



**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 Humedales Construidos  
de Flujo Subsuperficial Vertical utilizando diferentes Plantas Emergentes**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE:**

**INGENIERO CIVIL CON ENFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**AUTORES:**

**MARÍA PAZ DÁVILA MOSCOSO**

**ERIKA GUADALUPE LÓPEZ PIÑA**

**DIRECTOR:**

**MARÍA BELÉN AREVALO DURAZNO**

**CUENCA, ECUADOR**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A Dios quien siempre me brindo su amor, fidelidad y fortaleza en cada momento de mi vida. Me mostro que a pesar de lo duras que podían ser la pruebas el me sostenía.

A mis padres Diego y Tere quienes con su dedicación, valentía, esfuerzo e inmenso amor supieron guiarme y apoyarme para poder cumplir mi sueño. Con mucho cariño esta meta cumplida les pertenece.

A mis hermanos Pedro y Diego que fueron y serán siempre mi impulso e inspiración. Juntos con alegrías y llantos concluimos esta etapa con anhelo de cumplir muchas más.

A Patricia y Roberto quienes siempre me han abierto las puertas de su hogar haciéndolo sentir mío, para aconsejarme y apoyarme a continuar siempre.

A toda mi familia, abuelos, tíos, primos, sobrinos; quienes estuvieron en cada logro y caída, demostrándome que cada esfuerzo tiene su recompensa.

A cada uno de mis amigos que fueron alegría, luz y consuelo en cada paso. Por siempre demostrar su enorme cariño para conmigo.

María Paz Dávila Moscoso.

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme guiado y por darme sabiduría en esta etapa importante de mi vida.

A mis padres Nelson López y Mercedes Piña, a los que respeto y admiro demasiado, por haber depositado en mí su confianza y amor.

A mis hermanos Nancy y Franklin que siempre me han dado su cariño y apoyo incondicional.

A familiares y amigos que con palabras de aliento y acciones me motivaron y ayudaron a cumplir este tan anhelado sueño.

Erika Guadalupe López Piña.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a la Universidad del Azuay que se transformó en nuestro segundo hogar, en donde nuestros maestros y amigos se convirtieron en familia.

A nuestra directora de tesis, la ingeniera María Belén Arévalo, quien siempre supo guiarnos con gran cariño y dedicación.

A nuestro tribunal, los Ingenieros Cesar Arévalo y Josué Larriva que siempre pusieron a nuestra disposición su tiempo y conocimientos.

## INDICE

DEDICATORIA .....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTO .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	6
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	6
Introducción .....	9
Objetivos.....	11
Capítulo 1.....	12
Marco Teórico.....	12
1. Tipo de Tratamientos de Aguas Residuales.....	12
2. Humedales Construidos .....	13
3. Clasificación de los Humedales Construidos.....	14
4. Componentes de Humedales Construidos.....	16
5. Tipos de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial.....	17
6. Tipos de Vegetación utilizadas .....	19
7. Carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico .....	20
Capítulo 2.....	22
Materiales y Métodos.....	22
1. Área de estudio .....	22
2. Unidades experimentales .....	22
3. Especies vegetales seleccionadas.....	23
4. Etapas de funcionamiento .....	23
5. Monitoreo.....	27
6. Análisis Estadísticos .....	28
Capítulo 3.....	29
Resultados y Discusión .....	29
3.1. Etapa 1 .....	29
3.2. Etapa 2 .....	32
3.3. Etapa 3 .....	36
3.4. Análisis Estadísticos: Análisis de correlación y análisis de similitud (PCA y Morisita-Horn) .....	41
CONCLUSIONES .....	43
BIBLIOGRAFÍA .....	45

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Medidas de los Tanques de acero inoxidable.....	22
Ilustración 2.Humedal 1: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha. ....	29
Ilustración 3.Humedal 2: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha. ....	29
Ilustración 4. Humedal 3: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha. ....	30
Ilustración 5.Humedal 1: Al finalizar Etapa 1. ....	30
Ilustración 6. Humedal 2: Al finalizar Etapa 1. ....	31
Ilustración 7. Humedal 3: Al finalizar Etapa 1. ....	31
Ilustración 8. Humedal 1: Etapa 2: Subetapa 1. ....	32
Ilustración 9. Humedal 2: Etapa 2: Subetapa 1. ....	32
Ilustración 10. Humedal 3: Etapa 2: Subetapa 1. ....	33
Ilustración 11. Gramma Humedal 3. ....	33
Ilustración 12. Humedal 1: Etapa 2: Subetapa 2. ....	34
Ilustración 13. Humedal 2: Subetapa 2. ....	34
Ilustración 14. Humedal 3: Etapa 2: Subetapa 2. ....	35
Ilustración 15. Presencia de yerba silvestre. ....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de alimentación y descanso Etapa 2: Subetapa 1.....	25
Tabla 2.Tiempo de alimentación y descanso Etapa 2: Subetapa 2.....	26
Tabla 3.Tiempo de alimentación y descanso Etapa 3. ....	27
Tabla 4. Crecimiento de Schoenoplectus californicus (Totora).....	37
Tabla 5. Crecimiento por su tiempo de alimentación. ....	38
Tabla 6. Crecimiento de Cynodon dactylon (Gramma). ....	39
Tabla 7. Crecimiento por los distintos tiempos de alimentación. ....	39
Tabla 8. Horas de encendido y apagado y promedio de crecimiento.....	41
Tabla 9. Porcentaje de Remoción DBO5. ....	42
Tabla 10. Porcentaje de Remoción DQO.....	42

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Crecimiento de la Totora por los diferentes tiempos de alimentación.....	38
Gráfico 2. Crecimiento de la Gramma por los diferentes tiempos de alimentación. ....	40
Gráfico 3. Correlación (PCA). ....	41
Gráfico 4.Similitud (Morisita-Horn).....	42

## RESUMEN

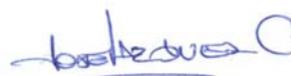
En la presente investigación se detallan los estudios realizados en tres humedales construidos de flujo subsuperficial vertical empleando dos tipos de plantas emergentes (totora y grama) y periodos de alimentación por intermitencia. El estudio tuvo como objetivo estudiar la adaptabilidad de las plantas considerando las condiciones de operación y alimentación por medio del análisis del crecimiento y expansión de las plantas, y a su vez conocer la remoción de DBO y DQO del agua cruda en los distintos humedales. Finalmente, con este estudio se ha logrado mostrar una adaptación satisfactoria de ambas especies de plantas emergentes a los distintos tiempos de alimentación.

**Palabras Clave:** Humedales Construidos, subsuperficial, adaptabilidad.



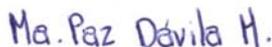
---

María Belén Arévalo Durazno  
Directora del trabajo de titulación



---

José Fernando Vázquez Calero  
Coordinador de Escuela



---

María Paz Dávila Moscoso



---

Erika Guadalupe López Piña

**Autoras**

## ABSTRACT

This research details the studies developed in three wetlands built of vertical subsurface flow with two types of emergent plants (totora and coach grass) and intermittent periods. The research objective was to study the adaptability of the plants considering the operation and feeding conditions through the analysis of the growth and expansion of the plants, and in turn, to know the removal of BOD and COD of raw water in the different wetlands. Finally, through this research made it possible to demonstrate the favorable adaptation of both sorts of emergent plants according to the distinct feeding times.

**Key words:** Built Wetlands, subsurface, adaptability.



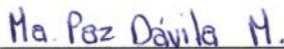
---

María Belén Arévalo Durazno  
Directora del trabajo de titulación



---

José Fernando Vázquez Calero  
Coordinador de Escuela



---

María Paz Dávila Moscoso



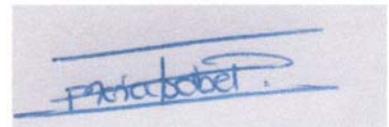
---

Erika Guadalupe López Piña

**Autoras**



Translated by



María Isabel Pérez

## **Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical utilizando diferentes Plantas Emergentes**

### **Introducción**

La ausencia de plantas de tratamiento para aguas residuales en muchas ciudades, industrias, hoteles, áreas de explotación minera, y zonas de producción agrícola y ganadera, ocasiona que grandes cantidades de aguas contaminadas sean vertidas directamente al medio ambiente. La mayoría de esas aguas es descargada en los ríos, lagos, mares, en los suelos a cielo abierto o en el subsuelo, a través de los llamados pozos sépticos y rellenos sanitarios (Janet Gil et al., 2012).

Existen diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales que al momento de implementarlos conllevan un gran costo en su implementación, operación y mantenimiento; por lo que se convierten en tratamientos con un tiempo de uso limitado y de difícil aplicación en países en desarrollo (Montoya et al., 2010). Los humedales construidos son una alternativa diferente para el tratamiento de aguas residuales, que al ser implementados han demostrado eficiencia y simplicidad en operación y mantenimiento. Debido a las ventajas constructivas y económicas de estos humedales, son una excelente opción de tratamiento de aguas residuales, especialmente para pequeñas comunidades con bajos recursos (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018). También este tipo de humedales por ser sistemas de depuración de agua naturales son amigables con el medio ambiente y sostenibles.

Los humedales construidos son estanques de menos de 1m de profundidad por los cuales circula el agua residual. En ellos se encuentran plantas acuáticas, microorganismos y material de soporte, necesarios para el tratamiento. Este último puede estar o no presente, pero tiene gran influencia en la eficiencia del sistema. Los humedales construidos pueden ser diferenciados según el tipo de vegetación y la dirección del flujo de agua y se clasifican en humedales de flujo subsuperficial, flujo superficial y sistemas híbridos (Padrón Palacios, n.d.). Los humedales construidos de flujo subsuperficial pueden ser de flujo horizontal, vertical, y vertical “Sistema Francés” (Estopá Consuegra, 2014).

Los humedales horizontales se alimentan de forma continua o intermitente, las aguas circulan horizontalmente penetrando un material de soporte, operan en condiciones

anaerobias y con tiempos largos de retención hidráulica. Los humedales verticales se alimentan con flujo intermitente lo que mejora la transferencia de oxígeno, operan cargas superiores a los de flujo horizontal por lo que requieren de menor espacio para tratar un mismo caudal (Estopá Consuegra, 2014).

Los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical “sistema francés” son alimentados de forma intermitente logrando así estimular sus condiciones aerobias. El agua residual fluye verticalmente a través del material de soporte (grava) hacia el fondo del humedal para ser recolectada por un tubo de drenaje. Para preservar el medio poroso con condiciones aerobias se colocan en los humedales sistemas de aeración que se basan en tuberías con salidas al exterior (Delgadillo et al., 2010). Estos sistemas de tratamiento tienen como principal característica que el pretratamiento es ya parte del sistema, pero teniendo como ventaja que no se producen lodos, tampoco libera biogás, pero sobre todo el costo de mantenimiento y adaptabilidad al medio es bajo (Estopá Consuegra, 2014).

Las plantas son esenciales para el buen funcionamiento de un humedal construido ya que desempeñan un papel importante en la eliminación de nutrientes de las aguas residuales. Dependen del régimen hidrológico, su crecimiento y las características del flujo, estas pueden ser emergentes, sumergidas, hojas - flotantes y flotantes. Para los humedales de flujo subsuperficial vertical el tipo de planta utilizada es la emergente que cumple con las características necesarias para el proceso de limpieza del agua residual a tratar. Estas plantas emergentes contribuyen al ser un soporte para la creación de películas bacterianas, permiten la transferencia de oxígeno al crear espacios en la capa de lodo superficial manteniendo de esta forma las condiciones aerobias y tienen la capacidad de sobrevivir en condiciones secas. Las raíces son las que ayudan al proceso de filtración, biodegradación y adsorción de las sustancias y constituyentes que existan en el agua residual (Vidal & Hormazábal, 2018).

Los aspectos importantes en los procesos de depuración de los humedales construidos, son la carga hidráulica y el tiempo de retención hidráulica “a bajas cargas hidráulicas el tiempo de retención es elevado, mientras que a altas cargas hidráulicas el agua pasa rápidamente hasta la salida del humedal, reduciendo el contacto entre el agua residual y los microorganismos del humedal encargados de los procesos de degradación”. Los humedales de flujo subsuperficial vertical dependen de la carga hidráulica y por ende

la carga orgánica que son capaces de absorber (Enrique de Azcoitia, 2012). Las cargas hidráulicas y orgánicas presentes en el agua residual deben tener un control permanente y así evitar estancamiento en la superficie, restricción de la transferencia de oxígeno y disminución de la mineralización de biosólidos (García Zumalacarregui & Von Sperling, 2018).

El objetivo principal de este estudio es comprobar la efectividad y correcto funcionamiento de las plantas emergentes *Schoenoplectus Californicus* (Totora) y *Cynodon Dactylon* (Gramma) en humedales construidos de flujo subsuperficial vertical estilo francés modificado. En una primera etapa se requirió de un tiempo de prueba para garantizar la adaptabilidad de las especies seleccionadas al estrato de siembra y a las condiciones climáticas, altura, y a distintos tiempos de alimentación y descanso. En una segunda etapa se realizaron cálculos hidráulicos y se tomaron muestras del agua para analizar el efecto del humedal construido en los niveles de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las aguas residuales.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar la adaptabilidad y efectividad de las especies nativas *Schoenoplectus californicus* (Totora) y *Cynodon dactylon* (Gramma), en el tratamiento de aguas residuales empleando humedales de flujo subsuperficial vertical estilo francés modificado, considerando distintas condiciones de operación (periodos de alimentación y descanso de este tipo de humedales).

### **Objetivos Específicos**

- Observar y documentar el desarrollo y adaptabilidad de las plantas emergentes en los humedales pilotos, en diversas etapas de alimentación y descanso.
- Evaluar la efectividad de los humedales pilotos en los niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), del agua residual doméstica.

## Capítulo 1

### Marco Teórico

Las aguas residuales son el resultado de una combinación de líquidos y residuos sólidos de toda índole que en el transcurso del tiempo han sido generadas sin ningún control y sin otorgarles un correcto tratamiento. Son aguas que han sido sometidas a cambios en sus propiedades por sus distintos usos (domésticos, industriales, comerciales, etc.), perjudicando el medio ambiente y atentando contra la salud de las personas (Orjuela Gutierrez & Lizarazo Becerra, 2013). La creación de las plantas de tratamiento de aguas residuales se fundamenta en la depuración de estas aguas contaminadas. Al momento de tener un adecuado tratamiento de aguas residuales estamos ayudando a un consumo sostenible del agua y sobre todo a la regeneración del medio ambiente y de sus ecosistemas (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006).

### 1. Tipo de Tratamientos de Aguas Residuales

Debido al aumento de población (demanda) y escases del agua se ha visto la necesidad de crear tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, las cuales se clasifican en convencionales y no convencionales (López, 2016).

#### 1.1. Tratamientos Convencionales

Este tipo de tratamientos han sido implementados a lo largo de los años dando resultados favorables a la depuración de aguas residuales, sin embargo ocasionan problemas en su mantenimiento y operación que implican un alto costo (Barquilla et al., 2016).

Existen diferentes procesos para tratar las aguas residuales. Para empezar, se realiza un pretratamiento, en el que se ejecutan procesos como desbaste, dilaceración y eliminación de arenas y grasas. A continuación, se efectúa un tratamiento primario, el cual se encarga de sedimentar la materia separándola del agua que se está depurando. Posteriormente el agua residual atraviesa por un tratamiento secundario en el que se produce la oxidación parcial de la materia orgánica que no ha sido eliminada en los procesos previos. Por último se realizan tratamientos de acabado, llamados tratamientos terciarios, estos comprenden la eliminación de nutrientes, minerales, microorganismos y la eliminación y estabilización de fangos (Muñoz, 2011).

## **1.2.Tratamientos No Convencionales**

Estos tratamientos son adaptables para comunidades medianas y pequeñas por su versatilidad, adaptabilidad, fácil integración en el entorno natural y bajo costo de implantación y explotación (Grisales, 2010).

Existen diferentes tipos de tecnologías no convencionales, una de ellas son las que utilizan el terreno como elemento depurador y se aplican de forma superficial (filtros verdes) o subsuperficial (zanjas, lechos y pozos filtrantes). También existen los humedales artificiales que pueden ser de flujo libre y flujo subsuperficial, estos imitan el proceso natural de depuración de ríos y lagos (Catellanos Carvajal, 2018).

## **2. Humedales Construidos**

Este tipo de sistemas son diseñados y construidos para utilizar los recursos de cada uno de los elementos de los cuales están constituidos, como son: la vegetación, el suelo y varios conjuntos microbianos. Este sistema de depuración de aguas tienen como objetivo servir de filtro para de esta manera imitar el funcionamiento de los humedales naturales (Manjate, 2016).

### **2.1.Aplicaciones**

Los Humedales Construidos tienen varias aplicaciones, entre las más importantes están los tratamientos de aguas residuales domésticas, industriales y aguas grises, además realizan un tratamiento natural de ríos y lagos contaminados y cumplen con la deshidratación y mineralización de lodos (Manjate, 2016).

Este tipo de tratamiento tiene la capacidad de purificar y retener aguas pluviales, al igual que pueden ser usados como tratamientos terciarios de efluentes de aguas residuales convencionales y en pretratamientos de aguas residuales crudas (Manjate, 2016).

Los Humedales Construidos han sido también considerados como una alternativa natural para el tratamiento de lixiviados los cuales son de gran impacto ambiental y representan dificultad en su tratamiento (Mosquera Beltrán, 2012).

## **2.2. Ventajas y desventajas**

Entre las principales ventajas de estos humedales construidos están sus bajos costos en su inversión y mantenimiento, su adaptabilidad a cualquier paisaje sin necesidad de que su construcción sea ejecutada por personal capacitado. Su fácil aplicación permite que sean utilizados en países en desarrollo o comunidades pequeñas. Además realizan la depuración de aguas residuales sin la necesidad de usar productos químicos y equipos mecánicos (Manjate, 2016). Este tipo de tratamiento sin embargo puede facilitar la cría de mosquitos sin poder eliminarlos por la sensibilidad de los componentes biológicos de los humedales a los químicos tóxicos como los pesticidas. En estudios previos se ha visto que su eficiencia varía de acuerdo al tipo de clima en donde sean implementados, por lo general en climas fríos se reduce la tasa de eliminación de DBO, NH<sub>3</sub> Y NO<sub>3</sub>. En algunos casos la eliminación de coliformes lograda no siempre es suficiente, por lo que se puede requerir un proceso de desinfección posterior (Manjate, 2016).

## **3. Clasificación de los Humedales Construidos**

La clasificación de los Humedales Construidos depende del tipo de plantas macrófitas utilizadas y la dirección del flujo de agua (Rabat, 2016).

Los sistemas de humedales construidos se dividen en dos tipos: sistemas a Flujo libre o Superficial (Free Wetlands, FWS) y sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS) (Lara Borrero, 1999).

### **Según el régimen de flujo de agua**

#### **3.1.1. Humedales Construidos de Flujo Libre o Superficial (FWS)**

En este sistema el agua circula superficialmente saturando por completo o parcialmente a los tallos y hojas de las plantas macrófitas. Son utilizados para tratar efluentes que ya han pasado por un tratamiento de depuración. En este tipo de humedales la capa de agua trabaja de manera aeróbica al estar expuesta a la atmósfera, sin embargo contienen como base una barrera subsuperficial que trabaja de manera anaeróbica (Rabat, 2016).

Las plantas que se colocan en los humedales se siembran fijamente y emergen sobre la superficie de agua. En estos humedales los niveles de profundidad del agua no son muy altos, varían de 10 a 60 cm (Lara Borrero, 1999).

### **3.1.2. Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (SFS)**

En este sistema el agua circula por las raíces y rizomas que se encuentran en un medio granular. Este sistema tiene el riesgo de obstrucción de los poros del material de soporte por lo que se adapta mejor a aguas con bajas concentraciones de sólidos suspendidos. En este tipo de humedales se produce la formación de una biopelícula en el material de soporte y las raíces ya que esta actúa en la purificación del agua. Este tipo de Humedales Artificiales pueden ser de flujo horizontal y flujo vertical (Rabat, 2016).

En los sistemas de flujo subsuperficial los niveles de agua se encuentra por debajo de la superficie del material granular, las raíces de la vegetación que debe ser sembrada deberán incrustarse en el fondo de la cama de arena o grava; teniendo como objetivo proporcionar un tratamiento avanzado o secundario (Lara Borrero, 1999).

## **3.2. Según el tipo de planta macrófitas**

### **3.2.1. Flotantes Libres**

Son plantas que no se encuentran adheridas a un material de soporte (flotan sobre la superficie del agua). Incluye tanto especies de pequeño tamaño (género *Azolla* Sp o *Lemna* Sp), como especies de mayor tamaño (Buchón o Repollito de Agua) (Gallego Maldonado, 2015).

### **3.2.2. Enraizadas Flotantes**

Este tipo de plantas se encuentran sujetas a un material de soporte, por lo general flotan en la superficie y presentan hojas de gran tamaño. Pueden ser emergentes, de hojas flotantes y sumergidas (Gallego Maldonado, 2015).

### **3.2.3. Sumergidas**

Son plantas enraizadas que se encuentran totalmente sumergidas en el agua (género *Zannichellia*) y se caracterizan por su gran tamaño ya que utilizan tanto los recursos del agua como del suelo (Gallego Maldonado, 2015).

## **4. Componentes de Humedales Construidos**

Los humedales construidos pueden ser de diferentes flujos como se mencionó anteriormente pero es de gran importancia que al momento de su construcción los componentes utilizados generen actividades biológicas y a su vez creen una sucesión ecológica, proporcionando un rendimiento y eficiencia adecuados (Mena Cabrera, 2014).

Los principales componentes de los humedales construidos son: agua, material de soporte y plantas acuáticas, todos estos deben trabajar conjuntamente para que se produzca el desarrollo de microorganismos, los cuales emergen por los nutrientes del agua que ingresa al humedal (Mena Cabrera, 2014).

### **4.1. Agua**

Este componente es esencial para el funcionamiento de los humedales. Al momento en que este ingresa e interactúa con los demás componentes se generan reacciones fisicoquímicas que dan como resultado la propagación de organismos (Mena Cabrera, 2014). La calidad del agua puede generar efectos importantes en la eficiencia del funcionamiento del humedal ya que trabaja en conjunto con la atmósfera por medio de la precipitación y la evapotranspiración (Delgadillo et al., 2010)

### **4.2. Material de soporte**

También conocido como material granular o sustrato poroso, pueden ser: grava, roca, suelo, arena y materiales orgánicos. En este material se da la permanencia de microorganismos y el tiempo de retención hidráulica depende de las características de éste (Zuñiga del Canto, 2004).

### **4.3. Plantas acuáticas**

La vegetación se encargará de proporcionar un medio de desarrollo para los microorganismos para que estos puedan realizar el tratamiento biológico y la

transferencia de oxígeno por medio de las raíces y rizomas. Varios estudios que se han realizado han demostrado que este tipo de plantas ayudan a la eliminación de contaminantes (Zuñiga del Canto, 2004).

#### **4.4. Microorganismos**

El crecimiento de microorganismos (pueden ser hongos, bacterias y protozoarios principalmente) y del metabolismo microbiano en los humedales facilitan la transformación de los nutrientes y del carbono orgánico. La biomasa producida se encarga de la formación de una biopelícula alrededor de las partículas del lecho. El desarrollo de la biomasa va a depender de las condiciones ambientales y la calidad del material de soporte (Mena Cabrera, 2014).

#### **4.5. Tasa de acumulación de la capa superficial de lodo**

Es un elemento constitutivo de los humedales verticales “Sistema Francés”. Esta capa de sedimentos en previos estudios han tenido un rango de 1.5 a 3 cm/año, se producen por diferentes aspectos como las condiciones climáticas en donde se implanten estos sistemas, el tipo de alcantarillado del que provengan las aguas residuales, el pretratamiento de las aguas residuales, la carga hidráulica en su etapa de iniciación y operación y también del tiempo de alimentación y descanso (Sperling & Sezerino, 2018).

### **5. Tipos de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial**

#### **5.1. Flujo Subsuperficial Horizontal**

Los humedales de flujo subsuperficial Horizontal son los más utilizados alrededor del mundo. El diseño de estos humedales consiste en una capa de tierra o arena y grava en la cual son sembradas las plantas acuáticas. El ingreso del agua residual es permanente, ingresa por la parte superior de un extremo y es evacuada por un tubo de drenaje en la parte opuesta de inferior (Delgadillo et al., 2010).

Se debe tener en cuenta que la profundidad del lecho puede variar entre 30 y 60 cm, mientras que la pendiente entre 0,5 % a 1%. Este sistema cuenta con pequeñas concentraciones de oxígeno que permiten el desarrollo de procesos

aeróbicos pero con una intensidad depreciable, por lo que los procesos anaeróbicos y anóxicos son los que tienen un mayor cargo. En este tipo de humedales la altura de la lámina de agua a lo largo del lecho dependerá de la altura del agua en la salida (Rabat, 2016).

Este tipo de humedales por lo general están diseñados para el tratamiento de efluentes primarios antes de la descarga de agua superficial. El agua residual permanece bajo los medios de alimentación y fluye dentro y alrededor de las raíces y rizomas de la vegetación. Al no estar el agua expuesta durante el proceso de depuración el riesgo de enfermedades patológicas asociado con la exposición humana o de vida silvestre disminuye (Kadlec & Wallace, 2009).

## **5.2. Flujo Subsuperficial Vertical**

Los humedales de flujo vertical están constituidos por un sistema de tuberías que recibe el agua que circula verticalmente a través de un material de soporte, comúnmente arenas y gravas formadas por varias capas de distinto diámetro ubicando la más finas en la parte superior, en este material se colocan las plantas emergentes que tratarán el agua residual. Estas aguas son recogidas por una red de drenaje colocada en el fondo del humedal, también se instalan tuberías con salidas al exterior como sistema de aeración permitiéndola trabajar al sistema en condiciones aerobias (Delgadillo et al., 2010).

Los humedales de flujo vertical han sido la mejor opción para el tratamiento de aguas residuales en lugares en los que se trabaja con flujos muy variables, estos pueden presentar un caudal nulo y de repente aumentar considerablemente debido a las lluvias. Los humedales bajo circunstancias apropiadas de Oxígeno Disuelto (OD) y pH sufren un daño mínimo frente a estas sobrecargas hidráulicas (Rodríguez et al., 2013).

Una gran ventaja de los humedales de flujo vertical frente a los de flujo horizontal es que estos operan con cargas superiores y debido a la intermitencia es más efectivo en la remoción de DBO y nitrógeno amoniacal. Al ser estos humedales alimentados en forma discontinua y vertical provoca mayor

oxigenación de las aguas y alta degradación de la materia orgánica (Milanes Hernández, n.d.).

Entre los diferentes sistemas de humedales de flujo vertical se encuentra el llamado “Sistema Francés” el cual se caracteriza por no necesitar un pretratamiento ya que su sistema lo incluye, fue creado para el tratamiento de aguas residuales crudas enfocándose como una solución para comunidades pequeñas que no cuentan con espacios amplios y que sus recursos son limitados, además de estas tienen otras ventajas como que no generan lodos ni libera biogás (Estopá Consuegra, 2014).

## **6. Tipos de Vegetación utilizadas**

Las plantas que comúnmente se introducen a los humedales construidos, son los conocidos como carrizo (*Phragmites australis*), es un tipo de caña con tallos huecos que llegan a una altura de hasta 2 m, son de crecimiento acelerado, formando grandes lechos en aguas poco profundas. Son plantas que soportan niveles moderados de salinidad que se encuentran en el agua y en el suelo (Patiño & Zhinín, 2015).

Otro tipo de planta muy utilizado en los humedales construidos, es el papiro (*Cyperus papyrus*), es un tipo de caña que en sus tallos presentan secciones triangulares, su altura varía entre los 2m a 5m, y su base puede llegar a ser ancha hasta los 6 cm, las temperaturas que llega a tolerar son de 22° a 33°C y su pH varía entre 6 y 8,5. Estas plantas facilitan la transmisión y circulación del aire con el objetivo de transportar oxígeno hacia las partes más profundas y partes sumergidas (Patiño & Zhinín, 2015).

En estudios previos también se utilizó una planta nativa de los Andes Ecuatorianos, llamada comúnmente Totorá (*Schoenoplectus californicus*), son perennes y forman parte de la familia de ciperáceas. Esta planta es utilizada por su fácil adaptación y propagación bajo cualquier condición del medio ambiente. Una de las características de esta planta es que tiene un potencial de remoción de Fósforo y Nitrógeno. Sin embargo, su mayor beneficio es la transmisión de oxígeno a la raíz, permitiendo transportar de una manera más profunda, tomando también nutrientes y carbono para que pueda realizar su procedimiento llamado fitorremediación (Guerra, 2018).

La Grama es otra de las plantas utilizadas, es perteneciente a una especie de gramínea perenne, son rastreras con eslabones cuyo nombre científico es *Cynodon dactylon*, alcanzan alturas de 15 hasta 25 cm y se caracteriza por su alta propagación vegetativa, gran capacidad para sobrevivir en condiciones ambientales desfavorables y por su adaptabilidad a numerosos tipos de suelo (SEMARNAT & CONANP, 2006).

### **7. Carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico**

Las condiciones hidrológicas tienen una gran influencia en la reacción de los elementos biológicos. El tiempo en que el agua permanece en el humedal y la relación que tengan las sustancias transmitidas por el agua y el medio del mismo va a depender de los flujos y el volumen del humedal. Es por esto que es importante determinar el concepto de carga hidráulica y tiempo de retención (Enrique de Azcoitia, 2012).

La carga hidráulica no es más que la división entre el caudal de entrada y el área útil del humedal, mientras que el tiempo de retención hidráulico es el cociente de el volumen útil del humedal para el caudal de entrada, para el cálculo del volumen útil es necesario conocer el porcentaje de porosidad del material de soporte ya que este se multiplica por el volumen total del humedal dando como resultado el tiempo de retención real (Enrique de Azcoitia, 2012).

En el proceso de depuración el tiempo de retención hidráulico y la carga hidráulica son de gran importancia ya que determinarán el tiempo de contacto entre el agua residual y los microorganismos que se encargan del proceso de degradación (Trang et al., 2010).

Para los humedales se consideran cargas hidráulicas bajas y tiempos de retención hidráulicos altos, de esta manera se producirá un alto rendimiento en el tratamiento. Para que los tiempos de retención sean altos es necesario contar con una gran superficie, es importante también tener en cuenta que la carga hidráulica no aumente para que no intervenga con el proceso de nitrificación y desnitrificación que se produce en los humedales (Trang et al., 2010).

El tiempo de retención hidráulico influye en varios aspectos del comportamiento hidráulico. A mayor tiempo de retención hidráulico mayor es la eliminación de la concentración de DQO y de materia orgánica dentro del sustrato, aunque no se ha encontrado correlación entre este tiempo con la eliminación de sólidos totales (Bui et al., 2018).

## Capítulo 2

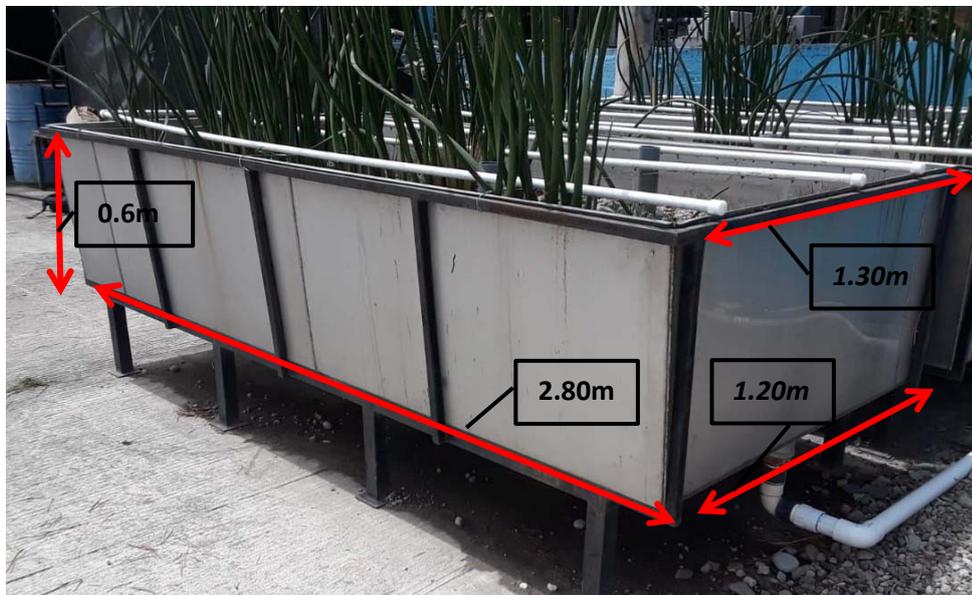
### Materiales y Métodos

#### 1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ucubamba de la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP, de la ciudad de Cuenca. La planta se encuentra a una altitud de 2550 m.s.n.m aproximadamente. El tipo de clima en este sector es templado, con un promedio de temperatura 15°C, y una precipitación media anual de 800 mm.

#### 2. Unidades experimentales

El presente estudio se realizó en tres humedales pilotos colocados a la salida del desarenador de la PTAR de Ucubamba. Se utilizaron tres tanques de acero inoxidable de sección transversal trapezoidal con un largo de 2.80m, profundidad de 0.60m, ancho inferior de 1.20m y ancho superior de 1.30m como se muestra en la *Figura 1*.



**Ilustración 1.** Medidas de los Tanques de acero inoxidable.

**Fuente:** Autoría propia.

Para la alimentación de los humedales se utilizaron 4 bombas, la primera se colocó dentro del desarenador y es la que se encargó de recoger el agua para trasportarla a

un tanque de almacenamiento mediante tuberías de 1". Una vez que el agua llegaba a este tanque, tres bombas la recogían a través de tuberías de 1" y alimentaban los humedales de manera independiente por tuberías de 1/2".

Al momento de alimentar a los humedales se colocaron tres tubos de 1/2" perforados (agujeros de 4.5mm de diámetro) encima de cada uno de forma paralela y cubiertos al final con un tapón hembra de igual diámetro. En la parte inferior de los tanques se colocaron tuberías perforadas (agujeros de 10mm de diámetro) de 1/2" distribuidas en forma de espina de pescado como sistema de drenaje.

Como material de soporte se utilizó grava de 3/4 a una profundidad de 0.40m y piedra de 20cm de diámetro que se colocó alrededor de la tubería de drenaje en la parte inferior para evitar su taponamiento.

En cada humedal se colocaron dos tipos de plantas emergentes, *Schoenoplectus californicus* comúnmente llamada Totora en la primera mitad y *Cynodon dactylon* llamada Gramma en la otra mitad.

A la salida se instaló una tubería de 1/2" que se encarga de llevar el agua residual tratada hacia un canal de evacuación.

### **3. Especies vegetales seleccionadas**

Para el presente estudio las plantas que se seleccionaron fueron *Schoenoplectus californicus* (Totora) y *Cynodon dactylon* (Gramma). Fueron seleccionadas por ser especies nativas de la zona, y que debido a su distribución natural en riveras y humedales naturales, poseen propiedades capaces de desarrollarse en este tipo de sistemas.

### **4. Etapas de funcionamiento**

El funcionamiento de los humedales se realizó de manera intermitente, dividiendo al estudio en tres etapas:

#### **a. Etapa 1**

La primera etapa consistió en la adecuación de los humedales, siembra y adaptación de las plantas. Esta etapa tuvo una duración de 2 meses. Se realizó la siembra de ambas especies en cada uno de los humedales previo a su funcionamiento automatizado. En cuanto a la Especie 1 *Schoenoplectus californicus* (Totora) se colocaron entre seis y

ocho tallos en cada humedal. Para la Especie 2 *Cynodon dactylon* (Gramma) se colocaron tres fragmentos rectangulares de 10 x 15cm en cada uno de los humedales. La alimentación de esta etapa fue de manera manual, se efectuó dos veces por semana tomando el agua de la salida del desarenador de la planta. Al momento de finalizar la siembra de ambas especies se realizó la saturación de todos los humedales con la finalidad de que el agua cruda llegue a las raíces de todos los individuos sembrados.

## **b. Etapa 2**

Esta etapa tuvo un periodo de funcionamiento de 3 meses. Esta etapa inició posterior a la adaptación y crecimiento de la vegetación, y la verificación y control del correcto funcionamiento de los elementos de los humedales. En cuanto al tiempo de alimentación y descanso de los humedales se llevaron a cabo en periodos de 10 días, los cuales fueron monitoreados por un Control Lógico Programable (PLC) que controlaba el funcionamiento de las bombas. Esta etapa fue dividida en dos subetapas debido a que se presentaron inconvenientes en la programación del PLC.

- i. **Subetapa 1:** Para el primer humedal se estableció un periodo de alimentación de 7 días y 3 días de descanso; el humedal 2 se alimentó 5 días y descansó 5 días; y el humedal 3 se alimentó por 3 días y descansó 7 días. Estos periodos de alimentación y descanso se llevaron a cabo por 3 semanas. En esta etapa los tres se alimentaban al mismo tiempo durante todo el día de alimentación (*Tabla 1*).

ETAPA 2 (SUBETAPA 1)				
Mes	Día	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Noviembre	Viernes 29	Encendido	Encendido	Encendido
	Sábado 30	Encendido	Encendido	Encendido
Diciembre	Domingo 1	Encendido	Encendido	Encendido
	Lunes 2	Encendido	Encendido	Apagado
	Martes 3	Encendido	Encendido	Apagado
	Miércoles 4	Encendido	Apagado	Apagado
	Jueves 5	Encendido	Apagado	Apagado
	Viernes 6	Apagado	Apagado	Apagado
	Sábado 7	Apagado	Apagado	Apagado
	Domingo 8	Apagado	Apagado	Apagado
	Lunes 9	Encendido	Encendido	Encendido
	Martes 10	Encendido	Encendido	Encendido
	Miércoles 11	Encendido	Encendido	Encendido
	Jueves 12	Encendido	Encendido	Apagado
	Viernes 13	Encendido	Encendido	Apagado
	Sábado 14	Encendido	Apagado	Apagado
	Domingo 15	Encendido	Apagado	Apagado
	Lunes 16	Apagado	Apagado	Apagado
	Martes 17	Apagado	Apagado	Apagado
	Miércoles 18	Apagado	Apagado	Apagado
	Jueves 19	Encendido	Encendido	Encendido

**Tabla 1.** Tiempo de alimentación y descanso Etapa 2: Subetapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.

ii. **Subetapa 2:** En esta etapa la alimentación se cambió el periodo de alimentación a 7 días y el descanso a 14 días en los tres humedales. Este sistema de alimentación se implementó por 9 semanas y fue controlado manualmente (*Tabla 2*).

ETAPA 2 (SUBETAPA 2)				
Mes	Día	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Diciembre	Viernes 20	Encendido	Apagado	Apagado
	Sábado 21	Encendido	Apagado	Apagado
	Domingo 22	Encendido	Apagado	Apagado
	Lunes 23	Encendido	Apagado	Apagado
	Martes 24	Encendido	Apagado	Apagado
	Miércoles 25	Encendido	Apagado	Apagado
	Jueves 26	Encendido	Apagado	Apagado
	Viernes 27	Apagado	Encendido	Apagado
	Sábado 28	Apagado	Encendido	Apagado
	Domingo 29	Apagado	Encendido	Apagado
	Lunes 30	Apagado	Encendido	Apagado
	Martes 31	Apagado	Encendido	Apagado

<b>Enero</b>	Miércoles 1	Apagado	Encendido	Apagado
	Jueves 2	Apagado	Encendido	Apagado
	Viernes 3	Apagado	Apagado	Encendido
	Sábado 4	Apagado	Apagado	Encendido
	Domingo 5	Apagado	Apagado	Encendido
	Lunes 6	Apagado	Apagado	Encendido
	Martes 7	Apagado	Apagado	Encendido
	Miércoles 8	Apagado	Apagado	Encendido
	Jueves 9	Apagado	Apagado	Encendido
	Viernes 10	Encendido	Apagado	Apagado
	Sábado 11	Encendido	Apagado	Apagado
	Domingo 12	Encendido	Apagado	Apagado
	Lunes 13	Encendido	Apagado	Apagado
	Martes 14	Encendido	Apagado	Apagado
	Miércoles 15	Encendido	Apagado	Apagado
	Jueves 16	Encendido	Apagado	Apagado
	Viernes 17	Apagado	Encendido	Apagado
	Sábado 18	Apagado	Encendido	Apagado
	Domingo 19	Apagado	Encendido	Apagado
	Lunes 20	Apagado	Encendido	Apagado
	Martes 21	Apagado	Encendido	Apagado
	Miércoles 22	Apagado	Encendido	Apagado
	Jueves 23	Apagado	Encendido	Apagado
	Viernes 24	Apagado	Apagado	Encendido
	Sábado 25	Apagado	Apagado	Encendido
	Domingo 26	Apagado	Apagado	Encendido
	Lunes 27	Apagado	Apagado	Encendido
	Martes 28	Apagado	Apagado	Encendido
	Miércoles 29	Apagado	Apagado	Encendido
	Jueves 30	Apagado	Apagado	Encendido
	Viernes 31	Encendido	Apagado	Apagado
<b>Febrero</b>	Sábado 1	Encendido	Apagado	Apagado
	Domingo 2	Encendido	Apagado	Apagado
	Lunes 3	Encendido	Apagado	Apagado
	Martes 4	Encendido	Apagado	Apagado
	Miércoles 5	Encendido	Apagado	Apagado
	Jueves 6	Encendido	Apagado	Apagado
	Viernes 7	Apagado	Encendido	Apagado
	Sábado 8	Apagado	Encendido	Apagado
	Domingo 9	Apagado	Encendido	Apagado
	Lunes 10	Apagado	Encendido	Apagado
	Martes 11	Apagado	Encendido	Apagado
	Miércoles 12	Apagado	Encendido	Apagado
	Jueves 13	Apagado	Encendido	Apagado
	Viernes 14	Apagado	Apagado	Encendido
	Sábado 15	Apagado	Apagado	Encendido
	Domingo 16	Apagado	Apagado	Encendido
Lunes 17	Apagado	Apagado	Encendido	
Martes 18	Apagado	Apagado	Encendido	
Miércoles 19	Apagado	Apagado	Encendido	
Jueves 20	Apagado	Apagado	Encendido	

**Tabla 2.** Tiempo de alimentación y descanso Etapa 2: Subetapa 2.

**Fuente:** Autoría Propia.

### c. Etapa 3:

Esta etapa se llevó a cabo por 4 periodos horarios durante 10 días en cada uno de los 3 humedales, como se observa en la **Tabla 3**. El humedal 1 se alimentó 7 días y descansó 3 días, el humedal 2 se alimentó 5 días y descansó 5 días y el humedal 3 se alimentó por 3 días y descansó por 7 días. Esta etapa fue controlada nuevamente por el PLC.

ETAPA 3											
Hora	Humedal	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
0h00-1h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
1h00-2h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
2h00-3h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
3h00-4h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
4h00-5h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
5h00-6h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
6h00-7h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
7h00-8h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
8h00-9h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
9h00-10h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
10h00-11h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
11h00-12h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
12h00-13h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
13h00-14h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
14h00-15h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
15h00-16h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
16h00-17h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
17h00-18h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
18h00-19h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
19h00-20h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
20h00-21h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
21h00-22h00	1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado						
22h00-23h00	2	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
23h00-24h00	3	Encendido	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado

**Tabla 3.** Tiempo de alimentación y descanso Etapa 3.

**Fuente:** Autoría propia.

## 5. Monitoreo

Para el control de los humedales en cada etapa se realizó de distinta manera:

**Etapa 1:** De manera visual se verificó la supervivencia y crecimiento de los individuos sembrados, lo que garantizó la adaptación de las especies empleadas al medio de siembra y a las condiciones climáticas particulares de la PTAR de Ucubamba.

**Etapa 2:** En esta etapa se monitoreó constantemente la reacción de las plantas a los periodos de alimentación y descanso. En la totora se analizó el aumento de los tallos y la variación de su altura. En cuanto a la grama se monitoreó su crecimiento longitudinal y variaciones en su coloración.

**Etapa 3:** Para esta etapa se realizó periódicamente una medición de ambas especies. Al inicio de esta etapa se podaron ambas especies para determinar una altura inicial: (Especie 1: 60cm y Especie 2: 10 x 15cm). Se midió el crecimiento en altura (cm) de la especie 1 (Tatora: *Schoenoplectus californicus*), y en la especie 2 (Gramma: *Cynodon dactylon*) se midió su crecimiento longitudinal (cm).

Para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se tomaron muestras en la entrada y salida de los humedales, se tomaron las muestras con un recipiente de 1 galón y posteriormente se las llevaron al laboratorio para realizar los análisis.

Mediante el método volumétrico se midió el caudal de entrada a cada uno de los humedales, este método consistió en medir el tiempo que tardo un recipiente de volumen conocido (probeta: 1000ml) en llenarse.

## **6. Análisis Estadísticos**

Para visualizar la relación entre el crecimiento de la vegetación y las horas de alimentación de cada humedal se realizó un análisis de correlación (Componentes principales PCA), dándole un valor de 1 a las horas en las que los humedales estaban encendidos y 0 a las horas que estaban apagados, además se obtuvo el promedio de crecimiento de las plantas en cada humedal.

Se realizó también un Análisis de Cluster utilizando el coeficiente de similitud de Morisita-Horn, el cual nos permitía visualizar la similitud presente entre los humedales, teniendo como parámetros periodos de alimentación y descanso y crecimiento de los individuos.

Para realizar los análisis estadísticos se empleó el programa Past3, de igual manera los gráficos de barras que se realizaron para determinar el mayor crecimiento en la vegetación de todos los humedales.

## Capítulo 3

### Resultados y Discusión

#### 3.1. Etapa 1

En esta etapa de adaptación, los resultados se analizaron de manera visual. Las *Figuras 2, 3 y 4* muestran las dos especies al momento en que fueron sembradas y alimentadas por primera vez con agua cruda.



**Ilustración 2.** Humedal 1: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 3.** Humedal 2: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 4.** Humedal 3: Especie 1 (Totora) izquierda y Especie 2 (Gramma) derecha.  
**Fuente:** Autoría propia.

Luego de dos meses posteriores a la siembra (*Figuras 5, 6 y 7*), todas las plantas sembradas sobrevivieron, por lo que su adaptación al medio y a las condiciones climáticas fue muy satisfactoria. Se observó que la especie 1 tuvo una adaptación más rápida en comparación a la especie 2.



**Ilustración 5.** Humedal 1: Al finalizar Etapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 6.** Humedal 2: Al finalizar Etapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 7.** Humedal 3: Al finalizar Etapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.

La especie 1 presentó una adaptación más rápida en términos de crecimiento, en relación con la especie 2. En cuanto a su aspecto físico, los individuos siempre se mostraron sanos, puesto que sus tallos nunca variaron de color, y la reproducción de los mismos se mantuvo constante.

### 3.2. Etapa 2

Se analizó el comportamiento de las especies a los distintos tipos de alimentación y descanso: 7-3, 5-5, 3-7; y 7-14. (*Figura 8, Figura 9 y Figura 10*).



**Ilustración 8.** Humedal 1: Etapa 2: Subetapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 9.** Humedal 2: Etapa 2: Subetapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 10.** Humedal 3: Etapa 2: Subetapa 1.  
**Fuente:** Autoría propia.

Las especies se adaptaron satisfactoriamente a los distintos procesos de alimentación y descanso, lo que se manifestó en una notable reproducción de los tallos de la especie 1, y una expansión longitudinal en la especie 2.

Se observó que la grama en el humedal 3 (*Figura 11*) tuvo un mayor crecimiento. Cabe señalar que debido a una fuga en la tubería de alimentación, este humedal tuvo un mayor caudal de alimentación, lo que pudo incidir en su mayor crecimiento.



**Ilustración 11.** Grama Humedal 3.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 12.** Humedal 1: Etapa 2: Subetapa 2.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 13.** Humedal 2: Subetapa 2.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Ilustración 14.** Humedal 3: Etapa 2: Subetapa 2.  
**Fuente:** Autoría propia.

Los diferentes periodos de alimentación y descanso 7-3, 5-5, 3-7 y 7- 14 no presentaron mayores efectos en el crecimiento de la Totora y la Grama; salvo al inicio de los periodos de descanso, sin embargo, no hubo muerte de individuos en ninguno de los casos (*Figura 12, 13 y 14*).

En los tres humedales se observó que algunas de las plantas se secaban, debido a taponamientos en las tuberías de alimentación producto de la acumulación de basura que no permitía el tránsito continuo del agua.

De igual manera se identificó el crecimiento de yerba silvestre, lo que impedía la expansión de la Grama. La obstrucción de las tuberías se solucionó implementando orificios de 15mm de diámetro, evitando la acumulación de sólidos y que las tuberías queden limpias. En cuanto al crecimiento de la yerba silvestre esta fue podada arrancándola manualmente desde la raíz, dejando a la Grama totalmente despejada.



**Ilustración 15.** Presencia de yerba silvestre.  
**Fuente:** Autoría propia.

La Especie 2 presentó un periodo de adaptación mayor en comparación con la especie 1. A pesar de los cambios en su aspecto que señalaban que ciertos individuos se estaban secando, el crecimiento se mantuvo constante y no hubo muerte de ningún individuo. Al variar entre los distintos periodos de alimentación y descanso, esta especie presentaba cierta dificultad para su adaptación al inicio de cada periodo, pero una vez adaptada, su crecimiento era bastante rápido y su resistencia a los periodos de descanso era mayor.

### **3.3. Etapa 3**

En esta etapa se analizó el crecimiento de las plantas en altura y longitud, la remoción de DBO y DQO del agua cruda en los humedales.

También se debe mencionar que para esta etapa ya se pudo observar una capa de lodo de alrededor de 3 cm de altura en el humedal 3. Esta capa de lodo es característica de los humedales estilo Francés, que se forma por la alimentación de las unidades con agua residual cruda, y que incide positivamente en el tratamiento de acuerdo a Molle, (2014). Se pudo observar que esta capa se formó en menor tiempo en comparación a estudios realizados previamente. Esta capa se formó aproximadamente en 5 meses, lo que en comparación con estudios previos debería tomar alrededor de un año (Sperling & Sezerino, 2018). Esta particularidad indica una correcta interacción entre el medio,

las condiciones climáticas, los periodos de alimentación y descanso, y las especies empleadas.

### 3.3.1 Crecimiento y expansión de la vegetación

Se seleccionó una planta de cada especie por cada uno de los humedales. Se realizaban mediciones periódicas de altura y distribución longitudinal de las plantas.

#### **Schoenoplectus californicus (Totora):**

En la **Tabla 4** se presentan los resultados de las mediciones de altura de los tres humedales en cuatro fechas en el transcurso de seis semanas. Los individuos de esta especie presentaron un crecimiento promedio de aproximadamente 160cm. En el humedal 1 el crecimiento promedio fue de 188cm, en el humedal 2 fue de 121cm; y en el humedal 3 de 162cm.

FECHA	HUMEDAL	ALTURA (cm)
20-ene-20	1	60
	2	60
	3	60
14-feb-20	1	200
	2	150
	3	163
28-feb-20	1	205
	2	176
	3	197
6-mar-20	1	248
	2	181
	3	222

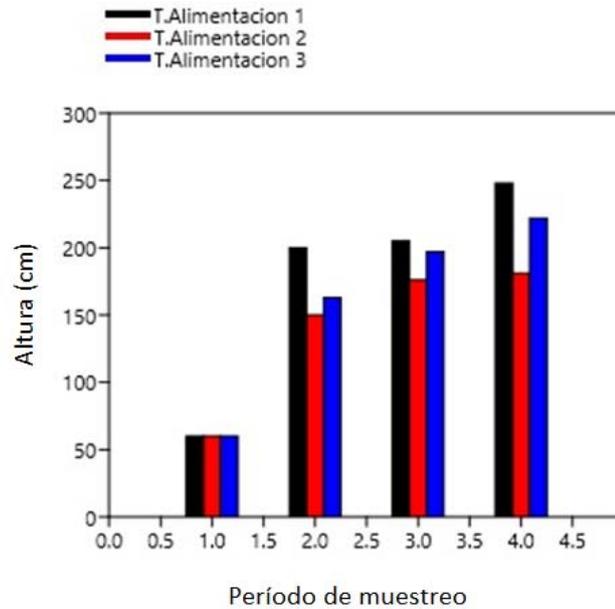
**Tabla 4.** Crecimiento de *Schoenoplectus californicus* (Totora).

**Fuente:** Autoría propia.

Como se observa en la **Tabla 5** y en el **Gráfico 1** al comparar el crecimiento de los individuos, con el tipo de alimentación empleado, se observó que el periodo de 7 días de alimentación y 3 días de descanso, permitió un mejor desarrollo de esta especie, demostrando que a mayor tiempo de alimentación mayor crecimiento.

CRECIMIENTO DE LA TOTORA POR SU TIEMPO DE ALIMENTACION			
Fecha	T. Alimentación 1	T. Alimentación 2	T. Alimentación 3
20-ene-20	60	60	60
14-feb-20	200	150	163
28-feb-20	205	176	197
6-mar-20	248	181	222

**Tabla 5.** Crecimiento por su tiempo de alimentación.  
**Fuente:** Autoría propia.



**Gráfico 1.** Crecimiento de la Totora por los diferentes tiempos de alimentación.  
**Fuente:** Autoría propia.

### **Cynodon dactylon (Gramma):**

Los individuos de esta especie presentaron un crecimiento longitudinal semanal de aproximadamente 37cm. En el humedal 1 el crecimiento promedio fue de 32cm, en el humedal 2 fue de 34cm; y en el humedal 3 de 46cm.

FECHA	HUMEDAL	LONGITUD (CM)
20-ene-20	1	15
	2	15
	3	15
14-feb-20	1	30
	2	32
	3	45
28-feb-20	1	38
	2	41
	3	58
6-mar-20	1	43
	2	47
	3	67

**Tabla 6.** Crecimiento de *Cynodon dactylon* (Gramma).

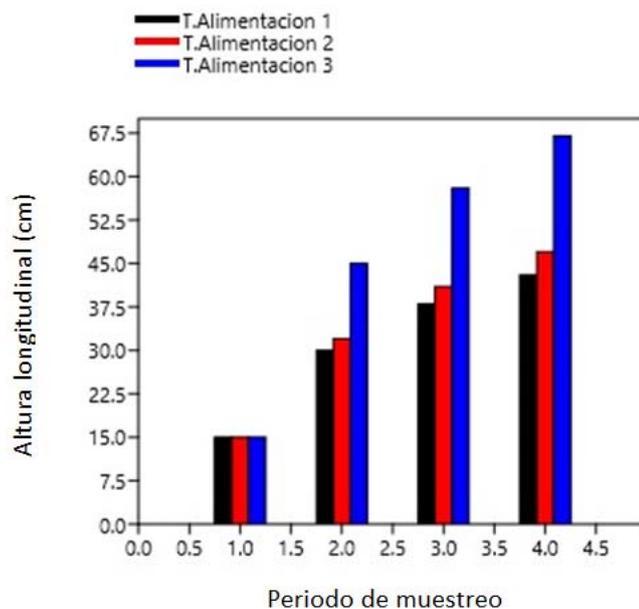
**Fuente:** Autoría propia.

Al comparar el crecimiento de los individuos, con el tipo de alimentación empleado, se observó en la **Tabla 7** y el **Gráfico 2** que el periodo de 3 días de alimentación y 7 días de descanso, permitió un mejor desarrollo de esta especie.

CRECIMIENTO DE LA GRAMA POR SU TIEMPO DE ALIMENTACION			
Fecha	T. Alimentación 1	T. Alimentación 2	T. Alimentación 3
20-ene-20	15	15	15
14-feb-20	30	32	45
28-feb-20	38	41	58
6-mar-20	43	47	67

**Tabla 7.** Crecimiento por los distintos tiempos de alimentación.

**Fuente:** Autoría propia.



**Gráfico 2.** Crecimiento de la Grama por los diferentes tiempos de alimentación.  
**Fuente:** Autoría Propia.

Los valores obtenidos (*Tabla 4 y Tabla 6*) muestran un crecimiento satisfactorio de ambas especies; la Titora como la Grama, presentaron una adecuada adaptación a los diferentes periodos de alimentación y descanso.

Al comparar el crecimiento de la Grama en los tres humedales, en el humedal 3 fue notable un crecimiento mayor que en los humedales 2 y 1. Esto puede estar ligado al mayor volumen de alimentación de agua cruda en el humedal 3 y que también permitió la formación de capa superficial de lodo. Al acrecentar el contenido de sólidos y la intensidad de la carga hidráulica se produce un aumento en el espesor de la capa de lodo y reducción de la porosidad, optimizando la filtración y dando un mayor tiempo de retención hidráulico, que por ende mejora la degradación aeróbica de la materia orgánica. Se concluye que a mayor tiempo de retención hidráulico mejor es el rendimiento del tratamiento(Bui et al., 2018).

Se conoce que la alimentación por intermitencia permite la oxigenación del humedal, aunque en las etapas de descanso se forman grietas debido a la deshidratación de la capa de lodo, lo que reduce el tiempo de retención hidráulico. Sin embargo, este problema se puede combatir con periodos de descanso cortos y con altas cargas hidráulicas que mejoran la eficacia del tratamiento(Bui et al., 2018) .

### 3.4. Análisis Estadísticos: Análisis de correlación y análisis de similitud (PCA y Morisita-Horn)

Se aplicaron un test de correlación de componentes principales (PCA), y un análisis Cluster de similitud (Morisita-Horn), para identificar las relaciones entre los periodos de alimentación y descanso (por horas), y el crecimiento de las especies, en los tres humedales (*Tabla 8*).

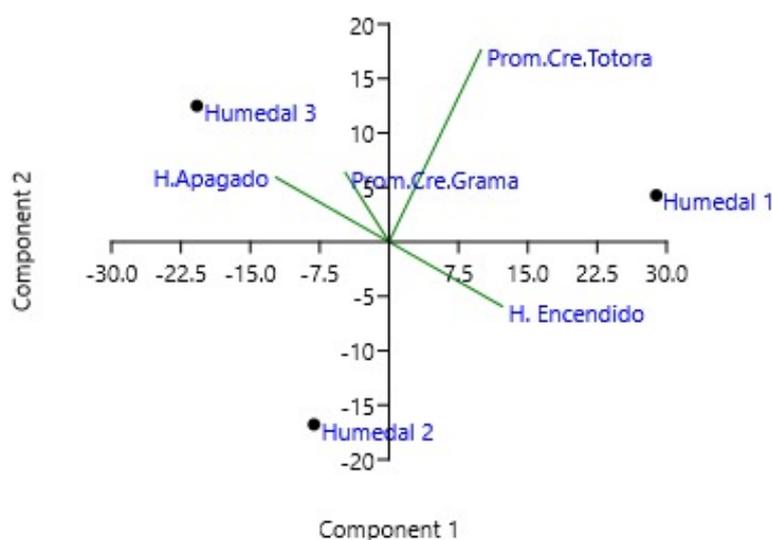
	H.Encendido	H. Apagado	Prom. Cre. Totora	Prom. Cre.Grama
<b>Humedal 1</b>	56	24	178	32
<b>Humedal 2</b>	40	40	142	34
<b>Humedal 3</b>	24	56	161	46

**Tabla 8.** Horas de encendido y apagado y promedio de crecimiento.

**Fuente:** Autonomía propia.

#### 3.4.1. Análisis de correlación PCA

El análisis PCA que se muestra en el *Gráfico 3* indica una correlación existente entre el crecimiento de la Totora y las horas de alimentación en el humedal 1, mientras que el crecimiento de la Grama se relaciona directamente con las horas de descanso en el humedal 3. Finalmente, el humedal 2 se presenta como un "outlier", en el que no se observa una relación entre los diferentes factores analizados.

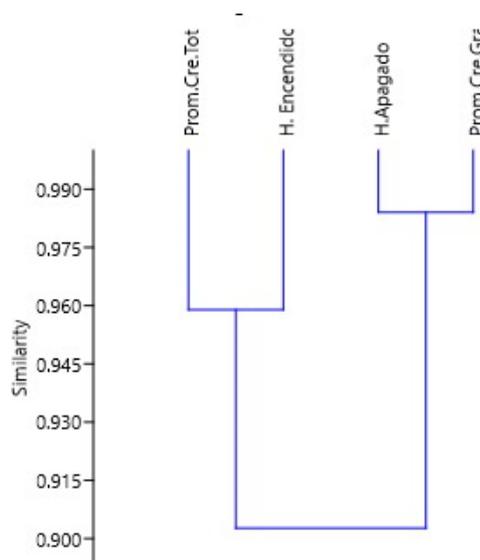


**Gráfico 3.** Correlación (PCA).

**Fuente:** Autonomía propia.

### 3.4.2. Análisis Cluster de similitud (Morisita-Horn)

El análisis de similitud mostrado en el **Gráfico 4** presentó resultados similares a los obtenidos con el PCA, el análisis de cluster señaló una relación mayor la 0,95 entre el crecimiento de la Totora y las horas de alimentación; y una relación mayor al 0,97 entre las horas de descanso y el crecimiento de la Grama.



**Gráfico 4.** Similitud (Morisita-Horn).  
Fuente: Autonomía propia.

### 3.5. Remoción de DBO5 y DQO

Los análisis de DBO5 y DQO (**Tabla 9 y 10**) del agua cruda que ingresó a los humedales y del agua tratada que sale de los mismos, presentó un porcentaje de remoción que varía entre el 30 y el 70 por ciento.

FECHA	CONCENTRACION DE ENTRADA DBO5 (mg/L)	CONCENTRACION DE SALIDA DBO5 (mg/L)	% DE REMOCION
22/1/2020	340	79	77
19/2/2020	167	121	28
	171	118	31

**Tabla 9.** Porcentaje de Remoción DBO5.  
Fuente: Autonomía propia.

FECHA	CONCENTRACION DE ENTRADA DQO(mg/l)	CONCENTRACION DE SALIDA DQO(mg/l)	% DE REMOCION
19/2/2020	292	190	35

**Tabla 10.** Porcentaje de Remoción DQO.  
Fuente: Autonomía propia.

En cuanto al porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> y DQO es necesario recalcar que los valores de entrada (constituidos por agua cruda) se obtuvieron en base a muestras compuestas y los de salida en base a muestras puntuales. Según Pérez (2009) en investigaciones anteriores los porcentajes de remoción varían de acuerdo a si son efluentes secundarios o efluentes primarios. Para efluentes secundarios se han registrado valores de 70 a 95% y para los primarios de 15 a 90%. Nuestro efluente perteneciendo al grupo de los primarios presenta en la primera muestra (77%) un alto porcentaje de remoción, mientras que las dos muestras siguientes (28 y 31%) el porcentaje disminuyó considerablemente.

Silván, Ocaña, Margulis, Barajas, & Cerino (2016) mencionan los valores obtenidos en una investigación realizada en un humedal de flujo subsuperficial utilizando como vegetación *C. papyrus* (Papiro) con características similares a la Totorá, en los cuales los resultados de remoción alcanzados fueron DBO<sub>5</sub>= 37%, DQO= 10%". Al comparar con nuestros humedales se puede considerar nuestro resultado como un valor alto (35%).

## CONCLUSIONES

La Totorá presentó una mayor facilidad de siembra con respecto a la Grama ya que esta tenía raíces más desarrolladas y presentaba mayores facilidades de manipulación.

Las Totoras presentaron una adaptación más rápida a los distintos tiempos de alimentación; mientras que la Grama requirió un mayor tiempo de adaptación, de manera particular al iniciar los tiempos de descanso.

La Grama una vez que se adaptó a los periodos de alimentación por intermitencia tuvo una reproducción y crecimiento constante. Se observó que la presencia de yerba silvestre detenía el crecimiento y reproducción de la Grama. Las especies nativas *Schoenoplectus californicus* (Totorá) y *Cynodon dactylon* (Grama), demostraron ser aptas para su empleo en humedales de flujo subsuperficial vertical estilo francés, bajo las condiciones climáticas de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales en Ucubamba.

La variabilidad en los tiempos de alimentación y descanso de los humedales pilotos no mostraron influir significativamente en el crecimiento y reproducción de las especies empleadas. El inicio de los tiempos de descanso produjo un estrés a la especie *Cynodon dactylon* (Gramma), sin que esto concluya en la muerte de individuos.

Los humedales presentaron un porcentaje de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) entre el 30 y 70% y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 30%, lo que representa un buen porcentaje de efectividad.

A futuro se debería analizar a mayor profundidad el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> y BQO; y realizar pruebas en la Gramma empleando el aumento de caudales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barquilla, P. M., Olivares, J., & Moreno, L. (2016). *Tratamiento no convencional de las aguas residuales urbanas de Tucaní, Venezuela*.
- Bui, J. J. X., Tan, Y. Y., Tang, F. E., & Ho, C. (2018). A tracer study in a vertical flow constructed wetland treating septage. *World Journal of Engineering*, 15(3), 345–353. <https://doi.org/10.1108/WJE-09-2017-0306>
- Catellanos Carvajal, R. (2018). *Estudio de dos alternativas de tecnologías no convencionales para el tratamiento de aguas residuales vertidas en el sector noroeste del humedal Guaymaral en la ciudad de Bogotá*.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.
- Enrique de Azcoitia, T. (2012). *Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales construidos para la depuración de aguas*.
- Estopá Consuegra, S. (2014). Estudio comparativo y dimensionamiento básico de diversas tipologías de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del polígono industrial Moncada III. In *Zaragoza*.
- Gallego Maldonado, D. B. (2015). “Caracterización de las macrófitas del Humedal Meandro Del Say como insumo de las herramientas de conservación”. In *Universidad Santo Tomas*.  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2543/Gallegodiana2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2543/Gallegodiana2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García Zumalacarregui, J. A., & Von Sperling, M. (2018). Performance of the first stage of the French system of vertical flow constructed wetlands with only two units in parallel: Influence of pulse time and instantaneous hydraulic loading rate. *Water Science and Technology*, 78(4), 848–859.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2018.355>
- Grisales, D. (2010). *SISTEMAS NO CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES PARA COMUNIDADES DE DESPLAZADOS EN ESTADO DE*.
- Guerra, B. (2018). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de productos lácteos San Salvador-Cantón Riobamba, mediante fitorremediación con humedales artificiales empleando totora*. 1–76.  
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/4523/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2018-0003.pdf>
- Janet Gil, M., María Soto, A., Iván Usma, J., & Darío Gutiérrez, O. (2012). *Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments*  
*Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos*. 7(2), 52–73. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (C. Press (ed.); Second Edi).  
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=hPDqfNRMH6wC&oi=fnd&pg=>

PP1&dq=wetlands&ots=k7Q47Qf\_9P&sig=hYdw2HNfNm2sUtc0jb04ct97mC  
U#v=onpage&q&f=false

- Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*.
- López, A. P. (2016). *Faculty of Bioscience Engineering Comparative performance evaluation of constructed wetland systems for wastewater treatment*.
- Manjate, E. S. (2016). *Behaviour evaluation of vertical flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage and septic tank sludge*. (Issue September).
- Mena Cabrera, P. A. (2014). Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Mu. In *Http://Digital.Bl.Fcen.Uba.Ar*. “Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://digital.bl.fcen.uba.ar>.”
- Milanes Hernández, E. (n.d.). *Diseño de un humedal subsuperficial de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en la UCLV*.
- Molle, P. (2014). French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*, 69(1), 106–112. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.561>
- Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (2010). *Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas*. 11.
- Mosquera Beltrán, Y. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Tumbaga*, 27.
- Muñoz, J. D. M. (2011). Fitosistemas de tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades. In *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. (pp. 31–60).
- Orjuela Gutierrez, M. I., & Lizarazo Becerra, J. M. (2013). *Sistemas De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia*. 82.
- Padrón Palacios, J. P. (n.d.). “ *Evaluación del desempeño de un sistema piloto de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas en ecosistemas de montaña* ”.
- Patiño, J., & Zhinín, F. (2015). Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel. In *Universidad de Cuenca*.
- Pérez, M. E. (2009). Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango. *Tesis Para La Obtencion Del Grado de Doctor En Ciencia y Tecnología Ambiental*, 102. [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis Ma](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma).

- Rabat, J. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. In *Universidad de Alicante*. <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>
- Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales. *Citme*, 6,8. 13, 30, 34. <https://doi.org/M-30985-2006>
- Rodríguez, M. R., Jácome, A., Molina, J., & Suárez, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 223–235. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72238-8](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72238-8)
- SEMARNAT, & CONANP. (2006). *Dirección de Especies Prioritarias para la Conservación*.
- Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., Barajas, J. R. H., & Cerino, M. J. R. (2016). Evaluation of free flow and subsurface wetlands in wastewater pollutant removal using different vegetation macrophyte species | Evaluación De Humedales Artificiales De Flujo Libre Y Subsuperficial En La Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Utiliz. *Interciencia*, 41(1), 40–47.
- Sperling, M. von, & Sezerino, P. H. (2018). Dimensionamento De Wetlands Construídos No Brasil. Documento De Consenso Entre Pesquisadores E Praticantes. In *Boletim Wetlands Brasil*. <http://gesad.ufsc.br/boletins/>
- Trang, N. T. D., Konnerup, D., Schierup, H. H., Chiem, N. H., Tuan, L. A., & Brix, H. (2010). Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. *Ecological Engineering*, 36(4), 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.11.022>
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Humedales Construidos. Diseño y operación*. 1, 255.
- Zuñiga del Canto, J. (2004). *Influencia del Soporte y Tipo de Macrófita en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal Resumen*.