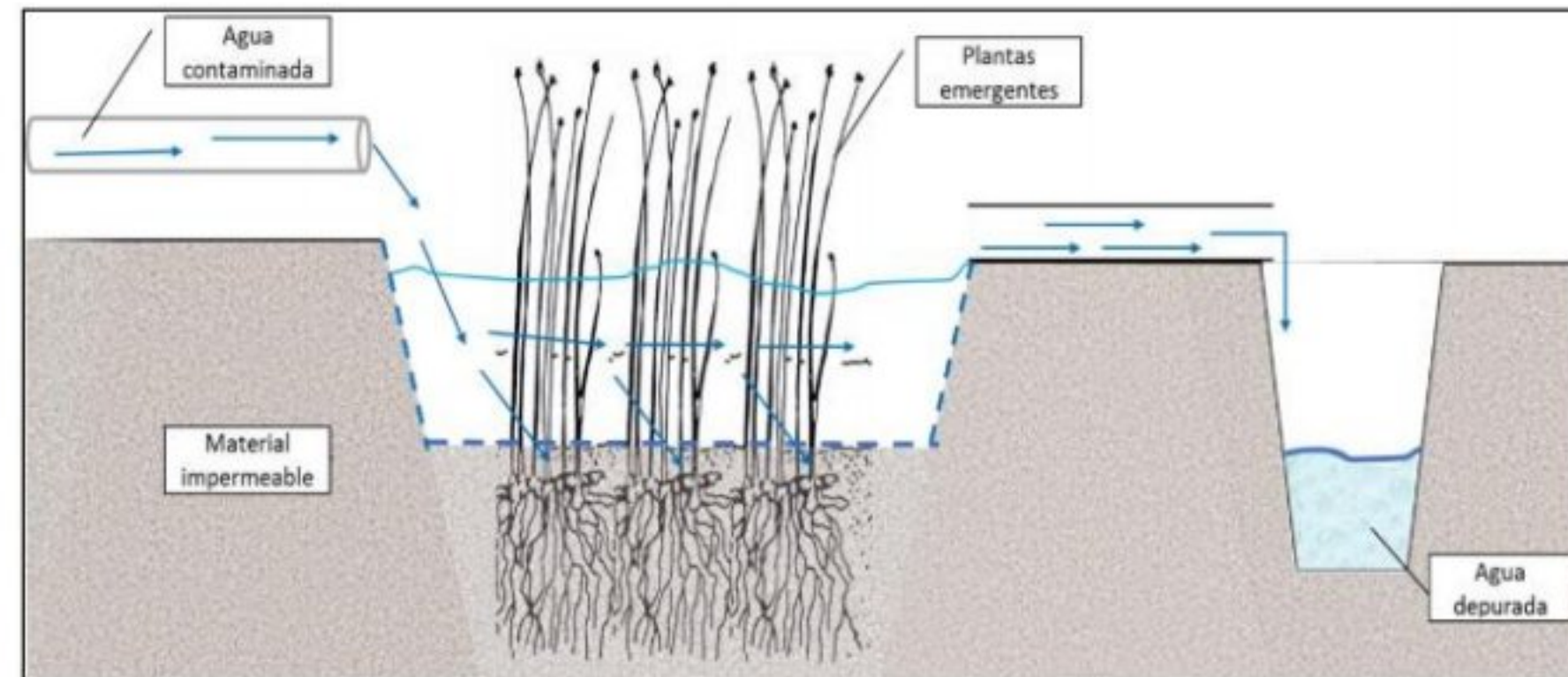


Figura 2: Esquema de un humedal de flujo superficial.

Fuente: (Alarcón Herrera et al., 2018, 20)

- **Humedales de flujo subsuperficial:** la circulación del agua se realiza a través de un medio granular, con una profundidad que depende de la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las plantas (Comisión Nacional del Agua, 2015).

Generalmente se construyen en forma de canal. Dependiendo de la dirección de la trayectoria del flujo, se puede subdividir en horizontal (figura 3a) o flujo vertical (figura 3b) (Alexandro Stefanakis, 2014).

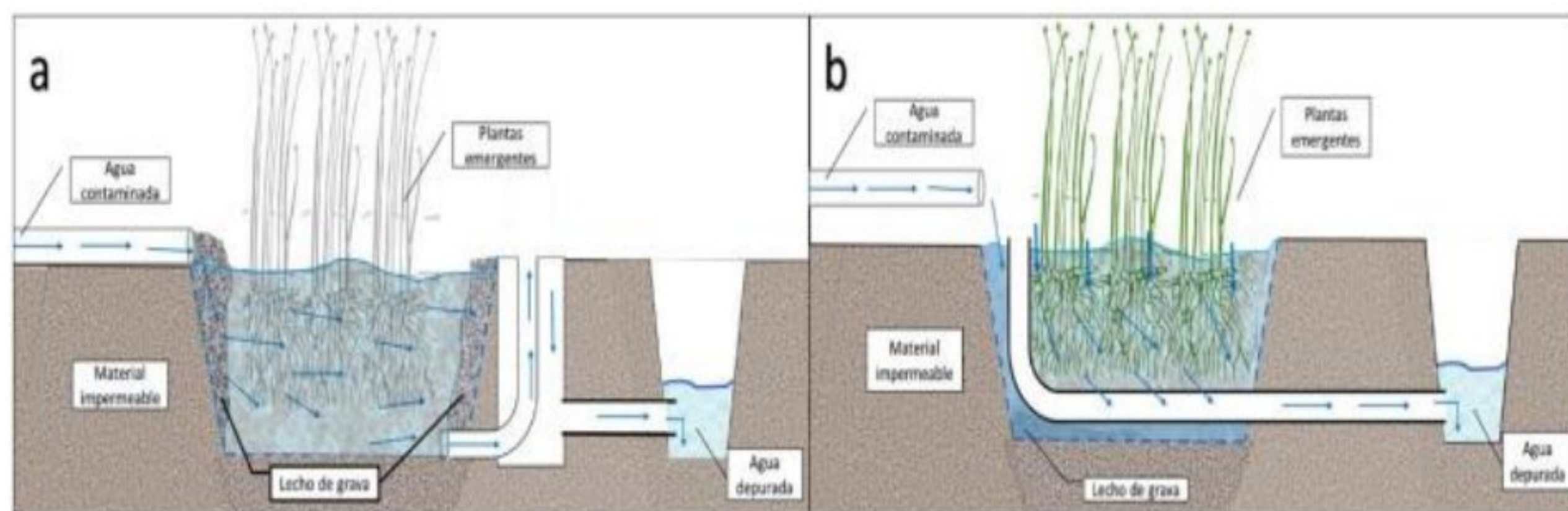


Figura 3: Esquema simplificado de humedal artificial (a) flujo horizontal, (b) flujo vertical.

Fuente: (Alarcón Herrera et al., 2018, 20)

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas que forman parte del humedal en donde la materia orgánica se descompone biológicamente dándose el proceso de desnitrificación, el agua ingresa continua y uniformemente. A diferencia de los humedales artificiales de flujo horizontal, los humedales artificiales de flujo vertical son cargados intermitentemente.

De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando así el suministro de oxígeno. Las aguas pasan verticalmente a través de un sustrato (arenas, gravas) y se reúnen en una red de drenaje situada al fondo del humedal. La descarga de agua se realiza intermitentemente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. El sustrato está formado por varias capas, las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava en la parte inferior (Comisión Nacional del Agua, 2015, p.2).

Dentro de los humedales artificiales de flujo vertical podemos encontrar humedales especiales que fueron creados en Francia alrededor de 1990, los mismos que fueron diseñados para un tratamiento de aguas residuales crudas. Este sistema se conoce como “sistema francés o tipo francés”.

1.1.3. Humedales de flujo subsuperficial vertical “Sistema Francés”

A pesar de existir diferentes tipos de humedales construidos, los de flujo vertical tipo francés, son interesantes por su capacidad de tratar aguas crudas sin una sedimentación primaria, Además, la reutilización del agua puede convertirse en una fuente de agua para otros usos (Navarro-Frómeta et al., 2020).

Otra ventaja del sistema es que no genera lodos, no libera biogás y los costos de su mantenimiento son bajos.

1.1.3.1. Etapas de tratamiento

Según Dotro et al. (2017) los humedales artificiales tipo francés están compuestos de dos etapas. En la primera etapa se da el tratamiento de lodos, la eliminación parcial de materia orgánica y se produce la nitrificación. Consiste de un humedal artificial de flujo

subsuperficial vertical lleno de grava y está diseñado para el pretratamiento de aguas residuales sin tratar (Hoffmann et al., 2011). En la segunda etapa se lleva a cabo la eliminación final de materia orgánica y se produce la nitrificación.

Los filtros en la primera etapa y la segunda etapa usan diferentes medios y tienen diferentes dimensiones para proveer de condiciones adecuadas al tratamiento bajo las cargas de diseño (Figura 4). Para garantizar las condiciones aeróbicas en el filtro de la primera etapa, la capa principal está compuesta por grava de 2 a 6 mm. Un tamaño de grano más pequeño conduciría a obstrucción y un tamaño de grano más grueso dificultaría la formación del depósito orgánico, debajo de la capa del filtro principal, una capa intermedia de grava de 5 a 15 mm evita que las partículas más finas se laven en la capa de drenaje (reduciendo así la porosidad efectiva de la capa de drenaje). Tratada el agua se recoge en tuberías de drenaje en la capa final, que consiste en grava gruesa de 20 a 60 mm en el fondo del lecho. Los filtros están aislados del terreno circundante mediante una combinación de un revestimiento de plástico y una membrana geotextil.

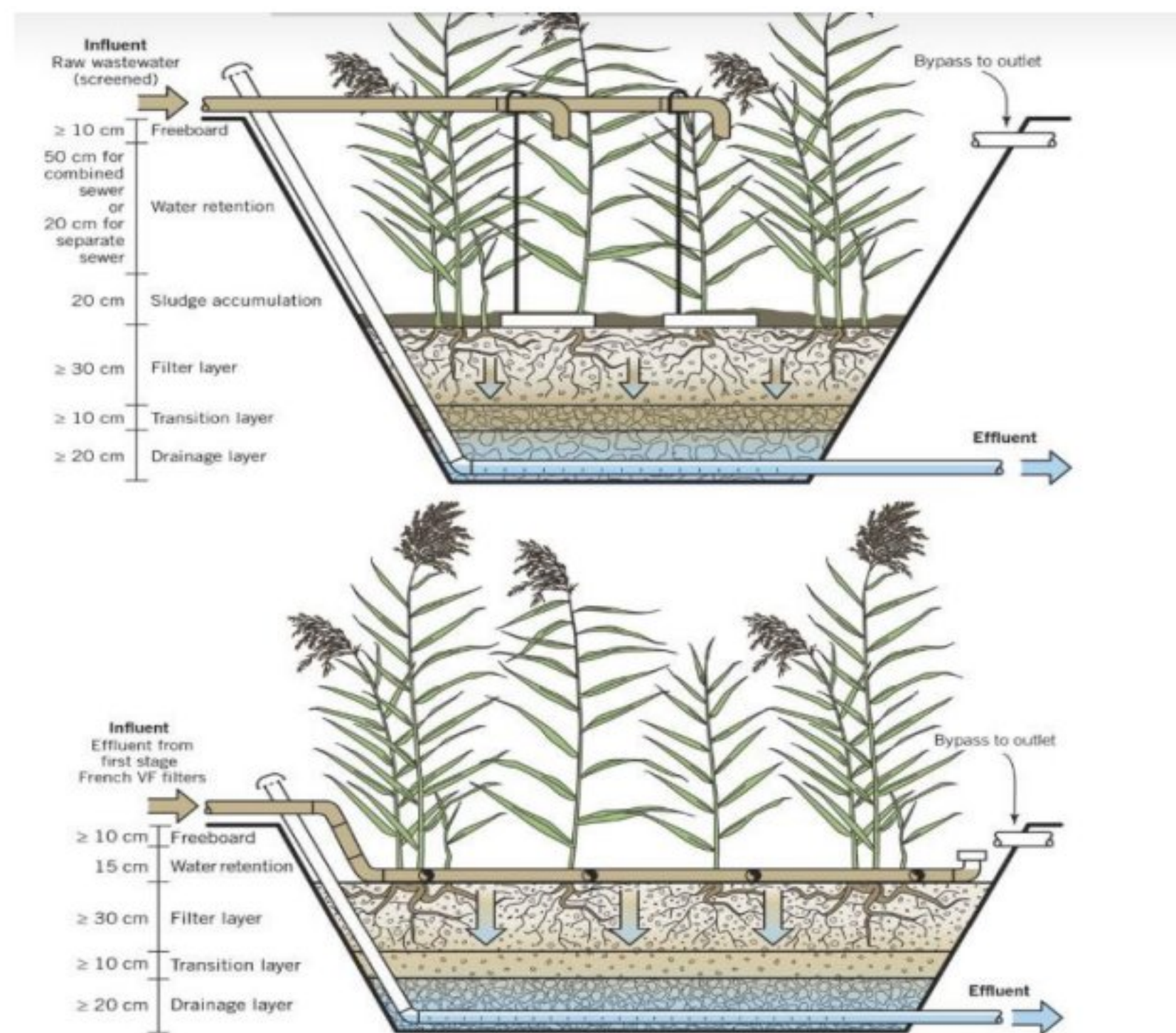


Figura 4: Perfil de estratos del Sistema de Humedales estilo francés; arriba: primera etapa; abajo: segunda etapa.

Fuente: (Dotro et al., 2017, 90)

1.1.3.2. Rendimiento del Sistema Francés

En el estudio realizado por Morvannou (2015), se evaluaron 51 plantas y 252 muestras compuestas de aguas residuales, de las cuales se obtuvieron porcentajes de remoción satisfactorios para SST y DQO, 91% y 80% respectivamente.

Según Paing (2015), los resultados de 169 sistemas operativos estudiados en Francia, confirman que los Humedales Construidos estilo Francés de Flujo Vertical alcanzan concentraciones bajas de SST, DBO y DQO en el efluente, independientemente del clima o temperatura en la que operan. En este estudio se tiene porcentajes de remoción para SST (85%), DBO (86%) y DQO (80%).

En otro estudio se evalúa el desempeño de los humedales tipo Francés en la región del Tarn en Francia, con un clima oceánico templado, en el que se obtiene eficiencias de remoción del: 98% para DBO, 93% para DQO y 96% para SST (Navarro-Frómata et al, 2020).

1.2. Tipos de vegetación en los humedales

En los humedales naturales crecen diferentes especies vegetales que se denominan macrófitas, la presencia de estas plantas es indispensable para el correcto funcionamiento de los humedales construidos. Existen diversidades de especies vegetales que se pueden usar en los humedales construidos y según la Comisión Nacional del Agua (2015) dependiendo del lugar donde se desarrollan se clasifican en:

- Flotantes: son especies vegetales que viven en la superficie del agua.
- Sumergidas: se desarrollan exclusivamente dentro del agua.
- Emergentes: fijan sus raíces al fondo, pero crecen lo suficiente para que sus hojas aprovechen la luz fuera del agua, conducen oxígeno desde la atmósfera a través de sus hojas y tallos hasta las raíces, la profundidad de las raíces de estas plantas está entre 0.5 m 1.5 m.

Las especies de plantas que más se usan en los humedales artificiales según Tigüero (2004) son: carrizo (*Phragmites australis*) en Europa, juncos (*Scirpus lacustris*) y espadaña (*Typha latifolia*) en Estados Unidos. En Europa se prefiere utilizar carrizo ya que es una planta fuerte, crece rápidamente y no es fuente de alimento para animales o pájaros.

De acuerdo a Lara Borrero (1999), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toma el carbono, nutrientes y elementos, y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- Oxigena espacios dentro del sustrato.

En la tabla 1 se muestran las características de tres especies más utilizadas en los humedales artificiales:

Tabla 1: Características de especies más utilizadas en humedales para tratamiento de aguas residuales.

Nombre científico	Familia	Nombre común	Penetración de raíces en grava
<i>Typha spp</i>	Tifácea	Espadaña, enea, anea, junco, bayón, bayunco, bohordo, henea, junco de la pasión, maza de agua	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial
<i>Scirpus spp</i>	Ciperácea	Totora	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial
<i>Phragmites spp</i>	Gramínea	Carrizo	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial

Fuente: Elaboración propia, basado (Jaime Andrés Lara Borrero, 1999)

1.3. Características de las aguas residuales

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Ramalho, 1996).

- **Temperatura:** la temperatura influye en la biodegradabilidad de la materia orgánica, ya que contribuye con los procesos químicos y biológicos. Temperaturas altas contribuyen a la reducción de oxígeno disuelto (OD) en el agua, lo que provoca disminución de la tasa de crecimiento bacterial y el crecimiento de otras especies como peces, crustáceos, etc (Carreño, 2016).
- **Color:** el color de las aguas residuales se debe principalmente a las partículas que contiene; se denomina color aparente al que se observa por la presencia de los sólidos suspendidos, y color verdadero al producido por las sustancias coloidales y disueltas (Carreño, 2016).
- **Olor:** la liberación de gases producidos por la descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica da como resultado olores fuertes, los gases liberados corresponden principalmente a la presencia de ácido sulfhídrico, amoníaco, acético, etc (Carreño, 2016).
- **Sólidos:** se hallan representados por las partículas visibles y coloidales que se encuentra en la masa de agua y conformados principalmente por materia orgánica (Carreño, 2016).
- **Sólidos Totales:** es la materia que se obtiene como residuo luego de que se ha sometido al agua a un proceso de evaporación, a temperaturas entre 103°C y 105°C por un tiempo de 24 horas. (Carreño, 2016) clasifica a los sólidos totales en:
 - 1) **Sólidos sedimentables:** son aquellos que después de dejar reposar 1 lt de agua durante una hora, se sedimentan en el cono Imhoff. Son fáciles de eliminar mediante procesos físicos y constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodos que se obtendrá en la sedimentación primaria.

- 2) Sólidos volátiles totales: son aquellos que se volatizan después de calcinar los ST a 500 °C.
 - 3) Sólidos fijos totales (SFT): son los residuos que permanecen después de incinerar los ST a 500 °C.
 - 4) Sólidos suspendidos totales o no filtrables (SST): son aquellos que quedan después de filtrar el agua a través de un filtro de fibra de vidrio de 1,2 µm. La turbidez del agua es causada por gran variedad de sólidos suspendidos.
 - 5) Sólidos suspendidos volátiles o filtrables (SSV): son aquellos que se volatilizan después de incinerar los SFT A 500 °C.
 - 6) Sólidos suspendidos fijos: es el residuo remanente después de calcinar los SST a 500 °C, está conformado por material inerte.
 - 7) Sólidos disueltos totales (SDT): son sólidos que pasan a través del filtro de 2 µm o menos y luego son evaporados y secados a una temperatura específica.
 - 8) Sólidos disueltos volátiles (SDV): son sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SDT son calcinados a 500 °C, están formados por materia orgánica.
 - 9) Sólidos disueltos fijos (SDF): es el residuo remanente después de calcinar los SDT a 500 °C.
- pH (Potencial de hidrógeno): se define como el grado de alcalinidad o acidez que posee el agua y que depende de la concentración de iones de hidrógeno presentes. Matemáticamente se define como: el logaritmo negativo de las concentraciones de iones de hidrógeno ($pH = -\log (H^+)$) (Carreño, 2016).
 - OD (Oxígeno disuelto): permite la respiración de las bacterias aeróbicas, así como de todos los organismos presentes en el ecosistema acuático, algunos organismos pueden servir como indicadores de la concentración de OD en las aguas residuales (Carreño, 2016).
 - DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno): cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias aerobias y anaerobias, hongos y

plancton consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en el agua residual. La determinación del valor de DBO es un proceso biológico y por lo tanto es delicado y requiere mucho tiempo, como el proceso de descomposición depende de la temperatura, se realiza a 20°C durante 5 días de manera estándar, denominándose DBO5. Con carácter general, cuanta más contaminación, más DBO (Induanalisis, 2020).

- DQO (Demanda Química de Oxígeno): Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua. La DQO es una prueba que solo toma alrededor de tres horas, por lo que los resultados se pueden tener en mucho menor tiempo que lo que requiere una prueba de DBO (Induanalisis, 2020).

La diferencia principal entre la DBO y la DQO es que la segunda engloba la primera, e incluye más cosas. En la DBO sólo se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que es biodegradable, mientras que en la DQO se busca la oxidación completa de la muestra, de manera que todo el material orgánico, biodegradable y no biodegradable, es químicamente oxidado. Para una muestra dada de agua, el valor de DQO siempre ha de ser mayor que el de DBO (Induanalisis, 2020).

1.4. Criterios de calidad de agua establecidos en la Norma Ecuatoriana (TULSMA)

En la Reforma al Texto Unificado de Legislación secundaria del Ministerio del Medio Ambiente (2015) se define al Agua Residual Doméstica como: una mezcla de desechos líquidos de uso doméstico evacuados de residencias, locales públicos, educacionales, comerciales e industriales.

En Ecuador rige una Norma de calidad Ambiental: Texto Unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente (TULSMA). Tanto las aguas que se descargan en los sistemas de alcantarillado como las aguas que son sometidas a un tratamiento deben cumplir con los límites físicos y químicos establecidos en la misma, la cual establece

critérios de calidad de aguas para diferentes usos y criterios generales para la descarga de efluentes.

En la Tabla 2 se observa los límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Tabla 2: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Límites de descarga al sistema de alcantarillado público			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	250
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	500
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	220
Sólidos Totales	ST	mg/l	1600

Fuente: Elaboración propia, basado en la norma TULSMA

En condiciones especiales de ausencia de estudios del cuerpo receptor, falta de definición de usos del agua, se utilizarán los valores de la tabla 3, limitaciones a las descargas a cuerpos de agua dulce:

Tabla 3: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos Totales	ST	mg/l	1600

Fuente: Elaboración propia, basado en la norma TULSMA

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Los humedales pilotos construidos analizados están situados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ucubamba (Figura 5), operada por la empresa ETAPA EP (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca), ubicada en la ciudad de Cuenca en la Panamericana Norte Km $7\frac{1}{2}$, en la zona sur del Ecuador, a una altura de 2500 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 14°C.



Figura 5: PTAR de Ucubamba.

Fuente: ETAPA EP (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca).

Las aguas residuales que llegan a la PTAR provienen de un alcantarillado combinado (aguas residuales y aguas lluvias). La PTAR de Ucubamba tiene un área aproximada de 45 Ha y trata el 90% de las aguas residuales de la ciudad, el resto es tratado por otras plantas existentes en las zonas rurales de la ciudad de Cuenca, la figura 6 muestra un mapa de ubicaciones de las diferentes plantas existentes.



Figura 6: Mapa de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: ETAPA EP (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca).

2.2. Descripción del humedal piloto de tratamiento

El agua residual que llega a los pilotos pasa primero por la reja de gruesos y el desarenador 12 de la PTAR Ucubamba, luego fluye al tanque de carga. Este tanque distribuye el agua residual a los dos humedales pilotos mediante una bomba sumergible.

Los humedales pilotos, que comprenden la primera etapa modificada del Sistema Francés, están conformados por 3 tanques de polietileno, que cumplen diferentes funciones:

- Un tanque de almacenamiento de capacidad de 1000 litros, el cual distribuye el agua residual a los dos humedales pilotos mediante una bomba sumergible (figura 7).



Figura 7: Tanque de carga de 1000 l.

Fuente: Elaboración propia

- Dos tanques de descarga de capacidad 200 litros, los cuales reciben el agua tratada de cada humedal (efluente) y al mismo tiempo evacuan el agua tratada (figura 8).

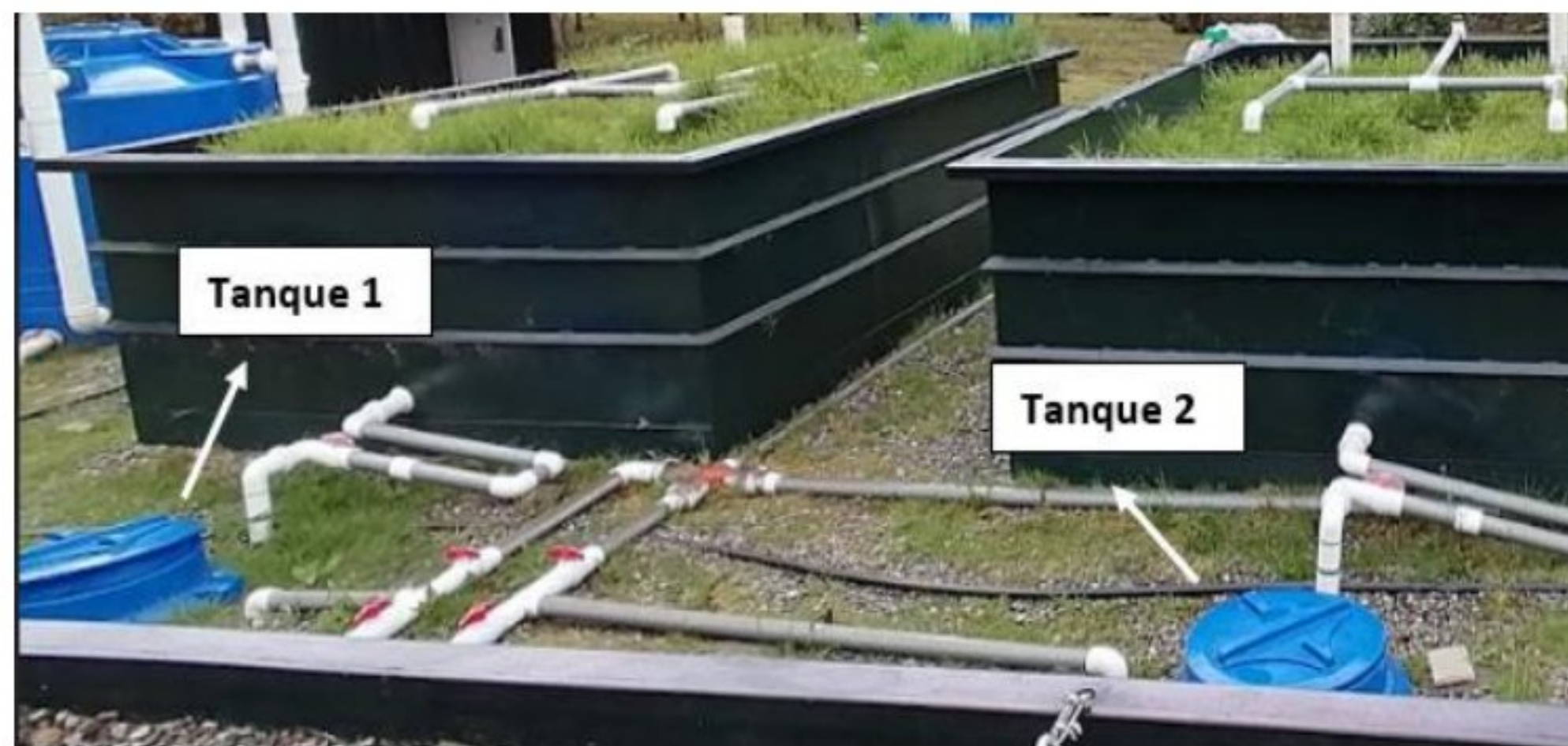


Figura 8: Tanques de 200 litros, receptores del efluente.

Fuente: Elaboración propia

- Tres humedales dispuestos en paralelo, un humedal para el tratamiento de lodos (humedal 3) y dos para el tratamiento de aguas residuales (humedal 1 y 2),

debido a que los humedales necesitan un tiempo de reposo para tratar adecuadamente las aguas residuales (figura 9). Para el presente estudio evaluaremos los humedales 1 y 2.



Figura 9: Humedales dispuestos en paralelo.

Fuente: Elaboración propia

Los humedales están contruidos por planchas de acero ASTM A36 con un mínimo de espesor de 3mm, diseñados para soportar una carga mínima de 2 toneladas por metro cuadrado. La forma geométrica de cada humedal es rectangular, con una profundidad de 0,70m y un área superficial del filtro de $9.81 m^2$.

Los pilotos de esta primera etapa cuentan con tres capas de grava de diferentes diámetros, desde la más fina en la superficie hasta la más gruesa en el fondo:

- Capa superior con espesor de 30 cm, con grava pequeña de diámetro de 2 a 6 mm.
- Capa intermedia con espesor de 15 cm, con grava mediana de diámetro de 5 a 15 mm.
- Capa de fondo con espesor de 20 cm, con grava grande de diámetro de 20 a 60 mm.

Las tuberías y los accesorios del sistema son de material PVC de 50 mm, para la descarga del afluente al humedal las tuberías deben asegurar una distribución uniforme de las aguas residuales (Figura 10).



Figura 10: Tuberías de distribución de las aguas residuales.

Fuente: Elaboración propia

La figura 11 muestra un esquema generalizado de los humedales pilotos.

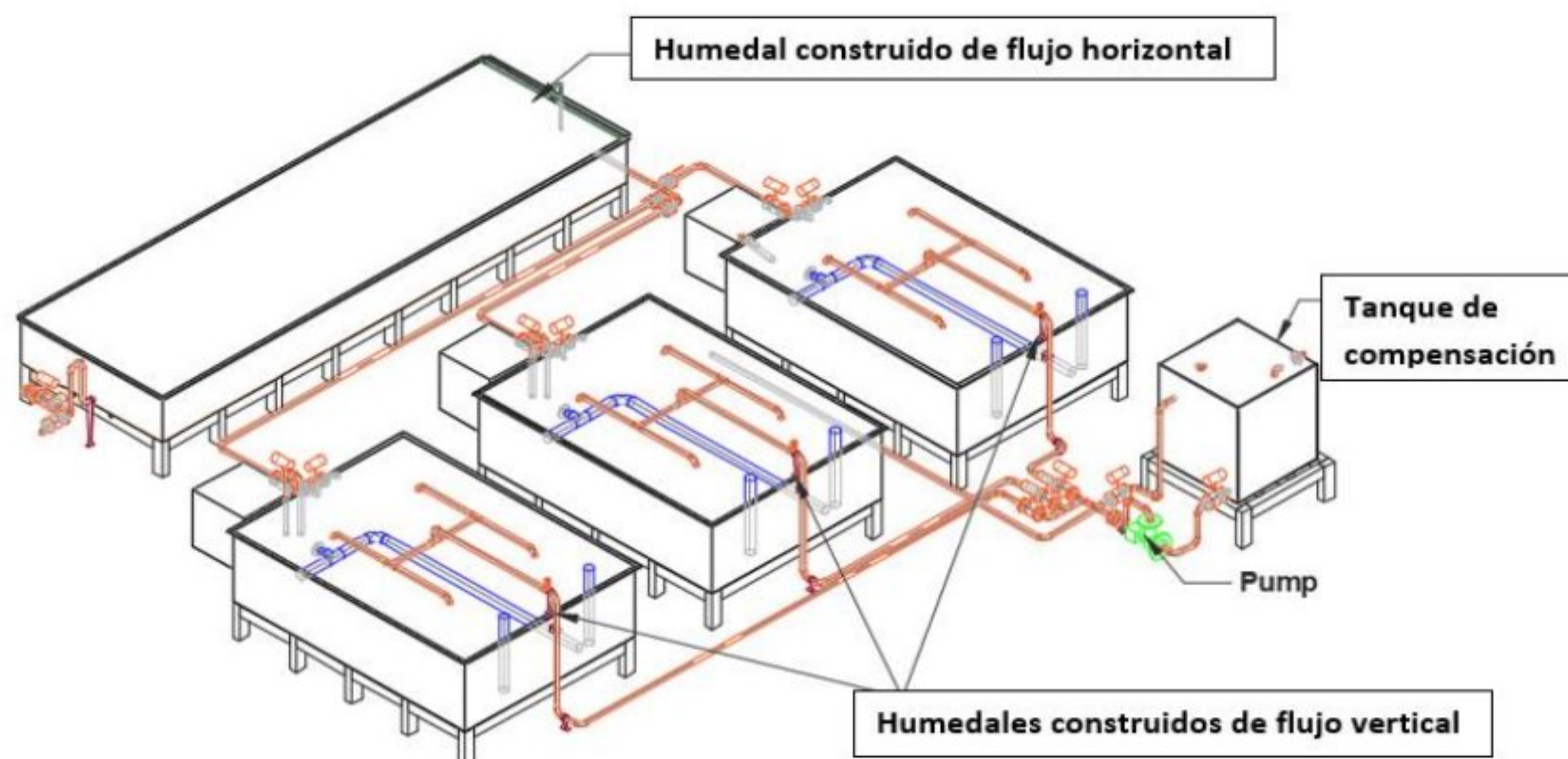


Figura 11: Esquema de humedales pilotos.

En el caso de los humedales construidos estudiados, la vegetación plantada es *Lolium perenne*, perteneciente a la familia de las gramíneas (figura 12), es una especie de planta emergente, la cual se adapta a un amplio rango de suelos. Sus raíces son largas, tienen un tallo cilíndrico, y es capaz de absorber altos niveles de nitrógeno y fósforo, los cuales encontramos en las aguas residuales.



Figura 12: Vegetación *Lolium perenne* adaptada en el humedal.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Características de *Lolium perenne*

Nombre científico	Nombre común	Clima	Temperatura ambiental óptima para su desarrollo
<i>Lolium perenne</i>	ballica, ballica inglesa, césped inglés, raygrass inglés.	Templado, húmedo	Tolera el frío moderado, pero es sensible al calor y a la sequía. Su crecimiento se ralentiza a partir de los 25°C y se paraliza a los 35°C.

Fuente: Elaboración propia

2.2. Funcionamiento de los humedales pilotos

Cada humedal se alimentó durante 7 días, mientras que el otro humedal descansaba por el mismo periodo. Las descargas se realizaron de forma intermitente por un tiempo de 2.5 minutos cada hora, 24 descargas al día, con un volumen de 0.24 m^3 , lo que nos da una carga hidráulica de $0.59 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$ en cada piloto.

Después de que el agua residual pasa por los diferentes estratos del humedal, se evacúa por medio de una tubería de PVC de 110 mm de diámetro, el efluente desemboca en el tanque de 200 l.

2.3. Monitoreo

Se entiende por monitoreo a la medición y observaciones continuas y estandarizadas del agua residual, es una actividad para obtener información acerca de los parámetros de las aguas residuales.

Para realizar el análisis y evaluación de las características del agua residual, tanto del afluente como del efluente, se procedió a realizar toma de muestras durante un periodo de cuatro meses.

El muestreo se realizó los días miércoles de la siguiente manera:

- Hora de inicio: 11h55am, toma de muestra puntual (agua residual cruda).
- Después de 2,5 minutos de iniciada la descarga se procedió a tomar las muestras a la salida del humedal, con intervalo de 1,5 minutos, según la tabla 5:

Tabla 5: Datos para la toma de muestras.

N de muestra	Hora	Caudal	Volumen parcial (ml)	Volumen total (ml)
1	11:57:30	0.2	240	
2	11:59:00	0.45	540	
3	12:00:30	0.37	450	
4	12:02:00	0.28	340	
5	12:03:30	0.21	250	
6	12:05:00	0.15	180	2000

Fuente: Elaboración propia

- Con las muestras recolectadas se realizó la muestra compuesta que posteriormente fueron analizadas en laboratorio.

Para la evaluación del sistema de tratamiento de agua residual estilo francés se analizaron parámetros físicos-químicos del agua que llega a los humedales y sale de los mismos, los parámetros utilizados para el análisis y evaluación fueron:

- DBO
- DQO
- ST
- SST

Para realizar el muestreo fue necesario el uso de guantes desechables, se utilizaron envases de polietileno de capacidad de 1 galón, previamente lavados con solamente con agua para no alterar las muestras, se utilizó cronómetro para mayor precisión en la toma de los tiempos respectivos.

2.4. Procesamiento de datos

Para evaluar la primera etapa del sistema de tratamiento de aguas residuales estilo francés, se realizaron tomas de muestras puntuales del afluente y del efluente, por un periodo aproximado de cuatro meses.

En la tabla 6 se resume el número de muestras que fueron tomadas y analizadas en el laboratorio para cada parámetro.

Tabla 6: Cantidad de muestras analizadas

Número de muestras analizadas								
	DBO		DQO		SST		ST	
Muestras Puntuales	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Humedal 1	10	10	10	10	10	10	10	10
Humedal 2	10	10	10	10	9	9	9	9

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación son los obtenidos en el laboratorio de la PTAR de Ucubamba.

3.1. Análisis de resultados del agua de entrada y salida

- **Sólidos Totales (ST)**

En la figura 13 se puede observar las concentraciones de ST en el afluente y efluente de los dos humedales pilotos, se observa que existe una variabilidad considerable en las concentraciones de ST del afluente de los humedales, ya que las aguas residuales tratadas en la PTAR de Ucubamba provienen de un alcantarillado combinado y presentan diferentes características.

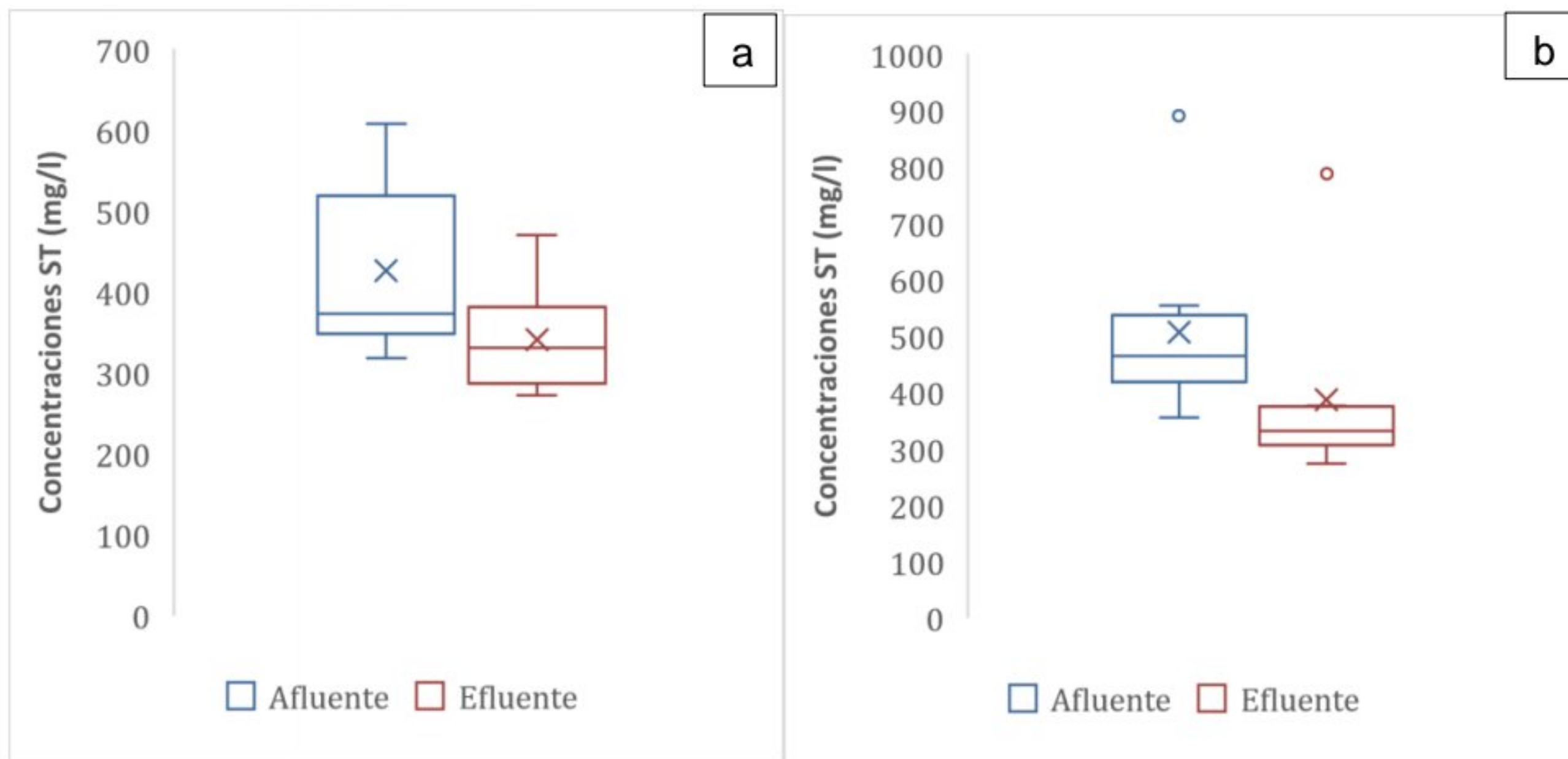


Figura 13: Concentración de ST en (a) Humedal 1, (b) Humedal 2

Fuente: Elaboración propia

En el Humedal 1 la concentración máxima de ST en el afluente es mayor a los 600 mg/l y el mínimo está por debajo de los 350 mg/l. En el efluente tenemos una concentración máxima mayor a los 450 mg/l y mínima menor a los 300 mg/l, en este caso los datos están

menos dispersos y la media está cercana al Q3, dentro del percentil entre el 50% y 75% de las concentraciones de ST.

En el Humedal 2 la gráfica nos indica una concentración máxima de 554 mg/l y una mínima de 356 mg/l, en el afluente, la media está cercana al Q3. En el efluente tenemos concentración máxima mayor a 350 mg/l y una mínima menor a 300 mg/l, los datos se encuentran menos dispersos que en el afluente. En este caso tenemos un dato atípico debido a la variabilidad en las aguas residuales que llegan a la PTAR.

En la figura 14 se muestran los porcentajes de remoción de ST de los humedales pilotos, teniendo eficiencias de 20.37% en el humedal 1 y 23.66% en el humedal 2.

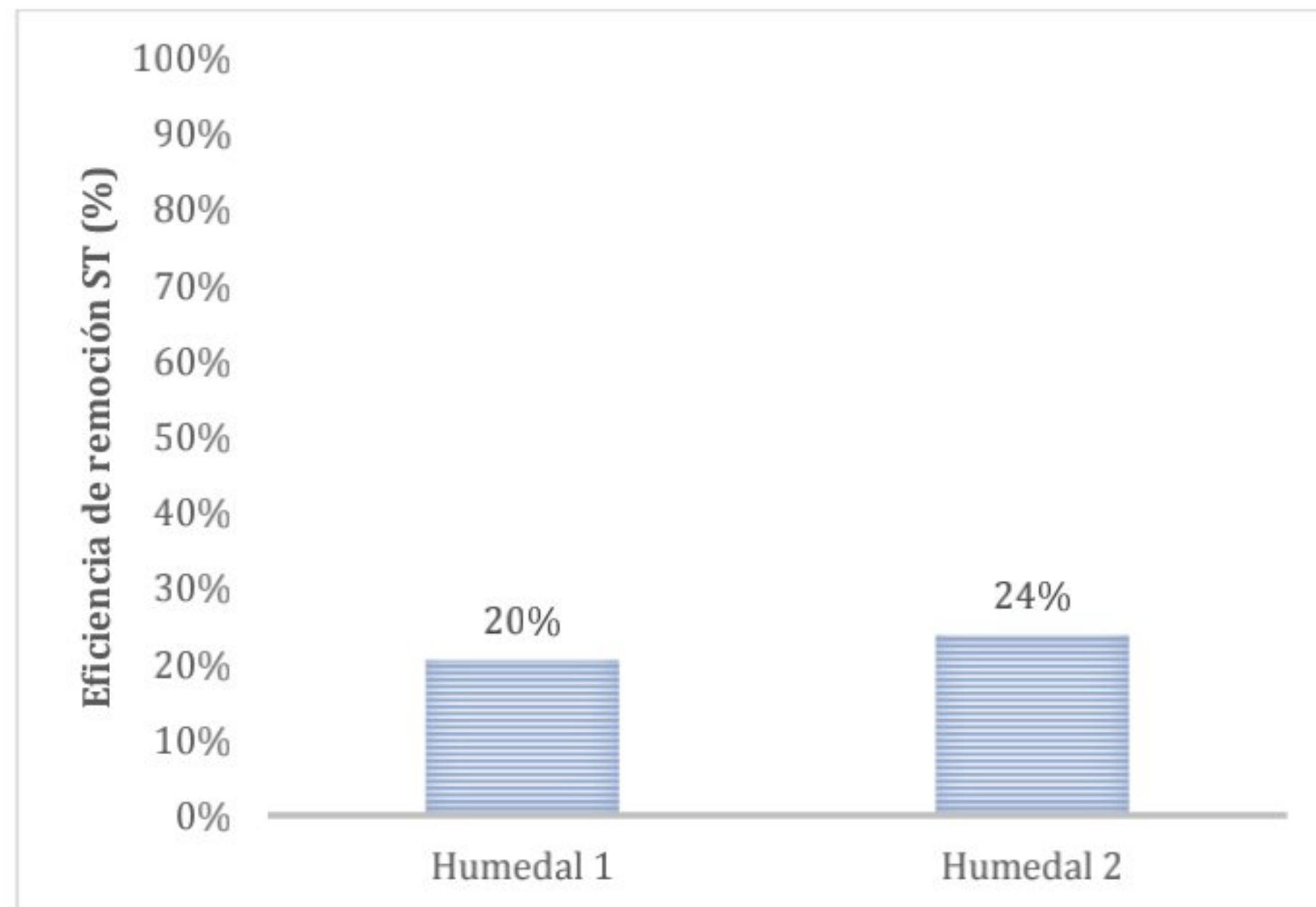


Figura 14: Eficiencia de remoción de ST

Fuente: Elaboración propia

- **Muestras Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

En la figura 15 se muestra las concentraciones de SST de los humedales pilotos 1 y 2, tanto del afluente como del efluente, se observa que al igual que en los resultados de ST existe variabilidad en los datos del afluente, esto debido a las diferentes características que presentan las aguas residuales que llegan a la PTAR como se mencionó anteriormente.

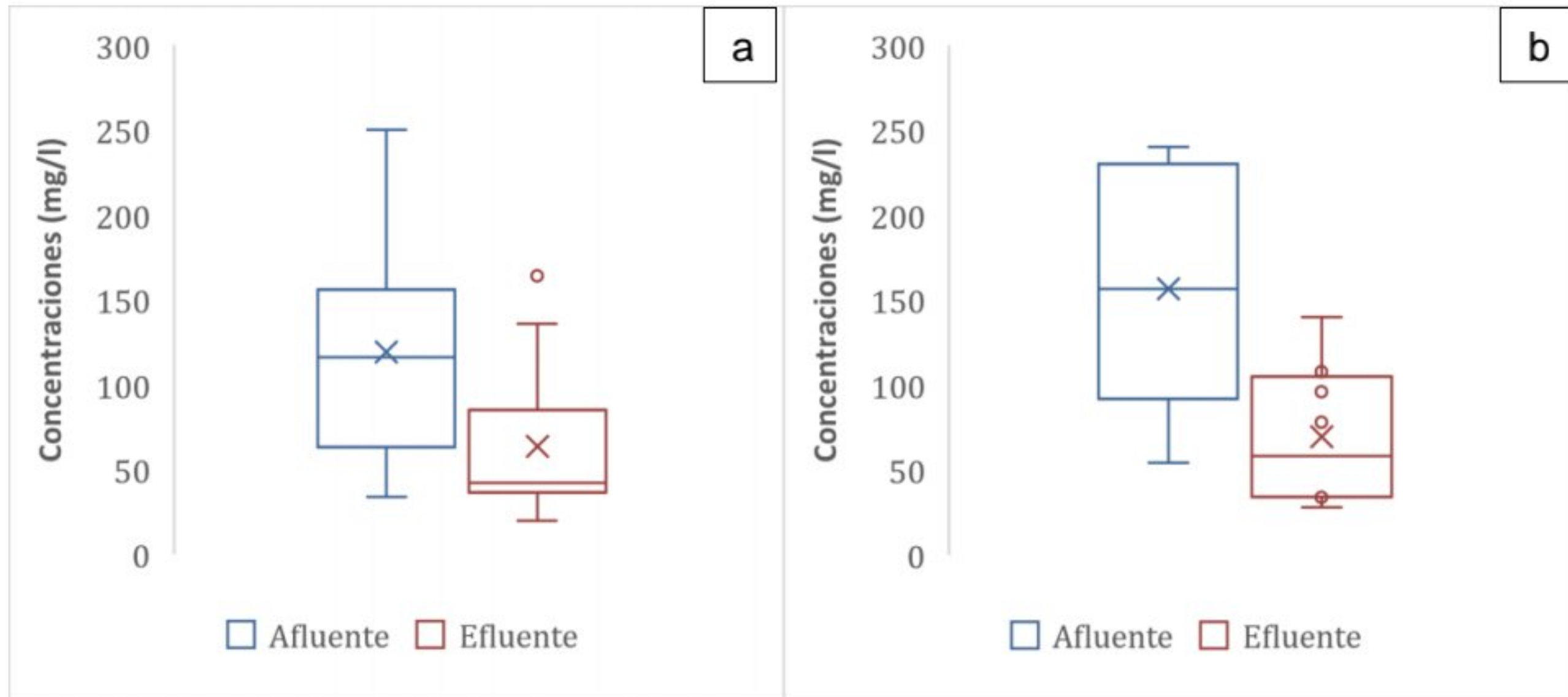


Figura 15: Concentración de SST en (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.

Fuente: Elaboración propia

Para las muestras de SST del humedal 1 del afluente se obtiene un valor máximo de 250 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 50 mg/l. En el efluente se obtiene un valor máximo mayor a 100 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media está entre el Q2 y Q3, dentro del percentil entre el 50% y 75% de las concentraciones de SST.

Para las muestras de SST del humedal 2 del afluente se obtiene un valor máximo superior a 200 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 100 mg/l. En el caso del efluente, el valor máximo es superior a 100 mg/l y el mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media se acerca al Q3, dentro del percentil entre el 50% y 75% de las concentraciones de SST. En la figura 16 se observa la eficiencia de remoción de SST de los humedales, el humedal 1 nos da una eficiencia de 55.22%, el humedal 2 una eficiencia de 55,66%.

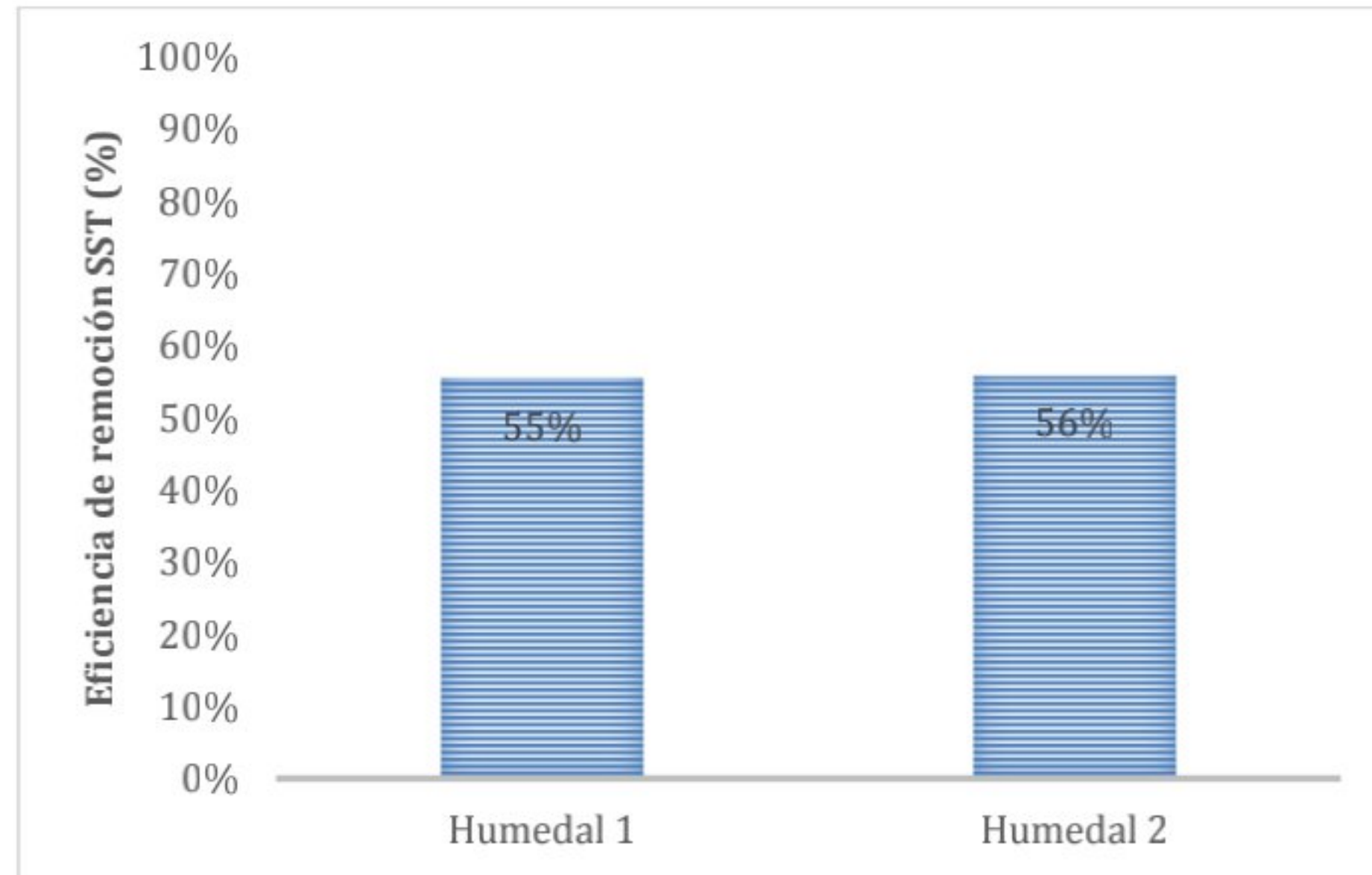


Figura 16: Eficiencia de remoción SST,

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de remoción no varían excesivamente ya que las concentraciones de SST en el afluente de ambos humedales fueron parecidas.

- **Muestras DBO**

Las figuras 17 nos muestran los resultados obtenidos en las concentraciones de DBO del afluente y efluente de los humedales pilotos.

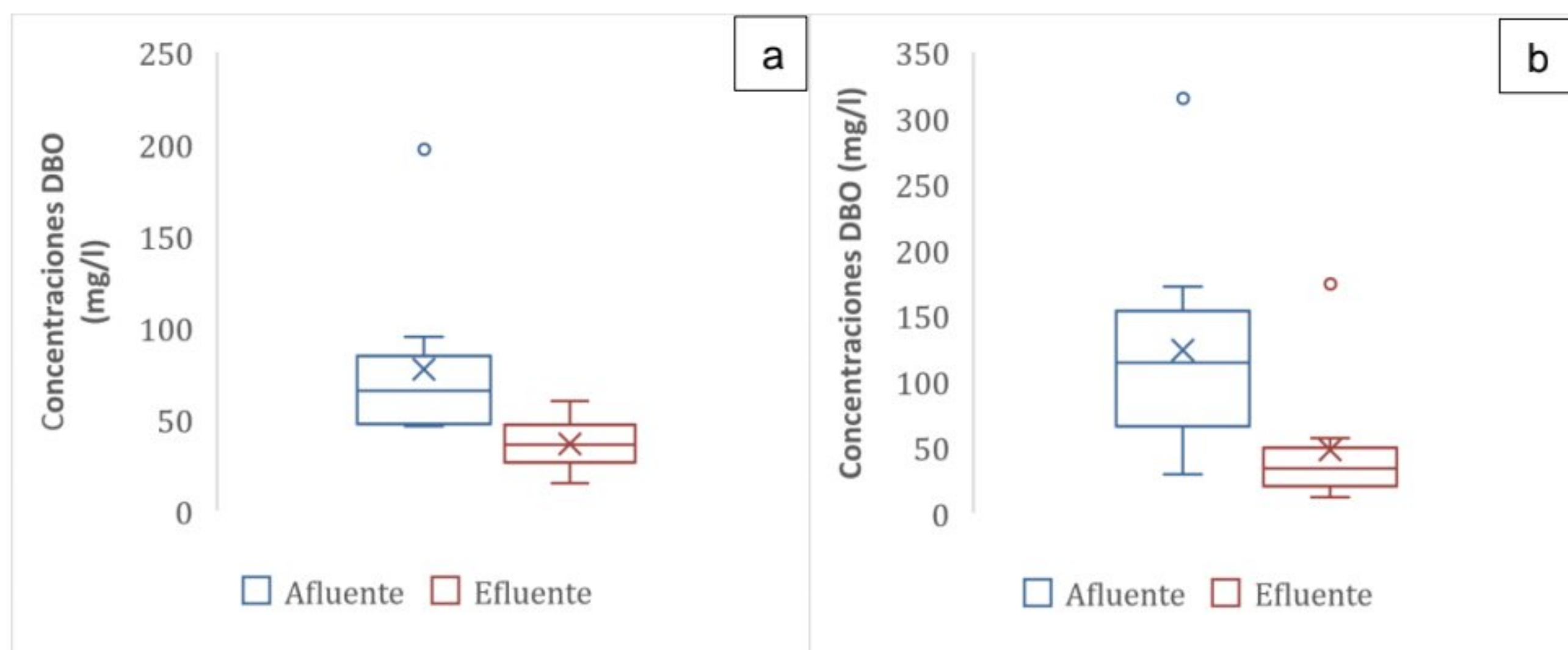


Figura 17: Concentraciones DBO, (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.

Fuente: Elaboración propia

Para las muestras de DBO del humedal 1 del afluente se obtiene un valor máximo superior a 75 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 50 mg/l. En el caso del efluente, el valor máximo es superior a 50 mg/l y el mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media está cercana al Q2.

Para las muestras de DBO del humedal 2 del afluente se obtiene un valor máximo superior a 150 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 50 mg/l. En el caso del efluente, el valor máximo es superior a 50 mg/l y el mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media está cercana al Q3, dentro del percentil entre el 50% y 75% de las concentraciones de DBO.

Con las muestras recolectadas se analizó la eficiencia de remoción para DBO, en la figura 18 se muestran los porcentajes, en el humedal 1 55,47% y en el humedal 2 61,19%.

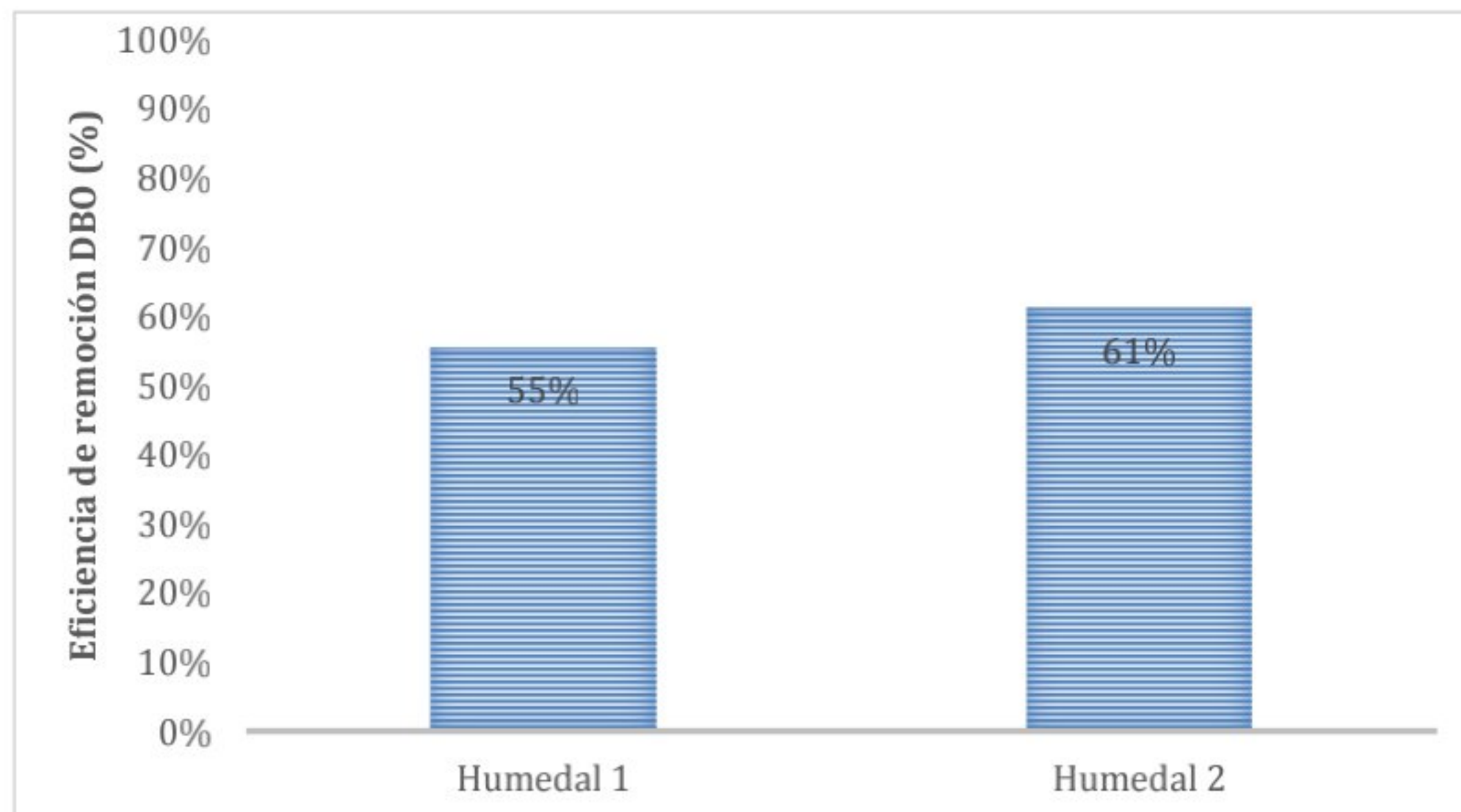


Figura 18: Eficiencia de remoción DBO

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados se puede ver que la eficiencia de remoción es mejor en el humedal 2, ya que este tiene mayores concentraciones de DBO en el afluente.

● **Muestras DQO**

La figura 19 muestra las concentraciones obtenidas de DQO en el afluente y efluente.

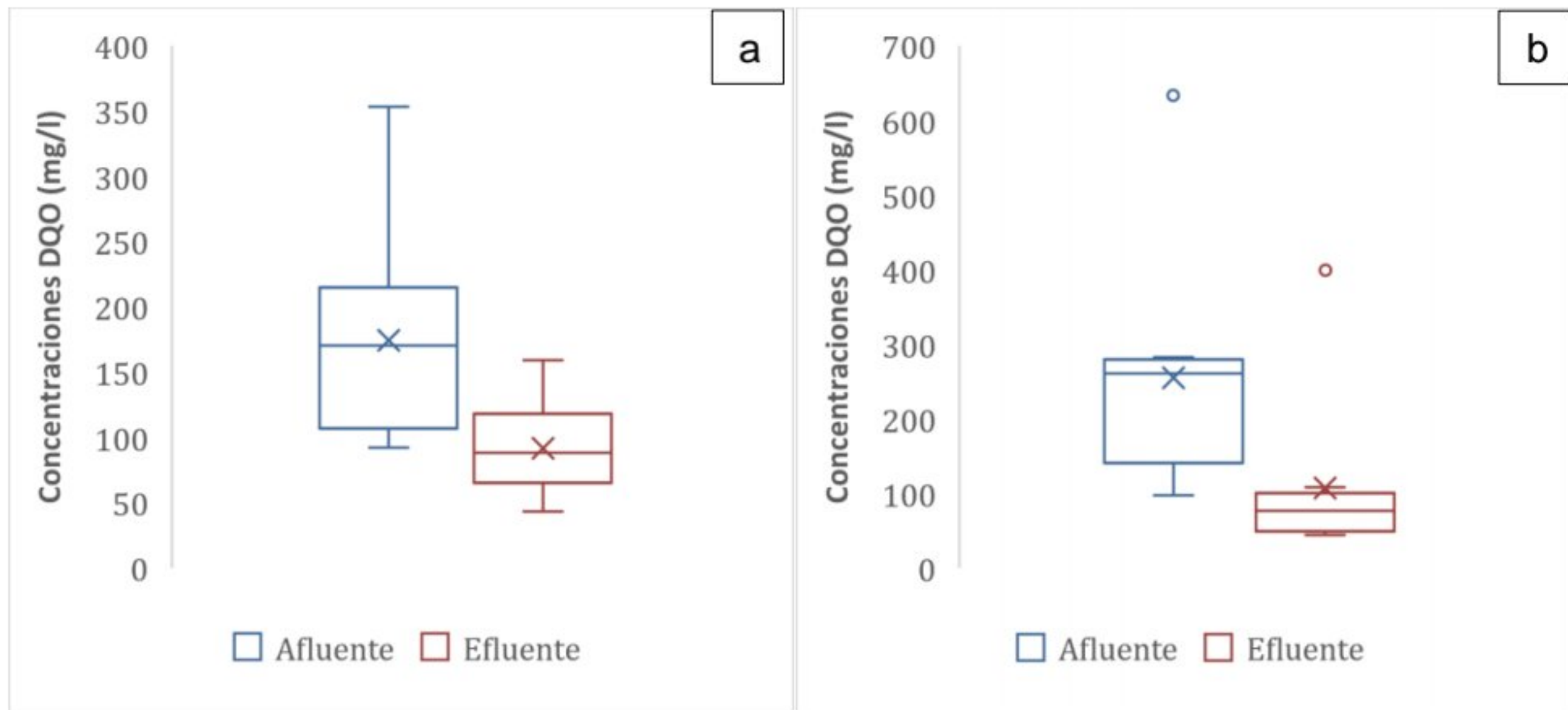


Figura 19: Concentraciones de DQO (a) Humedal 1, (b) Humedal 2.

Fuente: Elaboración propia

Para las muestras de DQO del humedal 1 del afluente se obtiene un valor máximo superior a 350 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 100 mg/l. En el caso del efluente, el valor máximo es superior a 150 mg/l y el mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media está cercana al Q2, dentro del percentil entre el 50% y 75% de las concentraciones de DQO.

Para las muestras de DQO del humedal 2 del afluente se obtiene un valor máximo superior a 250 mg/l y un valor mínimo por debajo de los 50 mg/l. En el caso del efluente, el valor máximo es superior a 100 mg/l y el mínimo por debajo de los 50 mg/l, la media está cercana al Q3, dentro del percentil entre el 75% y 100% de las concentraciones de DQO.

En la figura 20 se muestran los resultados de la eficiencia de remoción del humedal 1 y 2, teniendo un 47.59% y 57.91% respectivamente.

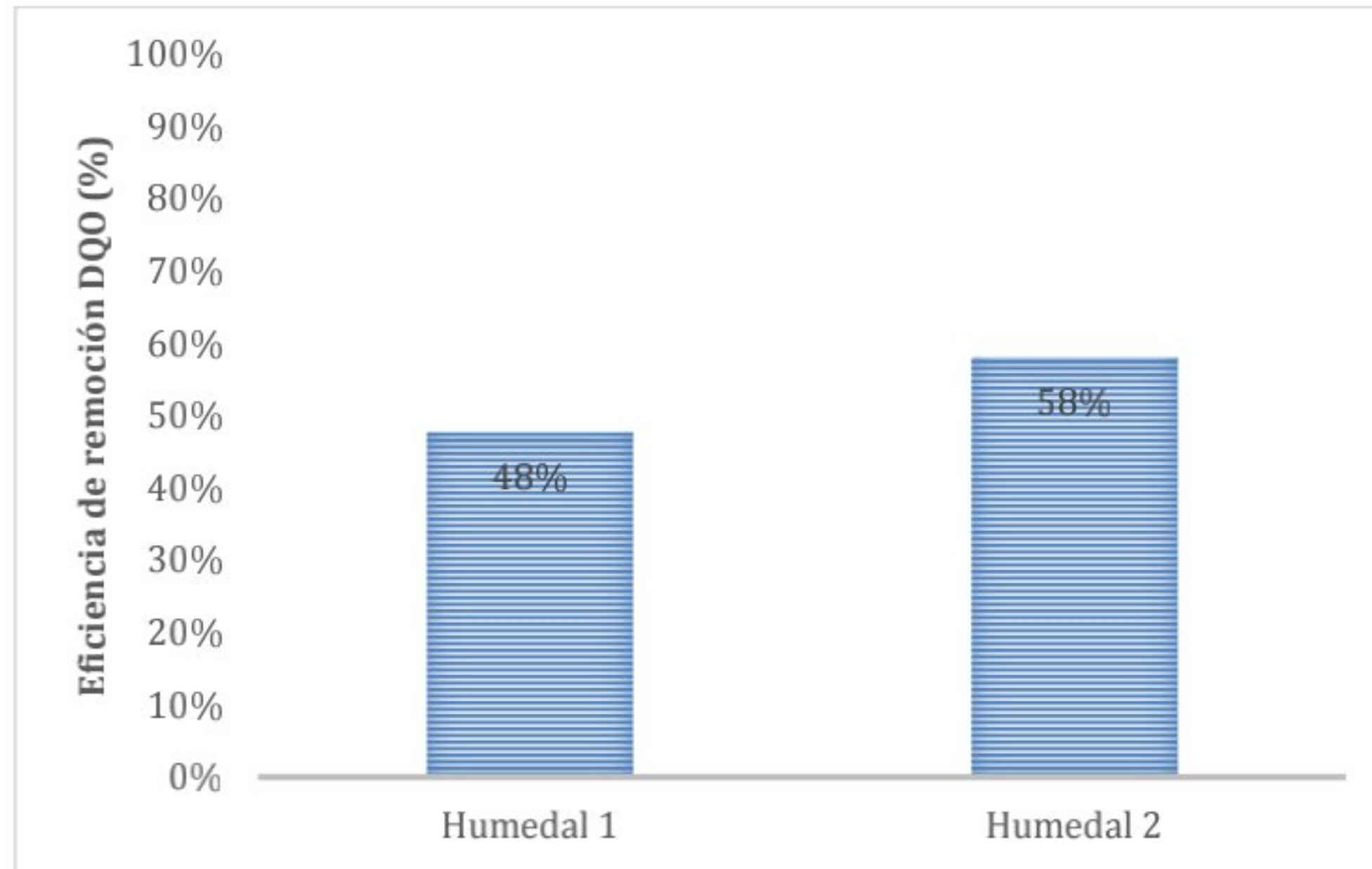


Figura 20: Eficiencia de remoción DQO

Fuente: Elaboración propia

El humedal 1 presenta una menor eficiencia de remoción, sin embargo, las muestras obtenidas del afluente de este humedal presentan mayores concentraciones de DQO.

3.2. Comparación de datos con la normativa vigente

Los promedios obtenidos en los análisis del efluente están dentro del límite permisible de descarga a alcantarillado.

En la tabla 6 se muestran los resultados promedios del efluente para cada parámetro analizado, en el caso de ST el 100% de las muestras cumplen con el límite de descarga permitido a cuerpos de agua dulce, para SST el 83% de las muestras cumplen con el límite, sin embargo el promedio está dentro del mismo, para la DBO el 95% de las muestras cumplen con lo establecido en la norma y la media está dentro del límite permitido de igual manera en la DQO el 95% de las muestras cumplen con el límite establecido en la norma y el promedio cumple con el límite.

Tabla 7: Promedios de concentraciones de ST, SST, DBO y DQO en el efluente

	Parámetro	Expresado como:	Unidad	Límite de descarga a cuerpos de agua dulce	Promedio del efluente
H 1	Sólidos Totales	ST	mg/l	1600	340,4
	Sólidos suspendidos totales	SST	mg/l	130	63,6
	Demanda Bioquímica de oxígeno	DBO	mg/l	100	36,4
	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	200	91,36
H 2	Sólidos Totales	ST	mg/l	1600	386,88
	Sólidos suspendidos totales	SST	mg/l	130	69,5
	Demanda Bioquímica de oxígeno	DBO	mg/l	100	48
	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	200	107,51

Fuente: Elaboración propia, basado en la norma TULSMA

3.3. Evaluación de la planta piloto

Las eficiencias obtenidas en la evaluación de los humedales pilotos, en comparación con los estudios realizados por Morvannow (2015), Paing (2015) y Navarro-Frómeta (2020), muestran eficiencias bajas de remoción para todos los parámetros evaluados, a excepción de ST del cual no se tienen estudios realizados.

Las bajas eficiencias de los pilotos se pueden dar debido a la falta de maduración de los mismos, ya que en el caso de los SST la retención se realiza en la superficie del filtro. La capa de lodos que se acumula con el tiempo se considera un factor clave para mejorar la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales. En los estudios realizados por Morvannow (2015), Paing (2015) y Navarro-Frómeta (2020), los humedales tenían un tiempo aproximado de funcionamiento de hasta 30, 12 y 9 años respectivamente y los humedales pilotos evaluados tienen un funcionamiento aproximadamente de 18 meses. La edad de la planta tiene un efecto positivo en las eficiencias de remoción en SST, ST, DBO y DQO.

También se toma en cuenta que la carga hidráulica aplicada es 1.6 veces mayor a las especificaciones francesas, ya que según la literatura esta carga debe ser de $0.37 \frac{m^3}{m^2 \cdot día}$ (Dotro et al., 2017), como consecuencia de esta sobre carga se puede tener un menor tiempo de retención y por lo tanto menor eficiencias de remoción.

La vegetación plantada en los humedales pilotos no se encuentra dentro de las plantas más usadas para estos sistemas, por lo tanto, también puede ser un factor importante a tomar en cuenta en los resultados obtenidos, sin embargo, ha demostrado ser una buena opción para utilizarse en humedales contruidos de flujo subsuperficial vertical.

Si bien los porcentajes obtenidos no alcanzaron los resultados esperados, cabe recalcar que el sistema aún no ha alcanzado su funcionamiento óptimo, ya que el tiempo es un factor clave para la maduración de la vegetación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al evaluar el comportamiento de la primera etapa modificada de los humedales artificiales de flujo subsuperficial tipo francés, basados en los parámetros de ST, SST, DBO y DQO, se obtiene que a pesar de que el sistema fue alimentado con sobrecarga hidráulica y está ubicado en una zona con una temperatura promedio de 14 °C, éste ha demostrado ser adecuado para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un alcantarillado combinado en la ciudad de Cuenca.

Las eficiencias de remoción alcanzadas (Tabla 8) son menores a las que se reporta en la literatura, sin embargo, las concentraciones obtenidas en el efluente cumplen con los valores expuestos en la normativa vigente para la descarga a un cuerpo de agua dulce, para los parámetros evaluados.

Tabla 8: Promedios de remoción para ST, SST, DBO y DQO en los humedales pilotos

Parámetro	Eficiencia humedal 1	Eficiencia humedal 2
Sólidos Totales	20%	24%
Sólidos Suspendidos Totales	55%	56%
Demanda Bioquímica de Oxígeno	55%	51%
Demanda Química de Oxígeno	48%	58%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se recomienda realizar más estudios y monitoreos, ya que el sistema puede tardar algunos años para alcanzar su máxima capacidad de depuración, puesto que las plantas adquieren mayor capacidad para absorber y expulsar los contaminantes presentes en el agua residual, así las eficiencias de remoción obtenidas en el presente estudio podrían aumentar con el tiempo de funcionamiento y alcanzar a las reportadas en la literatura.

Por otra parte, a pesar de que la primera etapa cumple con las concentraciones máximas permisibles en la normativa, la implementación de la segunda etapa del sistema francés,

ayudaría a mejorar los porcentajes de remoción, debido, a que esta etapa es necesaria para completar la nitrificación y la eliminación de materia orgánica del agua tratada, por ende, el sistema de dos etapas presenta mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J., & Vidal, G. (2018). *Humedales de Tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Editores Académicos. Obtenido de <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/06/humedales-de-tratamiento-alternativa-de-saneamiento-de-aguas-residuales-aplicables-en-Am%C3%A9rica-Latina.pdf>
- Alexandro Stefanakis, C. S. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands. Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier.
- Armando Enrique Navarro-Frómeta, F. B.-B. (Septiembre-Diciembre de 2020). Desempeño de humedales construidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Cubana de Química*, págs. 365-367.
- Carreño, C. A. (2016). *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales*. Ecoe Ediciones.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. Obtenido de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015b.%20Manual%20Humedales%20Artificiales%2030.pdf
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera Durán. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stei, O., & Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. En *Biological Wastewater Treatment Series* (Vol. 7, págs. 89,90). Nova Techset. Obtenido de https://drive.google.com/drive/folders/14GMk2cT16_vJEy2gC60v6y1UI0IT9CiR
- Hoffmann, H., Platze, C., Winker, M., & von Muench, E. (2011). *Technology review of constructed wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Obtenido de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Hoffmann-2011-Technology.pdf>

- Isaza, C. A. (2005). Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Científica General José María Córdova*, págs. 40-44.
- Jaime Andrés Lara Borrero. (Mayo de 1999). *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- María, A., Florentina, Z., Jaime, L.-B., & Gladys, V. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Bogotá: Editores académicos.
- Mendonça, S. R. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*. Mc Graw Hill.
- Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesch, S., & Molle, P. (15 de Diciembre de 2015). Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years. . *Water Science and Technology*, 71(9), 1333-1339. Obtenido de <https://doi.org/10.2166/wst.2015.089>
- Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté.
- Silva, A. S., & Zamora, H. D. (2005). Humedales artificiales. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2736/angelasofiasilvahernandezamora.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tiguero, O. A. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Obtenido de Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3339>