

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio Politécnico

**INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE UN RESERVORIO EN LA
GRANJA DE LA UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

Luis Esteban Guerra Flores

Ródney Peñafiel, PhD, director de tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de pregrado en
Ingeniería Ambiental

Quito, 18 de diciembre del 2012

Universidad San Francisco de Quito

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDALES
ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE ACEQUIA
EN LA GRANJA DE LA UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

Luis Esteban Guerra Flores

Ródney Peñafiel, PhD.
Director de la Tesis
y Miembro del Comité de Tesis

.....

Valeria Ochoa, PhD.
Miembro del Comité de Tesis

.....

René Parra, PhD.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Santiago Gangotena, PhD.
Decano del Colegio Politécnico

.....

Quito, 18 de diciembre del 2012

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Luis Esteban Guerra Flores

C. I.: 171672317-4

Fecha: 18 de diciembre de 2012

Agradecimientos

A mi familia, mis padres, mi hermano y mi hermana quienes siempre han sido mi apoyo incondicional, ayudando en los momentos difíciles y compartiendo los momentos de alegrías y risas, por siempre actuar como modelos ejemplares de persona y motivar a que siempre busque la superación personal.

Al resto de mi familia, abuelitas, tías, tíos, primos y primas por siempre ser fuente de alegría y emotividad contagiosa.

A Ródney Peñafiel, mi director de tesis, por su apoyo y fe en la realización de este proyecto, por ayudarme y por estar siempre atento y ser mi guía en cada paso que se daba con el proyecto. Por los años de haberme transmitido sus conocimientos, con paciencia y dedicación necesaria.

A René Parra y Valeria Ochoa, por haber tenido la paciencia y dedicación de transmitir sus conocimientos en distintas áreas de mi carrera, siempre haber escuchado a mis inquietudes y con el mejor de los ánimos brindarme una mano. Por siempre mostrar interés en el progreso académico de sus estudiantes.

A las personas que trabajan en la granja, Víctor Hugo, don Sixto y don Jorge por siempre estar dispuestos a ayudarme en detalles durante y después de la instalación del proyecto.

A todos mis amigos y compañeros, por todos los momentos invaluable que he compartido con ellos, por ser siempre una fuente de consejos y ánimos en los momentos más necesarios y por las innumerables carcajadas que hemos compartido y todas aquellas que quedan por compartir.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue diseñar, instalar y monitorear el funcionamiento de humedales para el tratamiento del agua proveniente de un reservorio, con fines de irrigación. Se midieron los siguientes parámetros: DQO total, DQO particulada, sólidos suspendidos totales, coliformes totales, *E. Coli*, oxígeno disuelto, conductividad, pH, turbidez, y amonio. Los resultados de remoción promedio para el humedal de tratamiento y de control respectivamente fueron los siguientes: 88% y 63% de DQO total, 86% y 54% de DQO particulada, 53% y 49% de sólidos suspendidos totales, 65% y 35% de coliformes totales, 80% y 37% de *E. Coli*, 85% y 87% de turbidez, y 42% y 8% de amonio. Los otros parámetros como el oxígeno disuelto y el pH se mantuvieron estables. Los resultados también muestran de manera evidente que el humedal de tratamiento tiene una mayor eficacia que el humedal de control por lo cual se evidencia que la vegetación tiene un rol importante en el tratamiento del agua contaminada. En conclusión los humedales con vegetación presentan remociones de DQO y *E. Coli* del 80% demostrando así su eficiencia.

Abstract

The main objective of this study was to design, install and monitor the operation of constructed wetlands for the treatment of contaminated water from a farm reservoir, and transforming it into usable irrigation water. The parameters monitored were: total COD, particulate COD, total suspended solids, total coliforms, *E. Coli*, dissolved oxygen, electrical conductivity, pH, turbidity and ammonium. The results for the average removal percentage for the treatment wetland and the control wetland respectively were the following: 88% & 63% of total COD, 86% & 54% of particulate COD, 53% & 49% of total suspended solids, 65% & 35% of total coliforms, 80% & 37% of *E. Coli*, 85% & 87% of turbidity, and 42% & 8% of ammonium. The other parameters like dissolved oxygen and pH showed results that remained stable during the monitoring weeks. It is evident from the results that the wetland containing the reeds is more efficient than the control wetland and therefore it has been proven that vegetation plays an important role in contaminated water depuration. In conclusion the artificial wetland with reeds shows removal of COD, and *E. Coli* of 80%, proving the efficiency of this system.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Uso de humedales artificiales.....	5
2.1.	Funcionamiento de un humedal artificial como tratamiento de agua contaminada.....	5
2.2.	Tipos de humedales artificiales.....	8
2.3.	Usos de los humedales artificiales.....	11
2.4.	Diseño y técnicas de construcción teóricas.....	14
2.5.	Uso de humedales artificiales para tratamiento de agua de riego.....	19
3.	Diseño y construcción del proyecto.....	24
3.1.	Ubicación del proyecto.....	24
3.2.	Descripción del sistema de riego de la granja de la USFQ y problemática existente.....	25
3.3.	Diseño humedales del proyecto.....	26
3.4.	Construcción.....	31
3.5.	Operación y funcionamiento.....	34
3.6.	Costos finales de la construcción del proyecto.....	36
4.	Resultados y métodos.....	37
4.1.	Métodos analíticos.....	37
4.2.	Caracterización de agua de riego de la granja de la USFQ.....	42
4.3.	Resultados DQO total, DQO particulada y DQO soluble.....	44
4.4.	Resultados Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, y Sólidos Suspendidos Volátiles.....	52
4.5.	Resultados Coliformes Totales y E. Coli.....	59
4.6.	Resultados Oxígeno Disuelto.....	63
4.7.	Resultados Conductividad.....	65
4.8.	Resultados pH y Turbidez.....	67
4.9.	Resultados Amonio y Nitratos.....	71
5.	Discusión.....	75
5.1.	Discusión DQO total, DQO particulada y DQO soluble.....	75

5.2. Discusión ST, SV, SST y SSV.....	78
5.3. Discusión Coliformes Totales y E. Coli.....	80
5.4. Discusión Oxígeno Disuelto.....	81
5.5. Discusión Conductividad.....	83
5.6. Discusión pH y Turbidez.....	84
5.7. Discusión Amonio y Nitratos.....	85
6. Conclusiones y recomendaciones.....	88
7. Referencias Bibliográficas.....	90
8. Anexos.....	94
8.1. Anexo 1.....	94
8.2. Anexo 2.....	95
8.3. Anexo 3.....	97

Lista de Tablas

Tabla 2.5.1: Parámetros de calidad para agua de riego.....	21
Tabla 4.2.1: Comparación de la caracterización inicial agua del reservorio de la granja, con límites establecidos por el TULSMA.....	42
Tabla 4.3.1: Eficiencias de remoción porcentual de DQO para humedales de tratamiento y control.....	46
Tabla 4.3.2: Eficiencias de remoción porcentual de DQO particulada para humedales de tratamiento y control.....	49
Tabla 4.3.3: Eficiencias de remoción porcentual de DQO soluble para humedales de tratamiento y control.....	51
Tabla 4.4.1: Eficiencias de remoción porcentual de SV para humedales de tratamiento y control.....	55
Tabla 4.4.2: Eficiencias de remoción porcentual de SST para humedales de tratamiento y control.....	57
Tabla 4.4.3: Eficiencias de remoción porcentual de SSV para humedales de tratamiento y control.....	59
Tabla 4.5.1: Resultados Coliformes Totales y porcentajes de remoción para humedales de tratamiento y control.....	60
Tabla 4.5.2: Resultados <i>E. Coli</i> y porcentajes de remoción para humedales de tratamiento y control.....	62
Tabla 4.7.1: Porcentaje de incremento de conductividad en los humedales de tratamiento y de control.....	67
Tabla 4.8.1: Porcentaje de remoción de turbidez en los humedales de tratamiento y de control.....	70
Tabla 4.9.1: Porcentaje de eficiencia de remoción NH₄⁺.....	73
Tabla 5.1: Resumen de % remoción de distintos contaminantes para el humedal de	

tratamiento y el humedal de control.....75

Tabla A1.1: Costos de materiales de construcción.....94

Tabla A2.2: Parámetros necesarios para calcular TS, VS, TSS y VSS.....95

Lista de Figuras

Figura 2.2.1: Figura total es un sistema tipo mixto, la parte izquierda de la figura es un sistema de macrófitas flotantes y la parte derecha de la figura es un sistema de macrófitas emergentes.....	9
Figura 2.2.2: (A) Sistema de acuicultura de flujo horizontal. (B) Sistema de flujo horizontal superficial. (C) Sistema de flujo horizontal subsuperficial. (D) Sistema de flujo vertical.....	11
Figura 2.3.1: Humedal de flujo horizontal construido junto a la comunidad Cinco de Marzo y que descarga al río Navajuelos. Las aguas negras de la colonia desembocan directamente en el humedal artificial.....	12
Figura 2.3.2: Se muestra una de las distintas combinaciones de humedales en Queensland, Australia. Se tiene al comienzo una celda con una laguna de estabilización, seguido de dos celdas de un humedal con flujo horizontal superficial y finalmente una celda con un estilo de humedal de flujo horizontal subsuperficial.....	13
Figura 2.4.1: Se muestra un esquema de cómo debería quedar diseñado un humedal de flujo horizontal subsuperficial típico.....	19
Figura 3.1.1: Mapa ubicación del proyecto.....	24
Figura 3.3.1: (A) Planos vista aérea; (B) Planos vista de un corte transversal.....	28
Figura 3.3.2: (A) Modelo del flujo en los humedales; (B) Diseño de la capa impermeable.....	30
Figura 3.4.1: Sistema de bombeo de recirculación, se succiona agua desde el fondo del reservorio, y el efluente se lo descarga en la superficie del reservorio.....	32
Figura 3.4.2: Humedales artificiales de la granja, en la izquierda se encuentra el humedal de control y a la derecha el humedal con las macrófitas. Se muestra que el sistema de alimentación es por medio de tuberías perforadas, cada humedal recibe un caudal promedio de 1.188 m³/hora, y un total de 2.376 m³/hora.....	34
Figura 4.2.1: Puntos de muestreo en los humedales.....	43
Figura 4.3.1: (A) Gráfica DQO vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del	

humedal de tratamiento.....	44
(B) Gráfica DQO vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de control.....	45
Figura 4.3.2: (A) Gráfica DQO particulada vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.....	47
(B) Gráfica DQO particulada vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	48
Figura 4.3.3: (A) Gráfica DQO soluble vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.....	50
(B) Gráfica DQO soluble vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	51
Figura 4.4.1: (A) Gráfica ST vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de tratamiento.....	52
(B) Gráfica ST vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de control.....	53
Figura 4.4.2: (A) Gráfica SV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.....	54
(B) Gráfica SV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	55
Figura 4.4.3: (A) Gráfica SST vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.....	56
(B) Gráfica SST vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	57
Figura 4.4.4: (A) Gráfica SSV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento; (B) Gráfica SSV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	58
Figura 4.6.1: (A) Gráfica OD vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de tratamiento.....	63
(B) Gráfica OD vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de control.....	64
Figura 4.7.1: (A) Gráfica conductividad vs puntos de muestreo en un periodo de 8	

semanas del humedal de tratamiento.....	65
(B) Gráfica conductividad vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de control.....	66
Figura 4.8.1: (A) Gráfica pH vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento; (B) Gráfica pH vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	68
Figura 4.8.2: (A) Gráfica turbidez vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.....	69
(B) Gráfica turbidez vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.....	70
Figura 4.9.1: (A) Gráfica NH₄⁺ vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas del humedal de tratamiento; (B) Gráfica NH₄⁺ vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas del humedal de control.....	72
Figura 4.9.2: Gráfica NO₃ vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas en ambos humedales se detectaron concentraciones inferiores a 1 mg/L control.....	74
Figura A2.3.1: Petrifilm con colonias de E. Coli (azules junto a burbuja de gas) y Coliformes Totales (rojas junto a burbuja de gas).....	96

CAPÍTULO I

Introducción

Los humedales son sistemas permanente o temporalmente inundados en los cuales crecen diversos tipos de vegetación y también una alta diversidad de invertebrados terrestres y acuáticos. En la Convención Mundial Sobre los Humedales (RAMSAR) se los ha definido de la siguiente manera: “extensiones de marismas, pantanos y tuberías, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.” [1] Se entiende que el principal actor dentro del sistema de humedales, es el agua, por lo tanto el abastecimiento o falta del recurso otorgan características distintas a cada humedal. Cambios extremos en el ambiente como la sequía o lluvias prolongadas dotan de las características únicas al humedal, estos cambios han promovido que la diversidad biológica desarrolle adaptaciones para poder sobrevivir. Los humedales también varían acorde a la altura del piso climático donde se encuentran, sobre los 2800 m.s.n.m. son conocidos como humedales de páramo [1].

La cada vez creciente conciencia ambiental ha llevado a buscar maneras de disminuir e inclusive eliminar el impacto ambiental que se tiene sobre el planeta. Uno de los principales recursos que se ve afectado por la actividad humana es el recurso agua. Los ríos tienen la capacidad de autodepuración por lo cual se pensaba que no había problema al descargar agua contaminada en ellos [2]. Esto continuó hasta que la contaminación superó los niveles de tolerancia de los ríos. La exigente demanda del agua junto al hecho de que es un recurso

limitado, ha obligado a buscar maneras de recuperación y posteriormente reutilización de tan preciado recurso. Una de las técnicas actuales empleadas para el tratamiento de agua residual, es la utilización de humedales artificiales. El estudio de los humedales ha demostrado que el agua se purifica debido a organismos biológicos que consumen los contaminantes y también se filtra al pasar formaciones rocosas y material poroso que contenga el suelo. Con este conocimiento se ha podido implementar este tratamiento natural que recibe el agua, a un sistema de humedales artificiales para tratar agua contaminada de distintos orígenes. En un humedal artificial se trata de imitar las características y condiciones de un humedal natural en un lugar estratégico donde se tenga una descarga de agua contaminada que sale de un proceso. El uso para el tratamiento de agua residual es de especial utilidad para sectores cuyos contaminantes son principalmente orgánicos y que ya han pasado por un pre tratamiento y tratamiento primario, convirtiendo a esta técnica en un tratamiento secundario.

En el Ecuador se ha implementado y ejecutado en distintos sectores, un ejemplo es el que se realizó en la provincia de Loja en el río Guayabal por la Ing. Sonia L. Gonzaga [3]. El río es utilizado por la gente de la localidad como fuente de agua para uso agrícola. El principal problema es que existen descargas por partes de industrias, una de ellas la industria azucarera que descargaba sus desechos al río directamente. El tratamiento elegido fue una combinación de lagunas de estabilización como tratamiento primario, y un sistema de humedales artificiales a manera de tratamiento secundario. Finalmente el agua saliente de ambos tratamientos se la descarga al río [3]. En el sector doméstico, actualmente, en otros países, se utilizan diseños de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises producidas en edificios para darle un uso posterior en el lavado de pisos, llenado de inodoros y/o riego de jardines. Este tipo de

tratamiento es efectivo, de bajo costo e inclusive se reduce el impacto paisajístico ya que se puede seleccionar vegetación característica del lugar en donde se encuentra.

Las aguas residuales domésticas provenientes de poblaciones de Tumbaco, pueden tener contacto con las fuentes de agua del lugar. Muchas de las granjas existentes en el lugar del proyecto dependen de un sistema de provisión de agua de una acequia, al entrar en contacto con descargas humanas estas aguas se pueden contaminar con materia orgánica y microorganismos patógenos. Un pre tratamiento para las aguas provenientes de la acequia ligeramente contaminadas es necesario antes de usarla para irrigación de cultivos vegetales para que cumpla con las regulaciones de calidad de agua de riego vigentes en el Ecuador.

En este proyecto se realizó una caracterización de aguas preliminar y los resultados se utilizaron como referencia para poder evaluar la eficiencia del humedal artificial. El efluente del humedal debe ajustarse a los parámetros establecidos por las normativas para uso agropecuario. El tratamiento del agua mediante el uso de humedales artificiales es eficaz en su purificación ya que en las raíces de las plantas (carrizos, *Arundo donax*) se sitúan microorganismos que se encargan de depurar los contaminantes residuales del agua [1]. Un sistema de pre-tratamiento del agua de riego mediante humedales artificiales en este caso es viable ya que Tumbaco es una zona cálida y la temperatura es estable, lo cual es propicio para el desarrollo de la vegetación típica de un humedal [4].

Este proyecto sirve como base para la replicación de este mismo sistema en otros lugares donde sea necesario. La implementación de humedales se ha venido utilizando desde hace muchos años atrás. A finales de los años 90 los humedales naturales eran utilizados para el tratamiento de aguas residuales [4].

El objetivo de este proyecto es el evaluar la depuración del agua de acequia en un humedal artificial utilizando el carrizo como vegetación. Los objetivos específicos de este proyecto son:

1. Caracterizar las muestras del agua de acequia por medio de análisis en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de USFQ.
2. Diseñar y construir un humedal artificial en el terreno donde se encuentra el reservorio de agua de la granja de la USFQ, con las dimensiones establecidas.
3. Evaluar el desempeño del humedal artificial en relación al uso de su efluente para riego.

CAPÍTULO II

Uso de humedales artificiales

2.1 Funcionamiento de un humedal artificial como tratamiento de agua contaminada

Una planta de tratamiento de agua residual es básicamente un ecosistema confinado en el cual para obtener los resultados de depuración deseados, se controla meticulosamente la operación, por lo tanto se lo considera como un “ecosistema forzado.” [5] Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden clasificar, debido a sus requerimientos energéticos y sus costos de mantenimiento, en dos distintas clases: los sistemas convencionales que requieren de bombas, aireadores y otros tipos de equipos necesarios para su funcionamiento; y el otro tipo de sistema es de bajo costo, donde los requerimientos de equipos son mínimos y sus costos de mantenimiento son bajos, pero tienen la desventaja de que el espacio necesario para su funcionamiento es mucho mayor al de los sistemas convencionales. Dentro de este último tipo de sistema entra el tratamiento de agua contaminada por medio de humedales artificiales [5].

Para el funcionamiento de un humedal artificial tiene que existir una fuente de alimentación de agua contaminada que después de atravesar el humedal saldrá como agua tratada. El tratamiento del agua contaminada depende de la interacción de dos factores, el medio filtrante (suelo) y “el ecosistema conformado por la rizosfera (sección del suelo en inmediato contacto con las raíces, en donde ocurre la interacción con microorganismos) y las poblaciones microbianas adheridas al medio y las raíces [6].” El factor principal de un humedal artificial son las macrófitas acuáticas, plantas que se desarrollan en suelos

saturados de agua. En el caso de este estudio la macrófita es el *Arundo donax* que comúnmente se lo conoce como carrizo [7]. La importancia de las macrófitas en el humedal artificial radica en el hecho de que las mismas pueden asimilar los contaminantes dentro de sus tejidos, como nutrientes y elementos traza; sirven como canales de transporte de gases desde la atmósfera hacia los sedimentos y también sus raíces sirven como superficies de contacto donde organismos encargados de degradar la materia orgánica pueden acoplarse y crecer. Otro factor importante es el tipo de suelo, usualmente se utiliza grava u otro tipo de suelo que tenga alta porosidad para que el flujo del agua sea homogéneo y tenga un tiempo de residencia menor. Finalmente los microorganismos, que se encuentran en las raíces de las plantas o en el medio filtrante (suelo), cumplen un rol muy importante ya que son los encargados de transformar contaminantes orgánicos e inorgánicos en compuestos inocuos e insolubles [8].

Lo que puede ocurrir con los contaminantes del agua dentro del humedal artificial depende del tipo y naturaleza del mismo, este puede ser: sedimentado, filtrado, absorbido por el suelo, degradado por acción microbiológica y/o transformado. En el agua residual se tienen diversos tipos de contaminantes, pero los de mayor importancia para este tema son los siguientes: materia orgánica, materia suspendida (sólidos), nitrógeno (puede estar en forma de amonio o nitratos), fósforo, metales pesados, trazas de contaminantes orgánicos y patógenos. A continuación se explica cómo cada uno de estos contaminantes son eliminados y/o transformados de manera distinta en el humedal artificial [9]:

- Materia orgánica: existe una reducción de la DQO soluble por acción de microorganismos aerobios facultativos y anaerobios que crecen en la superficie de

las raíces de las plantas, y existe una eliminación de la DQO particulada por procesos físicos como la absorción, filtración y sedimentación [9].

- Materia suspendida: se remueve por procesos de filtración y sedimentación en el lecho de suelo [9].
- Nitrógeno: se elimina por procesos de asimilación de las plantas a sus tejidos, también por procesos de nitrificación y desnitrificación, y también por un proceso de volatilización [9].
- Fósforo: existe una reducción por asimilación a los tejidos de la planta y microorganismos, y también por sedimentación [9].
- Metales pesados: existe sedimentación y también las plantas los absorben [9].
- Trazas de contaminantes orgánicos: existe una reducción debido a la biodegradación, volatilización y absorción [9].
- Patógenos: existe una disminución de los mismos debido a su muerte natural, radiación ultravioleta (UV), depredación y las raíces de las plantas secretan antibióticos [8]. Realmente no existe un estudio que explique cómo es posible que las raíces de las plantas inhiban y al mismo tiempo promuevan el crecimiento bacteriano. Sin embargo es conocido que las raíces de las plantas secretan compuestos con dos funciones conocidas, la primera es una función dependiente del gradiente para expulsar desechos (función muy poco estudiada) y la segunda son compuestos producidos para función de defensa. Para mejor comprensión de la relación entre la planta y los microorganismos, se dividen en dos tipos de interacciones, la positiva y la negativa. La interacción positiva se da cuando los microorganismos aportan a la planta, ya sea con nutrientes (fijando el nitrógeno

atmosférico), promoviendo el crecimiento de la planta, o brindando protección contra otros organismos como hongos u otro tipo de bacteria. Al mismo tiempo la planta aporta con sitios de adhesión, oxígeno u otros factores (un tipo de bacterias que se conoce tienen interacción positiva son las rizobacteria). La interacción negativa se da cuando la planta reconoce que el microorganismo es un patógeno, comienzan a liberar fitoalexinas (proteínas de defensa) y otros químicos desconocidos. La liberación de metabolitos secundarios por parte de la planta y del microorganismo es lo que actúa como señal para que la planta inicie el proceso o de cooperación mutuo o de defensa [10].

Se espera que en el agua proveniente de un tratamiento por humedales artificiales se evidencie la reducción de los contaminantes mencionados y en base al porcentaje de eliminación de contaminantes evaluar la efectividad del mismo. Otros factores importantes a tomar en consideración son: el pH, la conductividad y la turbidez del agua [8].

2.2 Tipos de humedales artificiales

Existen dos maneras de clasificar a los humedales artificiales, una es por medio de la vegetación utilizada y otra manera es por la manera del flujo del agua de alimentación.

El tipo de macrófitas utilizadas determina el tipo de humedal puesto que existen tres distintos tipos de sistemas dependientes del tipo de vegetación elegida, existe el sistema de macrófitas flotantes, el sistema de macrófitas emergentes y un sistema mixto. El sistema de macrófitas flotantes, teniendo como vegetación dominante en muchos casos al jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y/o la lenteja de agua (*Lemna minor*), es un tipo distinto de humedal ya que no requiere del suelo como base para que se desarrolle la vegetación y es a

manera de estanque (ver fig. 2.2.1). El sistema de macrófitas emergentes en cambio sí depende de que las raíces de las plantas tengan contacto con el suelo (ver fig. 2.2.1), sin embargo pueden estar parcialmente sumergidas en el agua, unos ejemplos son: el junco (*juncus sp.*), caña común ó carrizo (*Arundo donax*) y la guadilla (*dendrocalamus sp.*). Finalmente el tercer sistema utiliza un nivel de agua dentro del humedal tal que se puedan desarrollar los dos tipos de macrófitas (ver fig. 2.2.1) [6]. Existe un cuarto tipo en el cual se utilizan algas en lugar de macrófitas, en este sistema la degradación de la materia orgánica se da por una cooperación entre los microorganismos y las algas, las algas proveen del oxígeno requerido y los microorganismos excretan compuestos minerales necesarios para la nutrición de las algas. Este tipo de sistema requiere de estanques de poca profundidad y a la vez bajo tiempo de retención hidráulica [5].

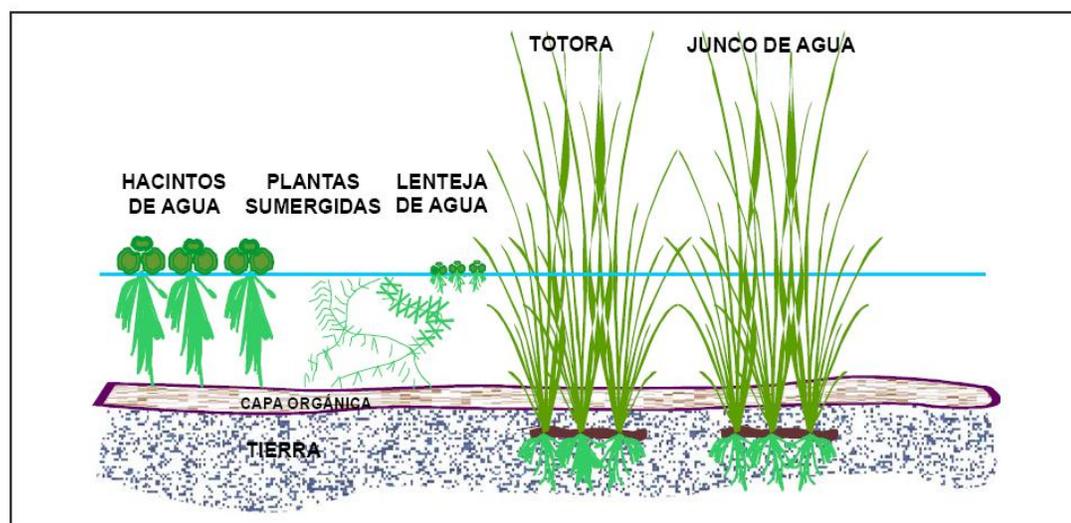


Figura 2.2.1: Figura total es un sistema tipo mixto, la parte izquierda de la figura es un sistema de macrófitas flotantes y la parte derecha de la figura es un sistema de macrófitas emergentes [4].

Dependiendo del tipo de flujo del agua de alimentación, se pueden tener dos tipos de humedales artificiales, el humedal de flujo horizontal y el humedal de flujo vertical.

En el sistema de flujo horizontal el agua ingresa al humedal por un extremo del mismo y recorre toda su longitud hasta alcanzar su otro extremo, una característica es que este tipo de flujo es comúnmente laminar lo que facilita la sedimentación de material particulado. Se subdivide en tres tipos de humedales, el sistema de estanques ó sistema de acuicultura, el sistema de flujo superficial y el sistema de flujo subsuperficial (ver fig. 2.2.2). El sistema de acuicultura es un humedal donde no se utiliza un tipo de suelo a manera de filtro ya que la vegetación que se utiliza son macrófitas flotantes o algas como se había explicado previamente. En este tipo de sistema la recolección del agua se da justo por debajo de las raíces de la vegetación como se puede ver en la figura 2.2.2A. En el sistema de flujo superficial si se requiere de un tipo de suelo filtrante y es aquel donde el nivel del agua está por encima del nivel del suelo, esto da a lugar a que se pueda utilizar un sistema mixto de plantas flotantes y emergentes. El agua que sale se la recoge a la misma altura del nivel del agua como se ve en la figura 2.2.2B. Uno de los problemas con este tipo de humedal es con la hojarasca que es transportada por el agua y puede taponar tuberías e implica un mayor costo de mantenimiento. Finalmente en el sistema de flujo subsuperficial se tiene que el flujo del agua ocurre por debajo del nivel del suelo, en este tipo de sistema se puede utilizar solamente macrófitas emergentes. El agua saliente del tratamiento se la recoge en lo más profundo del humedal como se aprecia en la figura 2.2.2C [11].

El humedal de flujo vertical, es aquel donde el agua de alimentación es transportado por una tubería porosa por sobre y a lo largo del humedal para que se lo alimente a manera de goteo, el agua saliente se la recoge al fondo del mismo por otra tubería porosa como se puede observar en la figura 2.2.2D. El problema con este tipo de sistema es que el agua tiene un menor tiempo de retención y por lo tanto menor tiempo de tratamiento [11].

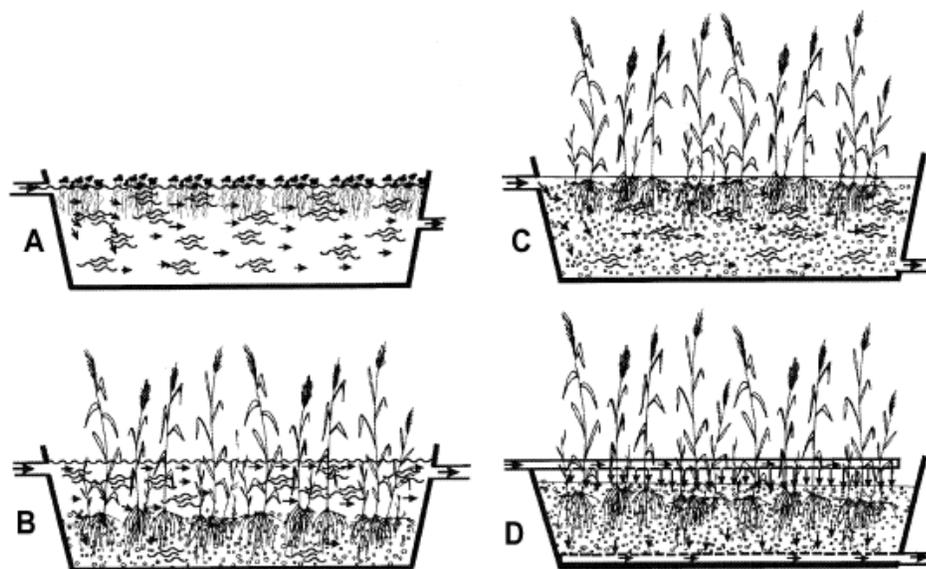


Figura 2.2.2: (A) Sistema de acuicultura de flujo horizontal. (B) Sistema de flujo horizontal superficial. (C) Sistema de flujo horizontal subsuperficial. (D) Sistema de flujo vertical [11].

2.3 Usos de los humedales artificiales

El uso de humedales artificiales, a pesar de ser exclusivamente para el tratamiento de agua contaminada, tiene diversos usos en el sentido de que se los puede utilizar en distintas áreas como la agrícola, la doméstica y la industrial [11]. A continuación se presenta algunos de los ejemplos de los distintos usos de los humedales artificiales, con sus diversos objetivos y tipos de construcción.

El primer caso de un humedal construido con el propósito de tratar aguas residuales domésticas es el de la colonia Cinco de Marzo ubicada en Chiapas, México. Esta colonia no es reconocida como una entidad jurídica dentro de la ciudad y por esta razón no cuentan con servicios básicos como agua potable o de saneamiento. Solamente un sector de la colonia tiene acceso a un sistema de alcantarillado y el resto utiliza letrinas de hoyo. El sector de la colonia Cinco de Marzo que tiene acceso al sistema de alcantarillado, es el

principal beneficiado de la construcción del humedal artificial. Al final de esta alcantarilla se colocó este humedal de flujo horizontal para que funcione como un tratamiento para disminuir la contaminación en el río Navajuelos (ver fig. 2.3.1). Este río es de mucha importancia para la comunidad ya que lo utilizan para lavar su ropa y como fuente de agua para sus animales, y el riesgo que corren es tanto por contacto directo como por contacto indirecto. Lo que han logrado con este tratamiento es disminuir la probabilidad de contacto con organismos patógenos y por consecuencia disminuir el riesgo de contraer enfermedades tanto en humanos como en los animales. A futuro tienen la expectativa de que el valor de la propiedad incremente, y con una mejor calidad de agua del río poder utilizarla para distintas labores como cocinar u actividades recreativas [12].

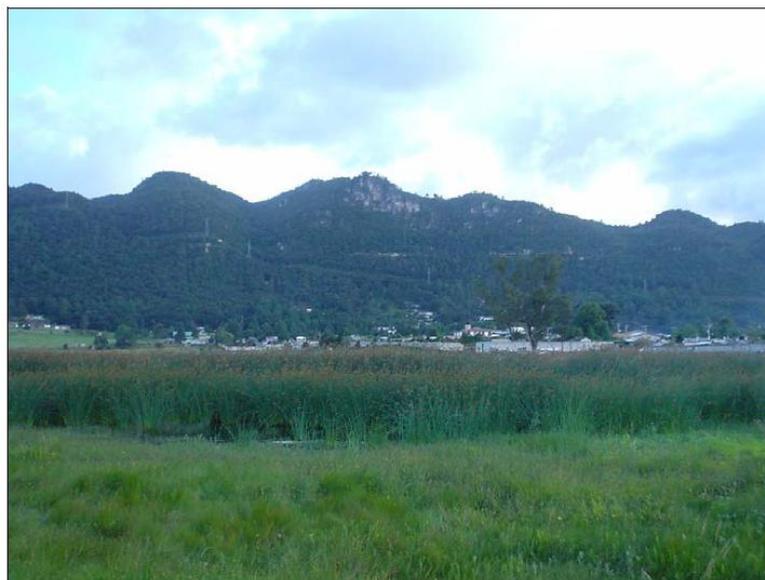


Figura 2.3.1: Humedal de flujo horizontal construido junto a la comunidad Cinco de Marzo y que descarga al río Navajuelos. Las aguas negras de la colonia desembocan directamente en el humedal artificial [12].

Otro ejemplo es el de uno construido en Ecuador en la provincia de Loja en el río Guayabal [3]. Este río es utilizado por la gente de la localidad como fuente de agua para uso agrícola

y lo utilizan para la pesca. El principal problema es que existen descargas por partes de industrias, una de ellas la industria azucarera MALCA la cual descargaba sus desechos al río directamente. El tratamiento elegido fue una combinación de lagunas de estabilización como tratamiento primario, y un sistema de humedales artificiales a manera de tratamiento secundario. Después de pasar por el humedal, el agua del efluente se descarga directamente al río Guayabal ya que al pasar por el tratamiento, esta cumple con los parámetros establecidos por el ministerio del ambiente del Ecuador [3].

Además de que se los pueda utilizar a los humedales artificiales como un tratamiento para aguas residuales domésticas e industriales, es también interesante analizar que existen distintas maneras y combinaciones que se pueden hacer para adecuarse a las necesidades que se tenga. Un ejemplo de esto se puede observar en Queensland, Australia donde se han construido humedales de manera combinada con lagunas de estabilización, y también las combinaciones de los distintos tipos de sistemas explicados en la sección 2.2. Esto para dar tratamiento a agua residual para que pueda ser utilizada como agua de riego (ver fig. 2.3.2) [13].

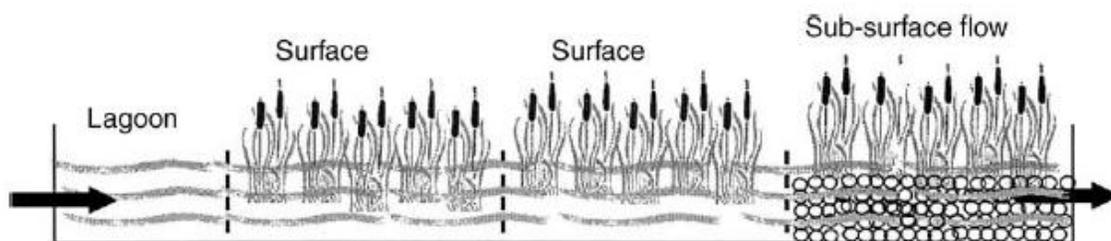


Figura 2.3.2: Se muestra una de las distintas combinaciones de humedales en Queensland, Australia. Se tiene al comienzo una celda con una laguna de estabilización, seguido de dos celdas de un humedal con flujo horizontal superficial y finalmente una celda con un estilo de humedal de flujo horizontal subsuperficial [13].

2.4 Diseño y técnicas de construcción teóricas

Una vez que se ha seleccionado el tipo de humedal que se desea construir, se procede a obtener las dimensiones del humedal, basado en el caudal que se tiene y también la eficiencia de remoción que se desea [14]. Teóricamente se asume que el espacio del cual se dispone no tiene límite lo que permite que el diseño se ajuste perfectamente a los cálculos realizados, algo que rara vez sucede en la práctica. Para razones de este estudio se presenta las ecuaciones y técnicas de construcción utilizadas para un humedal de flujo horizontal y no las de un humedal de flujo vertical. Para realizar la construcción de un humedal artificial de flujo horizontal se tiene que conocer algunos factores. Se necesita conocer el caudal de agua que ingresa al sistema, la porosidad del medio (suelo), y se tiene que decidir el porcentaje de pendiente que va a existir teniendo en cuenta que no debe ser mayor al 3% (m/m) para que el flujo sea uniforme [14]. También se debe tener en cuenta la profundidad a la que hay que sembrar las macrófitas ya que dependiendo del tipo, va a variar la penetración de sus raíces. Realizar una caracterización del agua que ingresa al humedal también es importante para conocer la concentración de contaminantes que se debe tratar. En este caso conocer la demanda bioquímica de oxígeno es importante para determinar el área superficial del humedal.

Con estos datos se puede proceder a calcular las dimensiones que va a requerir el humedal tanto para tratar el caudal de agua que ingresa, como para reducir la contaminación a las cantidades deseadas [14]. Las siguientes ecuaciones son las que se utilizan para obtener las dimensiones de área transversal del lecho dentro del humedal y el área superficial del humedal, partiendo de la ecuación de Darcy [14].

$$Q = K_D \frac{(h_1 - h_2)}{L} A_c$$

$$S = \frac{(h_1 - h_2)}{L} \rightarrow Q = K_D S A_c$$

$$A_c = \frac{Q}{K_D S} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

$A_c = \text{área transversal del lecho (m}^2\text{)}$

$K_D = \text{conductividad hidráulica Darciana } \left(\frac{m}{s}\right)$

$L = \text{Longitud del humedal } \left(\frac{m}{s}\right)$

$h_1 \text{ y } h_2 = \text{diferencia de alturas del agua sobre el plano referencial } \left(\frac{m}{s}\right)$

$S = \text{pendiente longitudinal del humedal } \left(\frac{m}{m}\right)$

$Q = \text{caudal que ingresa al sistema } \left(\frac{m^3}{s}\right)$ [14]

Para la ecuación 2.1 en el caso de este estudio se utiliza una conductividad hidráulica Darciana para arena de grano intermedio, considerando que dicha arena tiene un rango de diámetro de partícula entre 0,25 mm – 1 mm y una porosidad típica entre 0.3 y 0.4 [15]. La conductividad hidráulica para este tipo de arena tiene un valor de $4.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ [16]. A continuación se presenta la ecuación para obtener el área superficial del humedal, partiendo de la ecuación de una reacción de primer orden para un sistema de flujo de pistón (ver Anexo 3) [14]:

$$\frac{dC}{dt} = -K_T C$$

Se desarrolla la ecuación y se obtiene lo siguiente:

$$A_S = \frac{[Q(\ln C_0 - \ln C_e)]}{K_T d n} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

$$A_S = \text{área superficial del humedal (m}^2\text{)}$$

$$K_T = \text{constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d}^{-1}\text{)}$$

$$d = \text{profundidad del lecho (m)}$$

$$n = \text{porosidad del medio } \left(\frac{m}{m}\right) \text{ adimensional}$$

$$Q = \text{caudal que ingresa al sistema } \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$C_0 = \text{concentración DQO afluente } \left(\frac{mg}{l}\right)$$

$$C_e = \text{concentración DQO efluente } \left(\frac{mg}{l}\right) \text{ [14]}$$

Para calcular K_T se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_T = K_{20} * 1.06^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Dónde:

$$K_T = \text{constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d}^{-1}\text{)}$$

$$K_{20} = 1.104 \text{ d}^{-1} = \text{constante de reacción de primer orden a } 20^\circ\text{C (d}^{-1}\text{)}$$

$$T = 17 \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ [6]}$$

Es importante mencionar que este tipo de diseño es para un sistema de flujo tipo pistón y no específicamente para un tratamiento con humedales. Finalmente con el resultado de la

ecuación 2.2 se puede determinar el tiempo de retención hidráulico que va a tener el humedal y esto se lo hace por medio de la siguiente ecuación [6]:

$$Q = \frac{V_{H2O}}{t}$$

$$Q = \frac{A_S * d * n}{t}$$

$$t = \frac{A_S * d * n}{Q} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Dónde:

$A_S = \text{área superficial del humedal (m}^2\text{)}$

$t = \text{tiempo de retención hidráulico (d)}$

$d = \text{profundidad del humedal (m)}$

$n = \text{porosidad del medio } \left(\frac{m}{m}\right) \text{ adimensional}$

$Q = \text{caudal que ingresa al sistema } \left(\frac{m^3}{s}\right)$ [6]

Con estas ecuaciones se puede determinar, de acuerdo a las preferencias, las dimensiones de la longitud, el ancho y la profundidad del humedal siempre y cuando se ajusten a los resultados obtenidos. Se recomienda que la relación largo/ancho de un humedal debe ser de 3:1 o 10:1 dependiendo del caudal que se deba tratar [14]. En la figura 2.4.1 se muestra cómo debería lucir un humedal de flujo horizontal (en el caso de la figura es un humedal de flujo horizontal subsuperficial).

Otros cálculos importantes que se deben realizar son para la carga hidráulica y la carga de contaminantes que ingresan a un humedal. La carga hidráulica se obtiene con la siguiente ecuación [17]:

$$HLR = \frac{Q}{A_s} * 86400 \frac{s}{día} \text{ ecuación 2.5}$$

$$HLR = \text{carga hidráulica} \left(\frac{m}{día} \right)$$

$$Q = \text{caudal del afluyente} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Con estos datos se puede obtener la carga orgánica, la carga de sólidos suspendidos y la carga de patógenos reemplazando los datos de las mediciones, en la siguiente ecuación [17]:

$$LR = \frac{C * Q}{A_s} * \frac{86400 \left(\frac{s}{día} \right) * 1000 \left(\frac{l}{m^3} \right)}{1000 \left(\frac{mg}{kg} \right)}$$

$$LR = HLR * C * \frac{86400 \left(\frac{s}{día} \right) * 1000 \left(\frac{l}{m^3} \right)}{1000 \left(\frac{mg}{kg} \right)} \text{ ecuación 2.6}$$

$$LR = \text{carga (ya sea orgánica de sólidos suspendidos o de patógenos)} \left(\frac{kg}{m^2 * día} \right)$$

$$C = \text{concentración DQO, SS o patógenos afluyente} \left(\frac{mg}{l} \right)$$

$$Q = \text{caudal que ingresa al sistema} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$A_s = \text{área superficial humedal} (m^2)$$

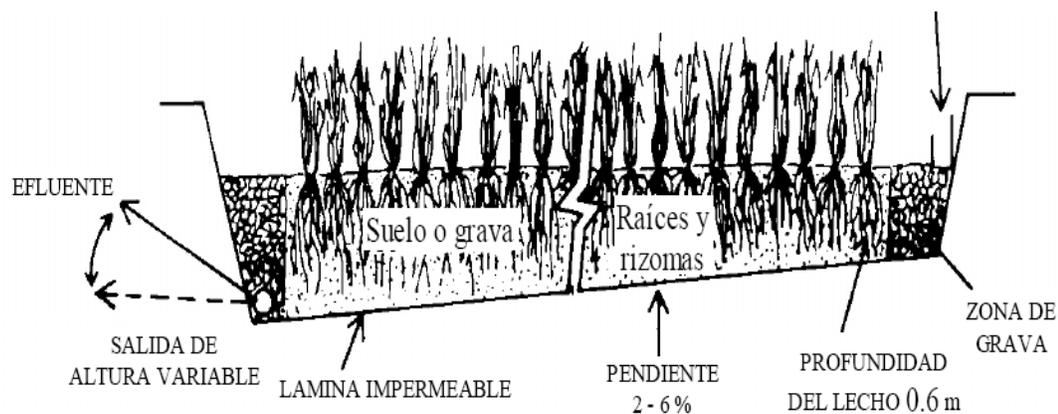


Figura 2.4.1: Se muestra un esquema de cómo debería quedar diseñado un humedal de flujo horizontal subsuperficial típico [14].

2.5 Uso de humedales artificiales para tratamiento de agua de riego

Previamente se analizó los distintos usos que puede haber para los humedales artificiales dentro de los distintos sectores, agrícola, doméstico, o industrial. Para este proyecto se requiere determinar si el tratamiento de agua de riego ligeramente contaminada por medio de humedales construidos es suficiente para que esta cumpla con las normas de calidad de agua para irrigación de cultivos agrícolas que se encuentran en el TULSMA. A continuación se presentan algunos casos donde el agua tratada ha sido utilizada en granjas para irrigación de cultivos.

En el Reino Unido se ha demostrado por medio de estudios que la principal causa de contaminación del agua para uso agrícola es el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos, la escorrentía excesiva que arrastra distintos contaminantes, el mal uso de pesticidas, entre otros [17]. En una caracterización realizada del agua de escorrentía encontraron que tenían contaminantes con concentraciones elevadas, como por ejemplo la carga orgánica

(representada por la DQO) tenía un rango de 1790 mg/L – 2250 mg/L, un rango de sólidos suspendidos entre 318 mg/L - 358 mg/L y concentraciones de patógenos (representadas por unidades formadoras de colonias de *E. Coli*) entre 833400 UFC/100mL – 2022000 UFC/100mL (UFC = unidades formadoras de colonias). Esta caracterización demostró que el agua de escorrentía no era apta para ser utilizada directamente sino que debía ser tratada, por lo cual se eligió un tratamiento a base de la construcción de humedales con los cuales se plantearon objetivos de evaluar su efectividad y descubrir factores que afecten dicha efectividad. Al finalizar el proyecto concluyeron que a pesar de haber implementado los humedales, su uso y la construcción no fueron las adecuadas por lo cual no consiguieron disminuir los contaminantes en los porcentajes deseados a pesar de existir remoción. La DQO presentó porcentajes de remoción de entre 40% y 83%, pero la remoción de nitratos y amonio no fueron suficientes dando como resultados una remoción de 23% y 48% respectivamente. Por esta razón concluyeron que el efluente de los humedales sea todavía de preocupación y no es viable su reutilización ya que todavía presenta una contaminación alta [17].

Otro ejemplo de utilización del efluente de un humedal artificial para uso de agua de riego es el que existe en Queensland, Australia. En Queensland el tema del tratamiento del agua residual municipal ha ido tomando fuerza con el pasar de los años, y algo mucho más reciente es utilizar humedales artificiales a manera de tratamiento secundario. El destino del efluente de dichos humedales es hacia los cuerpos de agua más cercanos como ríos, estuarios, y océanos. El agua tratada todavía contiene nutrientes en concentraciones considerables y también tiene una turbidez que preocupa a los gobiernos de turno. Las descargas iban a parar al “Great Barrier Reef Marine Park,” lugar donde los ecosistemas

marinos tienen una alta sensibilidad hacia los nutrientes y turbidez que se añade con el agua tratada. Por esta razón los gobiernos se encuentran bajo presión de que se busque la reutilización de este efluente en lugar de una simple descarga. Los efluentes tratados demuestran cumplir con los parámetros establecidos para irrigación por lo cual resultó viable que ese fuera su destino final. En este caso el mayor logro fue la reducción del nitrógeno en forma de nitrato que se redujo de 9 mg/L a 0.1 mg/L, sin embargo el fósforo en forma de fosfatos presentó una mínima reducción de 8 mg/L a 7 mg/L. Otro factor importante que permitió el uso agrícola de este efluente fue el hecho de que se pudo reducir los patógenos en más del 95% [13].

Es importante mencionar que en cada país la norma para la calidad de agua es diferente, por lo que resulta importante e interesante revisar la norma existente y vigente en el Ecuador respecto a agua para uso agrícola. El Ecuador se rige por el Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiente (TULSMA) y los parámetros para agua de uso agrícola se muestran en la tabla 2.5.1 (Tabla 6 y 7 del Libro VI Anexo 1 TULSMA) [18].

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	5,0
Arsénico (total)	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	1,0
Berilio	Be	mg/L	0,1
Boro (total)	B	mg/L	1,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,01
Carbamatos totales	Concentración total de carbamatos	mg/L	0,1
Cianuro (total)	CN ⁻	mg/L	0,2
Cobalto	Co	mg/L	0,05
Cobre	Cu	mg/L	2,0
Cromo			

hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/L	0,1
Flúor	F	mg/L	1,0
Hierro	Fe	mg/L	5,0
Litio	Li	mg/L	2,5
Materia flotante	VISIBLE		AUSENCIA
Manganeso	Mn	mg/L	0,2
Molibdeno	Mo	mg/L	0,01
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0,001
Níquel	Ni	mg/L	0,2
Organofosforados (totales)	Concentración de organofosforados totales.	mg/L	0,1
Organoclorados (totales)	Concentración de organoclorados totales.	mg/L	0,2
Plata	Ag	mg/L	0,05
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/L	0,05
Selenio	Se	mg/L	0,02
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Sólidos disueltos totales		mg/L	3 000,0
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi.			mínimo 2,0 m
Vanadio	V	mg/L	0,1
Aceites y grasa	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3
Coniformes Totales	nmp/100 ml		1 000
Huevos de parásitos		Huevos por litro	Cero
Zinc	Zn	mg/L	2,0

PROBLEMA POTENCIAL	UNIDADES	*GRADO DE RESTRICCIÓN.			
		Ninguno	Ligero	Moderado	Severo
Salinidad (1): CE (2) SDT (3)	Milimhos/cm mg/l	0,7 450	0,7 450	3,0 2000	>3,0 >2000
Infiltración (4): RAS = 0 – 3 y CE RAS = 3 – 6 y CE RAS = 6 – 12 y CE RAS = 12 – 20 y CE RAS = 20 – 40 y CE		0,7 1,2 1,9 2,9 5,0	0,7 1,2 1,9 2,9 5,0	0,2 0,3 0,5 1,3 2,9	< 0,2 < 0,3 < 0,5 <1,3 <2,9
Toxicidad por ión específico (5): - Sodio: Irrigación superficial RAS (6) Aspersión	meq/l	3,0	3,0	9	> 9,0
- Cloruros Irrigación superficial Aspersión	meq/l meq/l	4,0 3,0	4,0 3,0	10,0	>10,0
- Boro	mg/l	0,7	0,7	3,0	> 3,0
Efectos misceláneos (7): - Nitrógeno (N-NO ₃) - Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l meq/l	5,0 1,5	5,0 1,5	30,0 8,5	>30,0 > 8,5
pH	Rango normal	6,5 –8,4			

*Es un grado de limitación, que indica el rango de factibilidad para el uso del agua en riego.

Tabla 2.5.1: Parámetros de calidad para agua de riego presentados en el libro VI anexo 1 del TULSMA [18].

En la tabla se puede apreciar que la mayor cantidad de factores que se toman en consideración son compuestos que pueden resultar tóxicos para los cultivos.

CAPÍTULO III

Diseño y construcción del proyecto

3.1 Ubicación del proyecto

La parroquia de Tumbaco se ubica en una zona situada al oriente en relación a la ciudad de Quito, tiene una población de 38,498 habitantes con una tasa de crecimiento del 4.8% (1990-2001). Su altura media es de 2360 msnm [19]. Las precipitaciones de Tumbaco se caracterizan por tener una época seca que comprenden los meses de junio, julio y agosto, meses en los cuales las precipitaciones son mínimas y varían entre 13,7 mm - 28.6mm mensuales. Y una época lluviosa que comprende el resto de meses en los cuales se registran precipitaciones de hasta 145 mm mensuales [20].

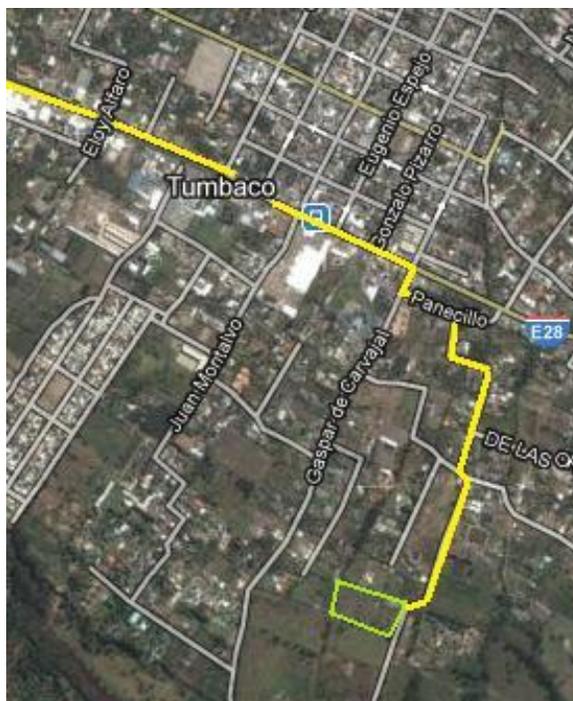


Figura 3.1.1: Mapa ubicación del proyecto [21].

El proyecto de construcción de humedales artificiales se encuentra dentro de la granja de la Universidad San Francisco de Quito que se encuentra en la parroquia de Tumbaco con las coordenadas: 0°13'22.10"S. 78°24'16.24"O y 2357 msnm [21]. La precipitación promedio anual es de 747 mm y tiene una temperatura media anual de 17°C [22].

3.2 Descripción del sistema de riego de la granja de la USFQ y problemática existente

La granja de la USFQ se dedica a la siembra y cosecha de varios productos de consumo humano como el brócoli, el tomate riñón, la lechuga entre otros. El problema que afrontan es la dificultad de acceso a agua para riego ya que el sistema de irrigación que se tiene es compartido con otros terrenos del lugar. Los trabajadores de la granja indicaron que obtienen su agua de riego por medio de canales que conectan con un cuerpo de agua, estos canales atraviesan por terrenos vecinos y son compartidos y manejados de tal manera que cada terreno tiene un número de días en los cuales recibe agua. También indicaron que los días lunes a partir de las 8:00 am hasta las 7:00 pm de los días martes, tiene derecho la granja a recibir el agua para el riego de sus cultivos.

Para poder captar agua que no se utiliza directamente en el riego y disponer de la misma en caso de sequía u otra emergencia que se puedan presentar, la granja construyó un reservorio conectado al final del canal que distribuye el agua. Este reservorio sirve para ocasiones en las cuales la granja no pueda o deje de recibir el agua proveniente del río y tenga que bombear el agua de este reservorio.

El cuerpo de agua de donde proviene el agua para los cultivos de la zona, tiene contacto con poblaciones aledañas y por lo cual puede presentar contaminación. Como se explicó en la sección 2.5 y como se muestra en la tabla 2.5.1, en el Ecuador existen regulaciones y

parámetros respecto a la calidad del agua con fines agrícolas, por ende al tener conocimiento de la posibilidad de que el agua de riego esté contaminada y no cumpla con estos parámetros, se decidió que se debía realizar una caracterización para observar si se cumple o no con la norma y en caso de que no se cumpla, desarrollar un sistema de tratamiento de la misma. El tratamiento elegido fue el de la construcción de un sistema de humedales artificiales, donde se le da tratamiento al agua del reservorio. En este proyecto el agua del reservorio se bombea a los humedales, donde el agua se purifica y el agua tratada se vuelve a bombear al reservorio. En la siguiente sección se muestra el diseño de los humedales.

3.3 Diseño humedales del proyecto

No existe un consenso sobre los criterios de cómo diseñar un humedal para tratamiento de agua, la vegetación utilizada, el área utilizada o la hidrodinámica. Por este motivo se encuentran una gran variedad de distintas técnicas de construcción y a la vez la función de los humedales. A pesar de no haber lineamientos específicos para el diseño de estos, usualmente se utilizan las ecuaciones presentadas en la sección 2.4. En este proyecto ya que el espacio del que se disponía era limitado, se tuvo que trabajar con esas dimensiones para implementar el sistema de tratamiento. La incógnita ahora era la eficacia de los mismos en la remoción de contaminantes.

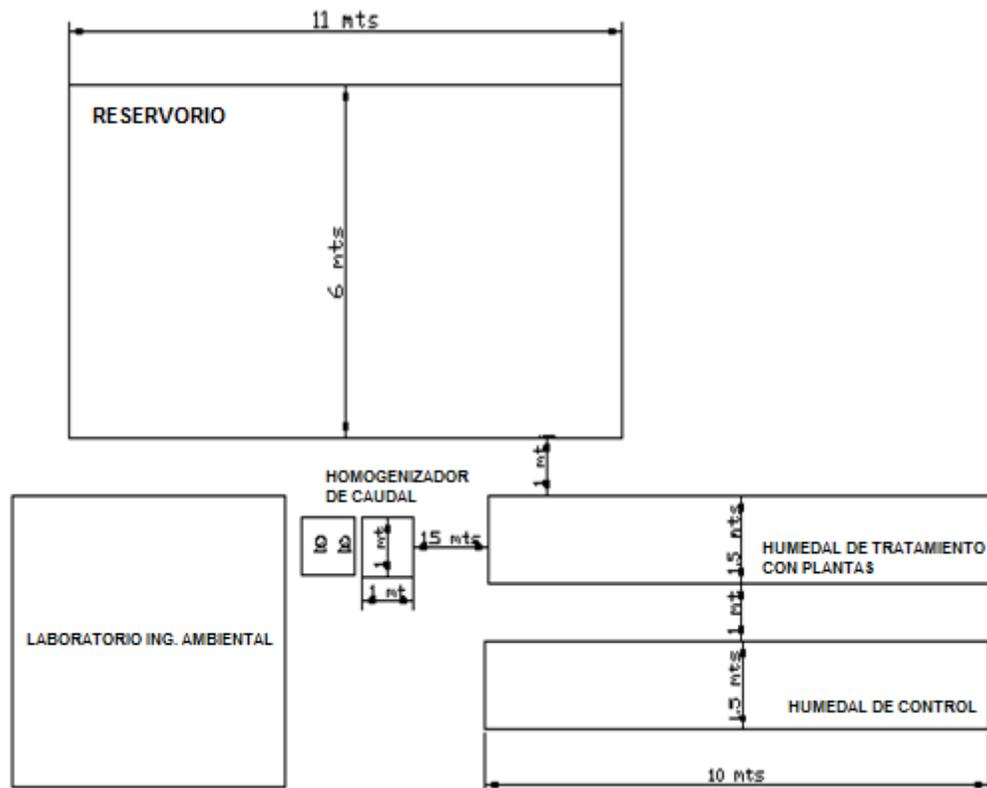
El espacio de terreno del que se dispuso para la construcción de los humedales era de 6 metros de ancho por 12 metros de largo. Se tenía que construir dos humedales paralelos que reciban el mismo volumen de caudal y tengan las mismas dimensiones, pero uno de ellos no se le iba a colocar vegetación, el fin de esto es observar la eficiencia de ambos en la

remoción de contaminantes y comprobar si la vegetación es útil en el tratamiento del agua y si la remoción no se realiza simplemente por el medio (arena) que actúa como filtro. Las medidas de cada humedal fueron de 10 metros de largo y 1,5 metros de ancho, y una separación entre ambos de 1 metro (ver fig.3.3.1A).

La profundidad de un humedal de flujo horizontal con macrófitas emergentes debe ser entre 0,6 m - 1 m. Si se tiene una mayor área superficial las profundidades pueden ser menores, todo depende de la profundidad que necesite la raíz de la macrófita elegida. En este caso la raíz del carrizo tiene una profundidad entre 20-25 cm [7]. La profundidad elegida fue de 1 metro ya que se buscaba tratar un mayor volumen de agua, y al mismo tiempo aumentar el tiempo de residencia.

Se había mencionado que se sugiere que la inclinación del fondo de los humedales no sea mayor al 3%, el terreno presentaba una inclinación del 2% en dirección opuesta a la dirección deseada para el flujo del agua. Para compensar el extremo más bajo de los humedales se lo hizo con 1 metro de profundidad y en el extremo de mayor altura se cavó una profundidad de 1.5 metros, esto dio como resultado final el 3% de pendiente en la dirección deseada. En la figura 3.3.1A y 3.3.1B se muestran los planos de la vista aérea y la vista de un corte transversal de los humedales respectivamente.

(A)



(B)

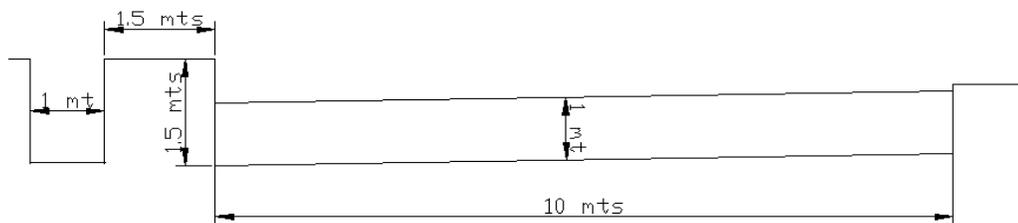


Figura 3.3.1: (A) Planos vista aérea; (B) Planos vista de un corte transversal

Como se muestra en los planos, los humedales se sitúan junto al reservorio donde la granja capta el agua. Por razones de diseño y se eligió cambiar la pendiente para que el flujo sea como se lo muestra en la figura 3.3.2A, se lo hizo de manera que las bombas se encuentren

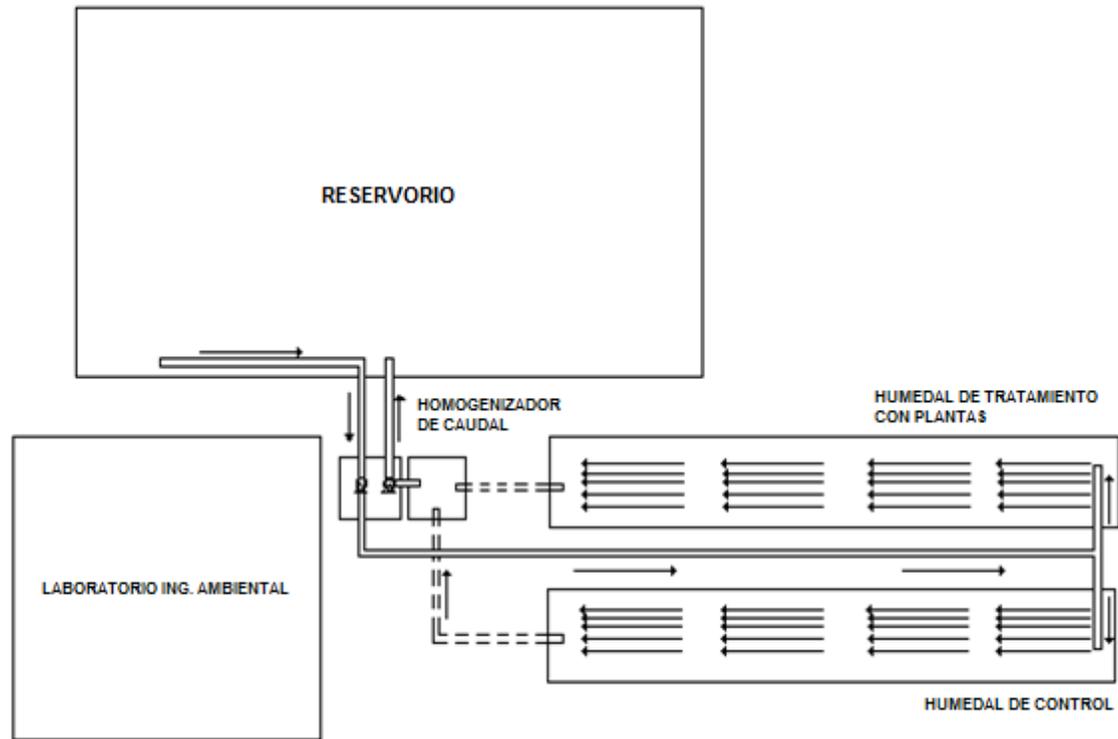
en un mismo lugar. Las tuberías transportan el agua bombeada del reservorio hacia uno de los extremos del humedal y por medio de perforaciones descarga el agua y la distribuye en cada uno de los humedales de manera homogénea.

El caudal que ingresa a cada uno de los humedales es de 19,8 L/minuto, es decir 1,2 m³/hora. El área superficial de cada humedal es de 15 m² por lo tanto la carga hidráulica de cada humedal es de 1,9 m/día. La concentración de DQO de la caracterización preliminar (ver capítulo 4) es de 355 mg/L, lo que da una carga orgánica de 0,674 kg DQO/m²día. Normalmente, pero no siempre, un humedal de flujo horizontal subsuperficial debe tener una carga hidráulica menor a 0,05 m/día y una carga orgánica menor a 0,015 kg DBO₅/m²día [9], otro estudio sugiere una carga orgánica de 0,006 kg DBO₅/m²día [23].

En el otro extremo del humedal se colocan las tuberías recolectoras que transportan el efluente de ambos humedales y se lo recolecta en un homogeneizador de caudal que tiene dimensiones de 1 metro de ancho, 1 metro de largo y 1,5 metros de profundidad. Del homogeneizador se bombea el efluente hacia el reservorio.

En la figura 3.3.2B se muestra el diseño para la capa impermeable, se puede observar que en los filos de los humedales se hace una zanja de 30 centímetros de profundidad y 30 centímetros de ancho, esto se lo hace a 40 centímetros del filo del humedal y es donde se va a colocar los extremos de la capa impermeable. Usualmente las paredes de un humedal son inclinadas para que tengan un mayor soporte de la capa impermeable, en este caso la pared es vertical para poder tratar un mayor volumen de agua y aprovechar el espacio del que se dispone.

(A)



(B)

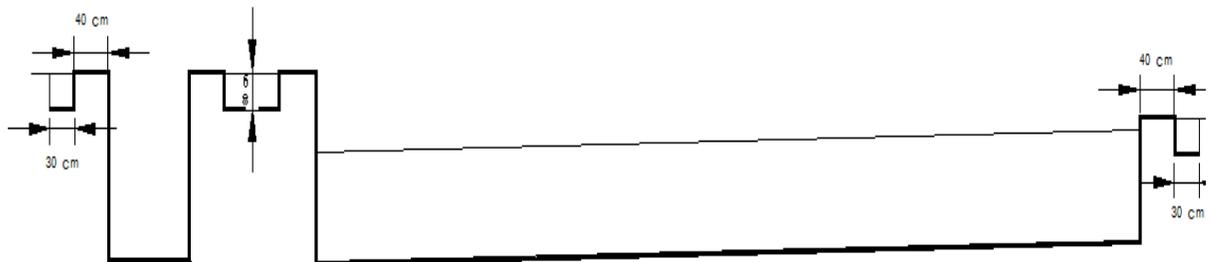


Figura 3.3.2: (A) Modelo del flujo en los humedales; (B) Diseño de la capa impermeable

3.4 Construcción

Se midió el terreno y determinó en dónde debían instalarse los humedales. Una vez hechas las excavaciones con la maquinaria, se las niveló para que tengan exactamente las mediciones diseñadas y se colocó las tuberías que conectan los humedales con el homogeneizador de caudales tal y como se lo muestra en la figura 3.3.2A.

Luego se procedió a instalar los folios de polietileno de 0,5 mm de espesor que corresponden a la capa impermeable; capa necesaria ya que el suelo de la granja tiene una conductividad hidráulica elevada y habría gran pérdida de agua por filtración de no impermeabilizar. Como se puede ver en la figura 3.3.2B se colocaron los folios de polietileno uno sobre otro con un traslape de 30 cm a lo ancho de ambos humedales y también se cubrió el homogeneizador de caudales. Para terminar de sellar se utilizó una cinta de embalaje especial resistente al agua utilizada en invernaderos, esto se lo hizo en lugar de un termo sellado por cuestiones de costos.

Se armó el sistema de tuberías y bombas tal como se lo presentó en la figura 3.3.2A, se utilizó dos bombas de medio caballo de potencia y se las colocó una junto a la otra en una caseta construida para evitar su deterioro. Las tuberías utilizadas fueron tuberías de PVC de 1 pulgada de diámetro. Para las tuberías de succión conectadas a las bombas se colocó una válvula de piso para que evite que sólidos de gran tamaño ingresen a la bomba y la taponen. La bomba que succiona el agua del homogeneizador se colocó una válvula de paso para disminuir el caudal que succiona, el sistema de recirculación se muestra en la figura 3.4.1.



Figura 3.4.1: Sistema de bombeo de recirculación, se succiona agua desde el fondo del reservorio, y el efluente se lo descarga en la superficie del reservorio. (Fotografía por Luis Esteban Guerra)

Al finalizar con la capa impermeable lo siguiente era colocar el lecho de arena, se utilizó arena negra lavada de río con un diámetro de partícula entre 0,5 mm y 1 mm. Se calculó la porosidad del lecho colocando un volumen de 500 mL del lecho en un vaso de precipitación de 1L y se comenzó a llenar con agua hasta que el nivel del agua llegue al nivel de los 500mL. Una vez logrado esto se procedió a descargar esa agua en otro vaso de precipitación teniendo mucho cuidado de que solamente sea agua lo que entra en ese vaso y se obtuvo una medición de 168mL y finalmente se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{V_{H_2O}}{V_{Total}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

$$n = \text{porosidad del lecho}(\%)$$

$$V_{H_2O} = \text{volumen agua (mL)}$$

$$V_{Total} = \text{volumen total (mL)} [24]$$

Entonces se calculó que la porosidad del lecho era del 33,4%, y va acorde a lo que dice la teoría que la arena entre 0,25 mm y 1 mm entran en la categoría de grano intermedio y que debe tener una porosidad entre el 30% y 40 % (ver sección 2.4).

Los puntos de muestreo se colocaron luego de que se puso el lecho de arena, los tubos utilizados tenían un diámetro de 20 centímetros y 1 metro de longitud, la idea era que el agua suba por los tubos desde el fondo de los humedales, para que sea agua que haya tenido un mayor tiempo de retención. Se colocó ocho puntos de muestreo en cada uno de los humedales como se puede ver en la figura 4.2.1. En el punto de muestreo final se lo colocó debajo de la tubería que recolecta el efluente para llevarlo al homogeneizador de caudales, esto se lo hizo para que el agua que sale como efluente sea solamente agua tratada, en caso de que algún rato se produzca agua de escorrentía por factores externos.

Finalmente, se eligió como vegetación a la macrófita comúnmente denominada como carrizo (*Arundo donax*). Las plantas se las consiguió de una propiedad en la vía intervalles, que tiene condiciones muy similares a las de la granja, por lo cual se esperaba que haya una buena adaptación al trasplantar los especímenes. Se llevó 30 individuos para ser trasplantados, y se los sembró a una profundidad de 20 centímetros. Al finalizar con la instalación de los humedales se procedió a la operación y funcionamiento de los mismos. En la figura 3.4.2 se puede apreciar los humedales terminados.



Figura 3.4.2: Humedales artificiales de la granja, en la izquierda se encuentra el humedal de control y a la derecha el humedal con las macrófitas. Se muestra que el sistema de alimentación es por medio de tuberías perforadas, cada humedal recibe un caudal promedio de $1,2 \text{ m}^3/\text{hora}$, y un total de $2,4 \text{ m}^3/\text{hora}$. (Fotografía por Luis Esteban Guerra)

3.5 Operación y funcionamiento

Debido a que la granja recibe solamente agua dos días a la semana, lunes y martes, resultaba imposible que se mantenga en funcionamiento los humedales de manera continua. Inclusive en épocas de lluvia no se abren los canales para el paso del agua ya que hay un problema con inundaciones en terrenos vecinos, en esta época el reservorio no tiene suficiente agua como para mantener el tratamiento del agua. Otro problema que existe con la operación y funcionamiento de los humedales, es el hecho de que el reservorio del cual se obtiene el agua de alimentación para estos no fue construido de manera que sea impermeable, básicamente es un pozo en el cual se deposita el agua para el almacenamiento. El suelo del sitio donde está ubicado el reservorio es altamente poroso y las pérdidas de filtración que existen son considerablemente altas. Para que las bombas del sistema no sufran un mal funcionamiento, fue necesario analizar el tiempo que demora el

reservorio en drenarse hasta el nivel en el que la bomba ya no puede succionar agua. Lo que se hizo fue esperar hasta el momento en el que la granja deja de recibir el agua y por lo tanto el reservorio comienza a drenar, desde ese momento se encendió las bombas para ver cuántos días abastece el reservorio para dar tratamiento al agua, tomando en cuenta que hay una recirculación y que el momento que se cambie el sistema, el drenado tendrá más velocidad. Para medir la cantidad de agua que se pierde en el reservorio cada hora, se marcó el nivel máximo del agua en el reservorio en el tiempo 0, luego cada hora por un periodo de 8 horas, y se obtuvo que en cada hora disminuye 3,5 cm en promedio. Ya que el reservorio tiene dimensiones de 6 metros de ancho, 11 metros de largo y 2,5 metros de profundidad, se determinó que el caudal de agua que se perdía del reservorio por cada hora de funcionamiento de los humedales era de $2,31 \text{ m}^3/\text{h}$. El reservorio tiene un volumen de 165 m^3 , por lo tanto el tiempo que se demora en drenarse completamente era de 73,3 horas. A estos tres días que se tarda en drenar el reservorio en su totalidad, se le añade los dos días en los cuales la granja recibe agua lo que deja un tiempo de 5 días de tratamiento de los humedales. El nivel de la tubería conectada a la bomba y encargada de bombear del reservorio hacia los humedales se encuentra a 10 centímetros del fondo del reservorio. Con el conocimiento de estos factores, se diseñó que el tratamiento sea desde el lunes a la hora que se abre el paso del agua hasta el jueves por la tarde y la toma de muestras se la realizaría los martes por la mañana.

Una vez determinado el tiempo que permanecerá en funcionamiento los humedales, se determinó los horarios para toma de muestras y posterior análisis (referirse a capítulo 4). Para cada punto de muestreo se tuvo una botella etiquetada y que encaje dentro de los mismos para poder recolectar el agua en ese tramo, una vez finalizada la toma, se llevaba

las botellas inmediatamente al laboratorio para el análisis respectivo. Para el análisis de patógenos se tuvo que tomar muestras en envases distintos (frascos estériles de 250 mL) y se tomó en dos puntos distintos, en el inicio del proceso y en el efluente del mismo.

3.6 Costos finales de la construcción del proyecto

Referirse al Anexo 1 para consultar los detalles sobre los costos del proyecto.

CAPÍTULO IV

Resultados y métodos

4.1 Métodos analíticos

Se presentan los resultados obtenidos para el humedal de tratamiento y el humedal de control a partir del monitoreo de: DQO total, DQO particulada*, DQO soluble*, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles Totales, Sólidos Suspendidos Totales*, Sólidos Suspendidos Volátiles*, Coliformes Totales y *E. Coli*, Oxígeno disuelto, Conductividad, pH*, Turbidez*, Amonio* y Nitratos.¹ En la siguiente sección se presentan los distintos procedimientos que se siguieron para cada análisis, métodos desarrollados por el laboratorio de Ing. Ambiental de la USFQ.

DQO total, particulada y soluble

Procedimiento: Método de reflujos y colorimétrico

- Se tomaron las muestras en botellas de 500 mL y se las llevó al laboratorio para refrigeración.
- Se preparó 10 mL de estándares de KHP de 1000 ppm, 750 ppm, 500 ppm, 250 ppm, 100 ppm, 50 ppm, y un blanco de 0 ppm.
- Para determinar la DQO soluble se tomaron 7,5 mL de las muestras y centrifugaron por 10 minutos. Para la DQO total se omitió este paso.
- De ser necesario, hacer una dilución 1:10 de las muestras.

¹ Los experimentos marcados con el asterisco son los experimentos complementarios que se realizaron por 4 semanas empezando desde la sexta semana transcurrida del resto de experimentos.

- Se añadió a los tubos de ensayo las cantidades de muestra y reactivos en el siguiente orden y cantidades: muestra (2,5 mL), Solución digestora (1,5 mL), y Ácido sulfúrico (3,5 mL).
- Se utilizó el vortex para mezclar los reactivos.
- Se colocaron las muestras por triplicado en un horno a 150°C por 2 horas para digerir la muestra.
- Se realizó una curva de calibración midiendo los estándares de diferentes concentraciones en el espectrofotómetro a 600nm de longitud de onda.
- Se midieron las muestras en el espectrofotómetro y al comparar con la curva de calibración, se obtiene la concentración en ppm de DQO total o soluble.
- Para obtener la concentración de DQO particulado, se resta la DQO soluble de la DQO total.

Sólidos totales (TS), sólidos volátiles (VS), sólidos totales en suspensión (TSS) y sólidos volátiles en suspensión (VSS) por filtración

Procedimiento: Determinación de TS y VS

- Se tomaron las muestras en botellas de 500 mL.
- Se colocaron los crisoles vacíos en la mufla a 550°C por una hora para asegurarse de que cualquier residuo sólido se quemara por completo.
- Se colocaron los crisoles en la balanza y se determinó el peso del crisol vacío.
- Se colocaron 30 mL de muestra en el crisol por duplicado.
- Se dejó los crisoles con la muestra en un horno durante toda la noche a 105°C.
- Al enfriarse los crisoles, se los pesó (peso del crisol + lodo seco).
- Se colocaron los crisoles en la mufla a 550°C durante 3 horas.

- Al enfriarse los crisoles, se los pesó (peso del crisol + cenizas).
- Ver Anexo 2 para ver como se realizaron los cálculos.

Determinación de TSS y VSS

- Se tomaron las muestras en botellas de 500 mL.
- Se utilizó filtros con diámetro de aproximadamente 4cm.
- Se pesó el filtro vacío.
- Se armó un equipo de filtración al vacío.
- Se colocó 30 mL de muestra previamente agitada sobre el filtro del equipo de vacío.
- Cuando se filtró todo el líquido se retiró cuidadosamente el papel filtro y se lo colocó en un horno durante toda la noche a 105°C.
- Se enfriaron los filtros y luego se los pesó (peso del lodo seco + filtro)
- Se colocó el filtro sobre crisoles en la mufla a 550°C por tres horas.
- Se enfriaron los filtros y luego se los pesó (peso de cenizas + filtro).
- Ver Anexo 2 para ver como se realizaron los cálculos.

Coliformes Totales y E. Coli

Procedimiento: Métodos desarrollados y tecnología de PetrifilmMR desarrollada por 3M

Microbiology [25]

- Se tomó la muestra en frascos estériles y se llevó al laboratorio.
- Se inoculó 1 mL de la muestra y se lo esparció en el Petrifilm.
- Se incubó los Petrifilm a la temperatura apropiada.
- Se enumeró las colonias de E. Coli en 24 a 48 horas y Coliformes en 24 horas.
- Las colonias confirmadas de Coliformes son rojas y se encuentran junto a burbujas de gas.

- Las colonias confirmadas de E. Coli son rojo azuladas y/o azules asociadas a burbujas de gas. Las colonias que no están asociadas a una burbuja de gas no se las toma en cuenta (Ver Figura A2.3.1 del Anexo 2).

Oxígeno disuelto, Conductividad, pH, Turbidez

Procedimiento: Oxígeno disuelto

- La medición de oxígeno disuelto era lo primero que se hacía después de la toma de muestras para evitar que se siga consumiendo por actividad de los microorganismos.
- Se calibró el electrodo de oxígeno disuelto durante media hora.
- Se lo conectó al multiparámetro y se midió directamente de la botella de la muestra.
- Cálculos de oxígeno disuelto en la altura del proyecto se presentan en el Anexo 3.

Procedimiento: Conductividad

Hay que tomar en cuenta que la conductividad representa la salinidad del agua, es decir la cantidad de iones presentes en el agua. Esta característica del agua es decisiva para la reutilización como agua de riego para cultivos agrícolas ya que elevadas concentraciones de salinidad afectan el potencial osmótico en la zona de las raíces de la planta, afectando (disminuyendo) así su crecimiento ya que la planta no puede extraer el agua del suelo de manera eficiente [24].

- Se calibró el electrodo de conductividad.
- Se lo conectó al multiparámetro y se midió directamente de la botella de la muestra.

Procedimiento: pH

- Se calibró el potenciómetro.
- Se midió directamente de la botella de la muestra.

Procedimiento: Turbidez

- Se colocó la muestra dentro del tubo de muestras del turbidímetro.
- Se registró el valor que mostraba el turbidímetro.

Nitratos y Amonio

Procedimiento: Nitratos

- Se realizaron estándares de solución ISA de nitrato de 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm, 7 ppm, y 10 ppm.
- En un vaso de precipitación se colocó 10 mL de la muestra y luego se añade 0,2 mL de la solución ISA de nitrato y se agita.
- Se conecta el electrodo de nitrato al multiparámetro y se lo calibra.
- Se miden los estándares con el multiparámetro y se obtiene la curva de calibración (con pendiente negativa).
- Se mide la mezcla de la muestra con la solución ISA de nitrato y se obtiene la concentración de nitratos.

Procedimiento: Amonio

- Se realizaron estándares de solución ISA de amonio de 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm, 7 ppm, y 10 ppm.
- En un vaso de precipitación se coloca 10 mL de la muestra y se le añade 1 mL de la solución ISA de amonio y se agita.
- Se conecta el electrodo de amonio al multiparámetro y se lo calibra.
- Se miden los estándares con el multiparámetro y se obtiene la curva de calibración (con pendiente positiva).
- Se mide la mezcla de la muestra con la solución ISA de amonio y se obtiene la concentración de amonio.

4.2 Caracterización de agua de riego de la granja de la USFQ

La toma de muestras para la primera caracterización del agua de riego de la granja de la USFQ se la hizo directamente del reservorio, en botellas ámbar de 1 L, esto se lo hizo en diciembre del 2011, época lluviosa. Los resultados de la caracterización de esta agua se los encuentran en la tabla 4.1.1, la cual muestra una comparación entre los resultados obtenidos y los límites establecidos en el TULSMA.²

Experimentos	Resultados caracterización	Límites establecidos TULSMA
DQO (mg/L)*	355	250
ST (mg/L)*	275,56	1000
SST (mg/L)*	37,65	100
Coliformes totales (UFC/100mL)	1725	1000
pH	7,53	6,5 - 8,4
(N-NO3) (mg/L)	0	30
Conductividad Eléctrica (milimhos/cm)	0,2186	3

* Datos tomados de la tabla 12 límites máximos permisibles para descarga en un cuerpo de agua dulce, Libro VI Anexo 1 TULSMA

Tabla 4.2.1: Comparación de la caracterización inicial agua del reservorio de la granja, con límites establecidos por el TULSMA [18].

Se puede apreciar que los parámetros, demanda química de oxígeno, y el conteo de coliformes totales no cumplen con los límites máximos permisibles para agua de riego, mientras que el resto de mediciones realizadas si los cumplen.

Operación de humedales:

² Las tablas 6 y 7 del Anexo 1 del Libro VI del TULSMA, que son los límites de contaminantes para agua de riego, no toman en cuenta la DQO, ST, o SST, por lo que para tener un valor referencia se adoptan los valores de la tabla 12 de límites máximos permisibles para descarga en un cuerpo de agua dulce.

Se realizó un monitoreo semanal en los diferentes puntos de muestreo del tratamiento del agua en los humedales durante un periodo de 10 semanas (ver fig. 4.2.1). Las muestras colectadas se refrigeraron hasta el momento de la caracterización.

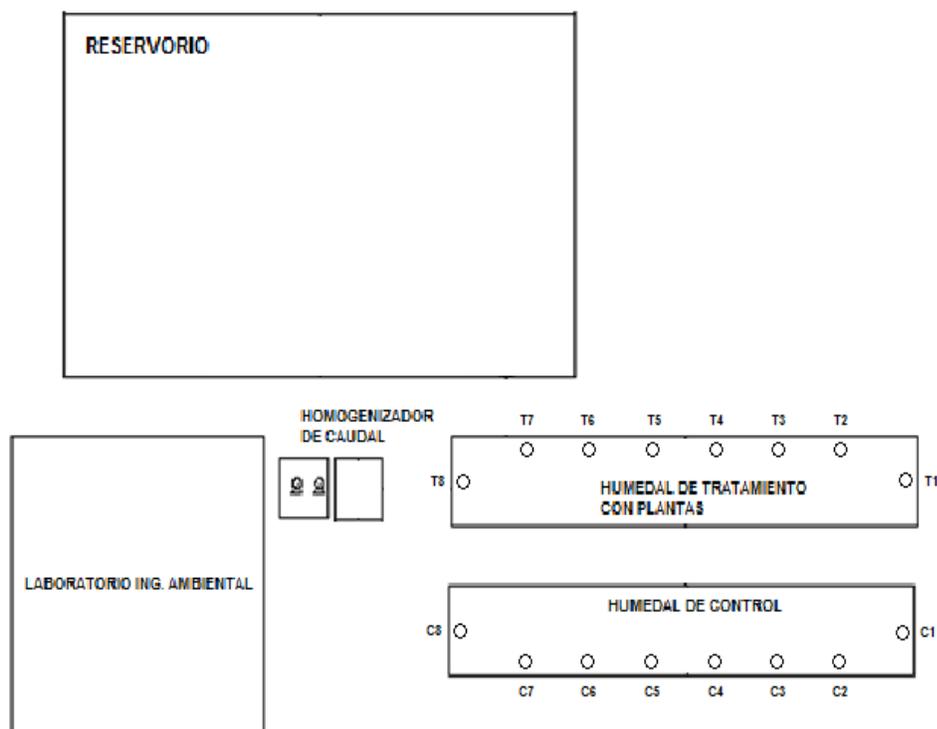


Figura 4.2.1: Puntos de muestreo en los humedales

Para los experimentos se nombró al humedal que contiene la vegetación macrófita como el humedal de tratamiento, y a sus puntos de muestreo se los definió como: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, y T8 (ver fig. 4.2.1). El humedal artificial que no tiene vegetación y solamente pasa el agua por medio de la arena filtrante se lo denominó humedal de control, y a sus puntos de muestreo se los definió como: C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, y C8 (ver fig. 4.2.1). Tanto T1 como C1 son los puntos de muestreo en el principio de los humedales, es decir es justo donde está el caudal de alimentación de cada humedal. De la misma manera los puntos T8 y C8 se encuentran al final del sistema, es decir demuestran la calidad del agua a

lo que sale de los dos humedales. Cada punto de muestreo se encuentra separado a una distancia de 1 metro y cada tubo tiene un diámetro de 20 centímetros (ver Figura 4.2.1). En las siguientes secciones, de la sección 4.3 hasta la sección 4.9, se mostrarán los resultados obtenidos de cada experimento en las 10 semanas de funcionamiento de los humedales, junto con las eficiencias de remoción del contaminante en cada punto de muestreo tanto en el humedal de tratamiento como en el humedal de control, y la relación entre ambos.

4.3 Resultados DQO total, DQO soluble y DQO particulada

En la figura 4.3.1A se muestran los resultados de la DQO total del humedal de tratamiento y en la figura 4.3.1B se muestran los resultados de DQO total para el humedal de control.

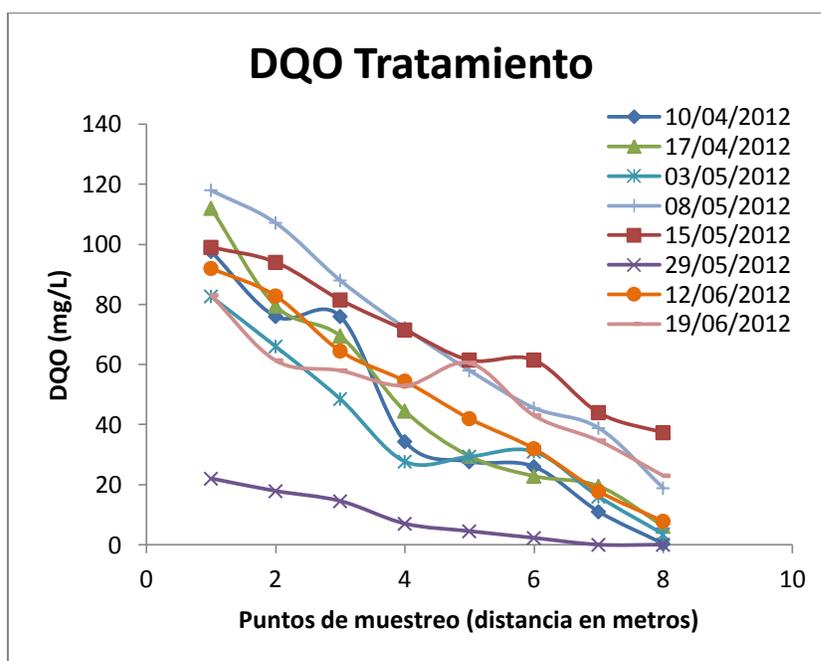


Figura 4.3.1A: Gráfica DQO vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de tratamiento

En la figura 4.3.1A se puede apreciar que en todas las semanas se registra una disminución de la concentración de DQO. Algo que cabe destacar es que el mayor valor inicial registrado es el de la semana 08/05/2012, con un valor de 118 mg/L siendo un valor que se

encuentra debajo del límite establecido de 250 mg/L [18]. Todas las semanas presentan valores iniciales de DQO previos al tratamiento dentro del rango de 82 mg/L – 118 mg/L, sin embargo una de las semanas destaca por tener un valor muy inferior a ese rango, la semana con fecha 29/05/2012 es cuando se registró un DQO en la alimentación con un valor de 22 mg/L. Gráficamente se ve que a medida que se avanza por el humedal hay una pendiente generalizada en cada una de las semanas y donde se evidencia que en los puntos de muestreo 1, 2, y 3 es donde generalmente se presentan las caídas más pronunciadas en la DQO y esto puede deberse al hecho de la presencia de sólidos suspendidos que van siendo filtrados en la arena.

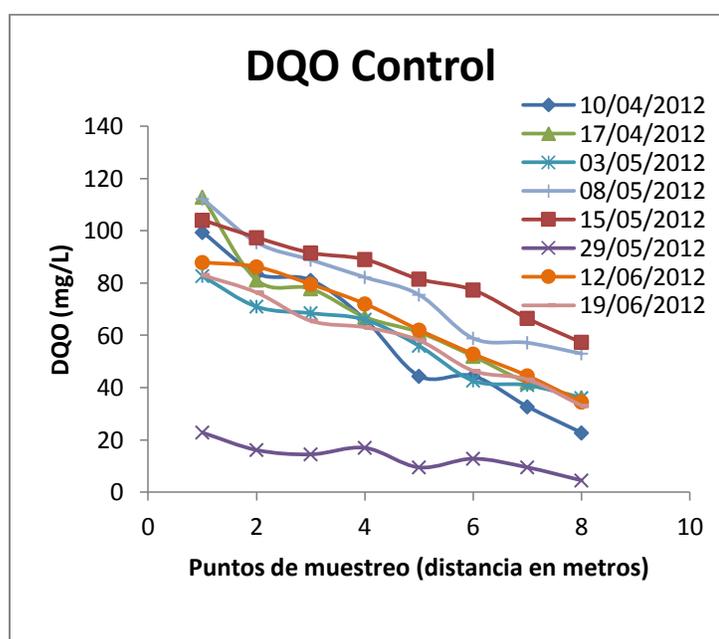


Figura 4.3.1B: Gráfica DQO vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de control

En la figura 4.3.1B se muestran los resultados para el humedal de control, se aprecia que existe una disminución de la concentración de DQO de igual manera que en el humedal de tratamiento. Los valores iniciales son prácticamente iguales que los del humedal de

tratamiento ya que ambos se los alimenta con agua proveniente del mismo reservorio. La eliminación de DQO es menor que la presentada en el humedal de tratamiento. Existe disminución de la DQO, ya que el humedal con arena actúa como un filtro y al mismo tiempo existen microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica [27].

En la tabla 4.3.1 se muestran los porcentajes de eficiencias de remoción de DQO de ambos humedales.

% Eficiencia remoción DQO		
Fecha	Tratamiento	Control
10/04/2012	100	77
17/04/2012	95	68
03/05/2012	96	56
08/05/2012	84	53
15/05/2012	62	45
29/05/2012	100	80
12/06/2012	92	61
19/06/2012	72	60
% Promedio	88	63

Tabla 4.3.1: Eficiencias de remoción porcentual de DQO para humedales de tratamiento y control

En el humedal de tratamiento se observan remociones entre 60% y 100%, mientras que en el humedal de control se observan remociones entre 50% y 80%. En el humedal de tratamiento el mayor porcentaje de remoción es de 100% registrado en la semana 10/04/2012 (hay una remoción del 100% en la semana del 29/05/2012 pero no se lo toma en cuenta ya que esa semana las concentraciones de DQO inicial fueron muy cercanas a 0 mg/L), y el menor porcentaje de remoción fue de 62% en la semana del 15/05/2012.

En el humedal de control, el mayor porcentaje de remoción es de 77% registrado en la semana 10/04/2012 (hay una remoción del 80% en la semana del 29/05/2012 pero no se lo

toma en cuenta ya que esa semana las concentraciones de DQO inicial fueron muy cercanas a 0 mg/L), y el menor porcentaje de remoción fue de 45% en la semana del 15/05/2012. En promedio el humedal de tratamiento tuvo una eficiencia de remoción de 88%, mientras que el humedal de control tuvo un promedio de eficiencia remoción de 63%, es decir que el humedal de tratamiento es 25% más eficiente que el humedal de control.

En la figura 4.3.2A se muestran los resultados de DQO particulado del humedal de tratamiento y en la figura 4.3.2B se muestran los resultados de DQO particulado para el humedal de control.

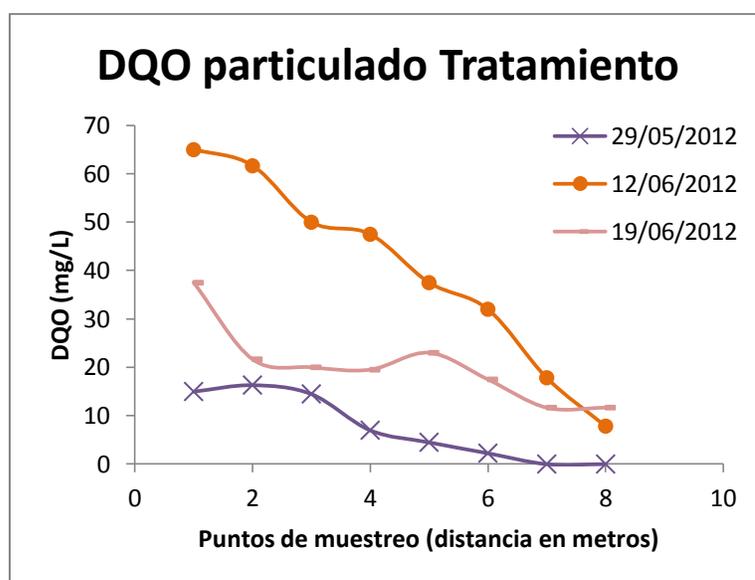


Figura 4.3.2A: Gráfica DQO particulada vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento

En la figura 4.3.2A se puede apreciar que en las tres semanas se registra una disminución de la concentración de DQO particulado. Si se comparan los datos de la DQO total y de la DQO particulada para las semanas con fechas: 29/05/2012, 12/06/2012 y 19/06/2012 se puede apreciar el porcentaje de materia orgánica particulada. En la semana del 29/05/2012

se puede apreciar que de los 22 mg/L de DQO total, 15 mg/L se encuentran en forma de materia orgánica particulada; en la semana del 12/06/2012 se evidencia que de los 92 mg/L de DQO total, 65 mg/L se encuentran en forma de materia orgánica particulada; y finalmente en la semana del 19/06/2012 se puede apreciar que de los 83 mg/L de DQO total, 37,5 mg/L se encuentran en forma de materia orgánica particulada.

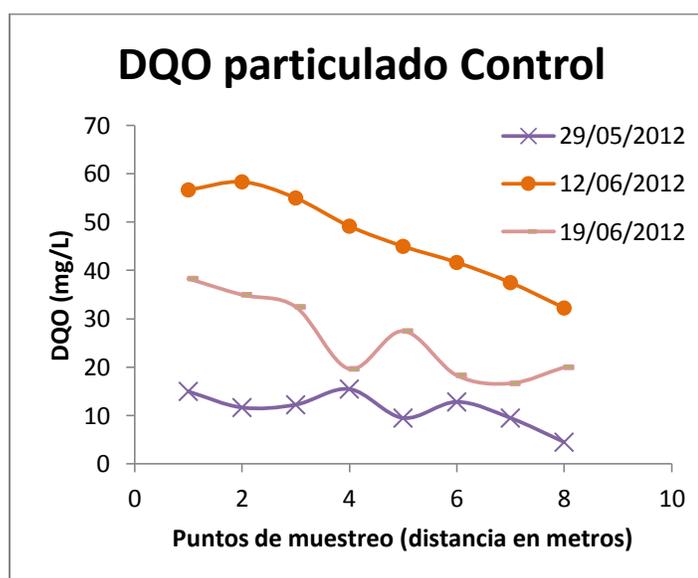


Figura 4.3.2B: Gráfica DQO particulada vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control

En la figura 4.3.2B se puede apreciar que en las tres semanas se registra una disminución de la concentración de DQO particulada dentro del humedal de control al igual que sucedió con el humedal de tratamiento. Es interesante comparar los datos de la DQO total y de la DQO particulada del humedal de control para las semanas con fechas: 29/05/2012, 12/06/2012 y 19/06/2012 ya que se encuentra que la eliminación de DQO particulada en el humedal de control es menor a la que existía en el humedal de tratamiento para las mismas semanas. En la semana del 29/05/2012 se puede apreciar que de los 23 mg/L de DQO total, 15 mg/L se encuentra a manera de DQO particulada. En el efluente de esa misma semana se

obtuvo valores de DQO particulada de 4,5 mg/L que es similar al valor de la DQO total del mismo efluente, es decir en el efluente solamente se encontraba materia orgánica particulada (la cual es más difícil de degradar). De esta manera se evidencia que el humedal de tratamiento tiene una mayor efectividad de remoción de DQO particulada que el humedal de control. En la semana del 12/06/2012 se obtuvo para el humedal de control una muestra inicial con 88 mg/L de DQO total y 57 mg/L de DQO particulado, y con un efluente de 34,5 mg/L y 32,3 mg/L respectivamente. Finalmente en la semana del 19/06/2012 los resultados de la muestra inicial dieron las concentraciones de 83 mg/L de DQO total, 38 mg/L de DQO particulada, y un efluente de 33 mg/L y 20 mg/L respectivamente.

% Eficiencia remoción DQO particulada		
Fecha	Tratamiento	Control
29/05/2012	100	70
12/06/2012	88	43
19/06/2012	69	48
% Promedio	86	54

Tabla 4.3.2: Eficiencias de remoción porcentual de DQO particulada para humedales de tratamiento y control

En la tabla 4.3.2 se muestran los porcentajes de eficiencias de remoción de DQO particulada de ambos humedales. Los valores de la tabla se justifican por una remoción física de la materia orgánica particulada. Las raíces dentro del humedal de tratamiento disminuyen la porosidad del medio y por lo tanto la materia orgánica particulada se filtra de una mejor manera que en el humedal de control.

En la figura 4.3.3A se muestran los resultados de DQO soluble del humedal de tratamiento y en la figura 4.3.3B se muestran los resultados de DQO soluble para el humedal de control.

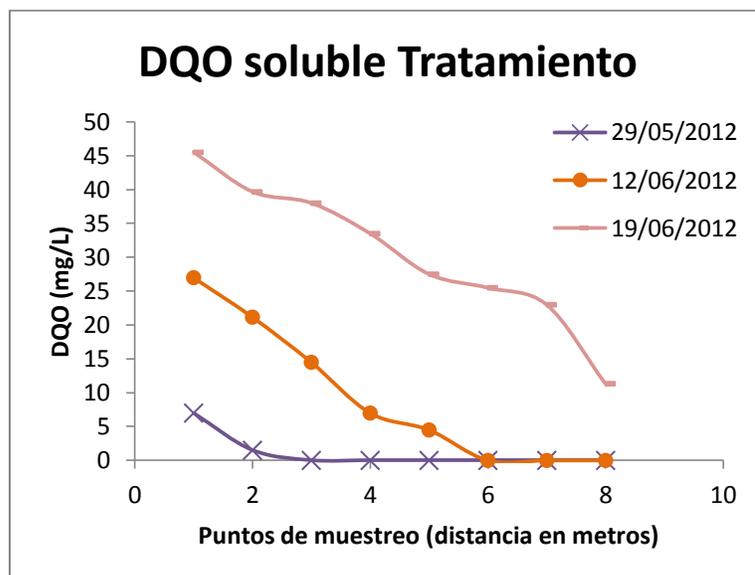


Figura 4.3.3A: Gráfica DQO soluble vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento

En la figura 4.3.3A se puede apreciar que en las tres semanas se registra una disminución de la concentración de DQO soluble. Se evidencia que la DQO soluble representa el menor porcentaje de la DQO total. En la semana del 29/05/2012 la DQO soluble del afluente representa el 32% de la DQO total. En la semana del 12/06/2012 la DQO soluble del afluente representa el 29% de la DQO total. En la semana del 19/06/2012 se evidencia un incremento de la DQO soluble, siendo el 54% de la DQO total. Se evidencia una remoción rápida en los primeros puntos de muestreo, a diferencia de la DQO particulada cuya remoción es menos pronunciada.

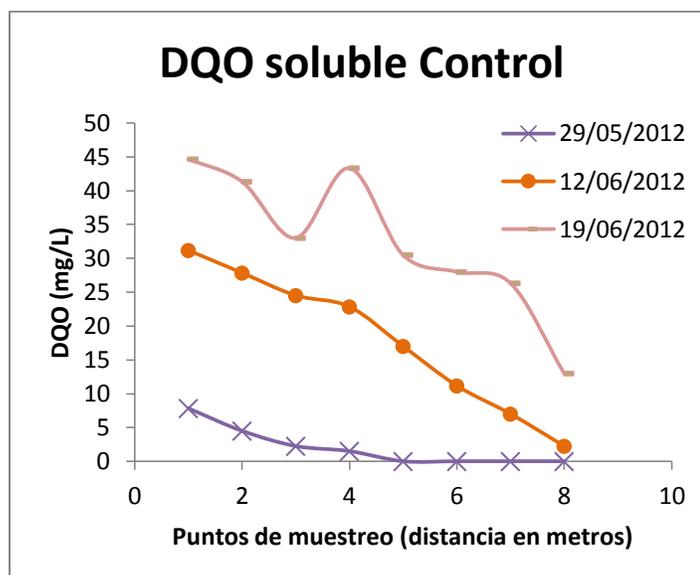


Figura 4.3.3B: Gráfica DQO soluble vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control

En la figura 4.3.3B registra también una disminución de la concentración de DQO soluble. Se evidencia que la DQO soluble representa el menor porcentaje de la DQO total. En la semana del 29/05/2012 la DQO soluble del afluente representa el 34% de la DQO total. En la semana del 12/06/2012 la DQO soluble del afluente representa el 35% de la DQO total. En la semana del 19/06/2012 se evidencia un incremento de la DQO soluble, siendo el 54% de la DQO total. A diferencia que en el humedal de tratamiento, en el humedal de control la remoción de la DQO soluble es de menor pronunciamiento.

% Eficiencia remoción DQO soluble		
Fecha	Tratamiento	Control
29/05/2012	100	100
12/06/2012	100	93
19/06/2012	75	71
% Promedio	92	88

Tabla 4.3.3: Eficiencias de remoción porcentual de DQO soluble para humedales de tratamiento y control

En la tabla 4.3.3 se muestran los porcentajes de eficiencias de remoción de DQO soluble de ambos humedales. Los valores de la tabla indican que en ambos humedales hay similar remoción de DQO soluble, con un 4% de diferencia entre ambos. Esa diferencia demuestra que existe influencia de la mayor cantidad de microorganismos presente en el humedal de tratamiento, que degrada más eficientemente la materia orgánica.

4.4 Resultados Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, y Sólidos Suspendidos Volátiles

En la figura 4.4.1A se muestran los resultados de los sólidos totales del humedal de tratamiento y en la figura 4.4.1B se muestran los resultados de los sólidos totales para el humedal de control.

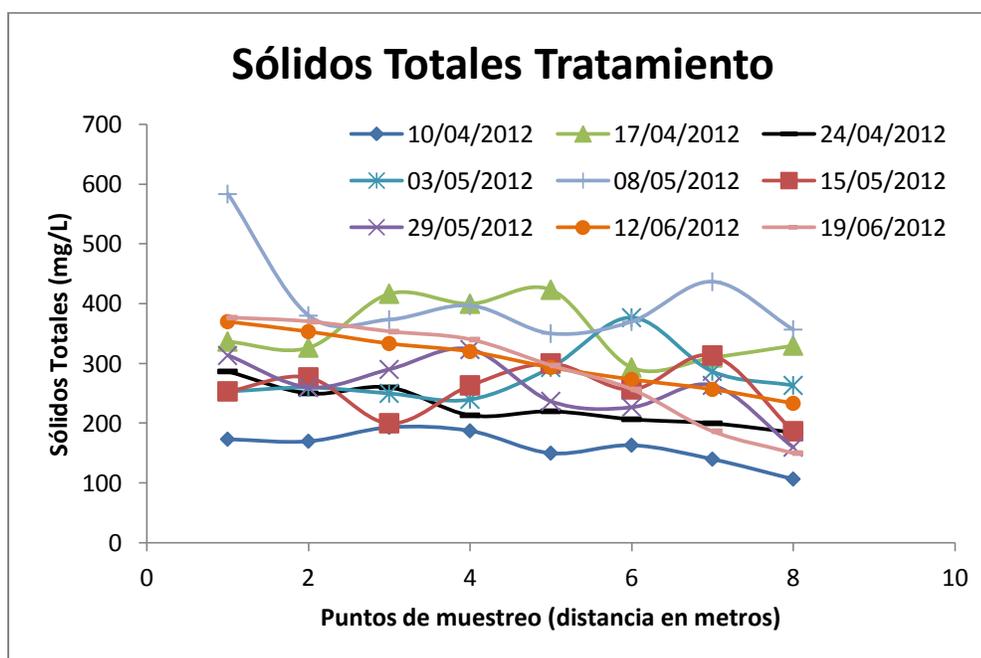


Figura 4.4.1A: Gráfica ST vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de tratamiento

En la figura 4.4.1A se observa unos resultados erráticos de sólidos totales con alzas y bajas en los distintos puntos de muestreo para el humedal de tratamiento. Todas las semanas presentan valores iniciales de ST previos al tratamiento dentro del rango de 173 mg/L – 583 mg/L. Los porcentajes de remoción de sólidos totales son bajos siendo el de la semana del 17/04/2012 el porcentaje más bajo con 2% de remoción. El resto de valores varía entre el 26% y 48% excepto por la semana del 19/06/2012 donde hay una remoción del 60%. Ningún valor supera el límite de 1000 mg/L [18], no se logra evidenciar una clara remoción de los sólidos totales a lo largo del tratamiento y lo cual se debe a la presencia de sales disueltas no biodegradables.

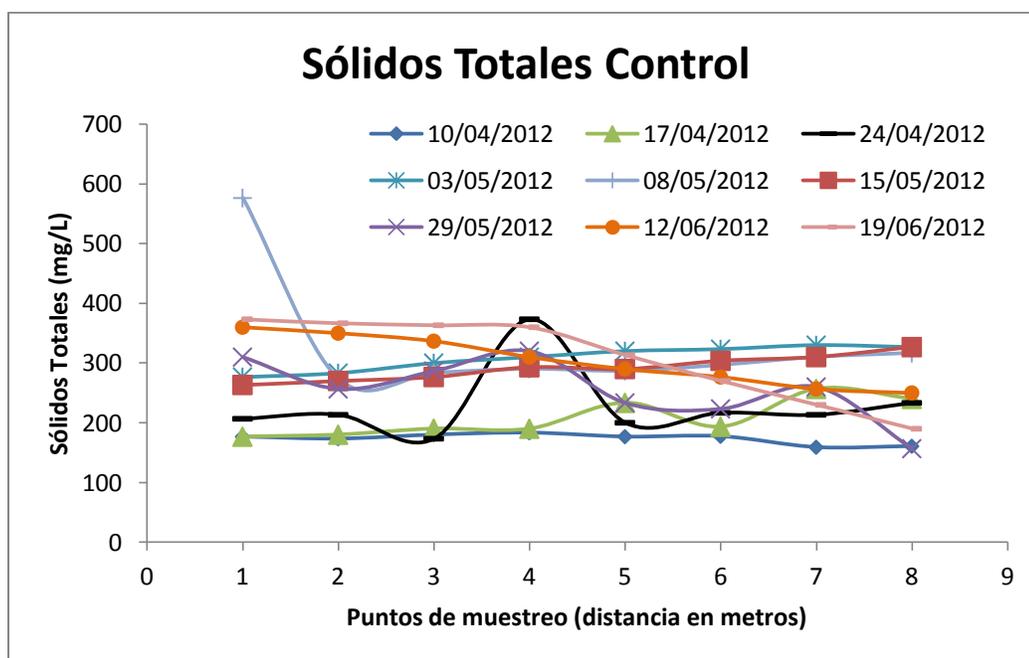


Figura 4.4.1B: Gráfica ST vs puntos de muestreo en un periodo de 9 semanas del humedal de control

En la figura 4.4.1B se observa los resultados de sólidos totales con alzas y bajas en los distintos puntos de muestreo para el humedal de tratamiento. Todas las semanas presentan valores iniciales de ST previos al tratamiento dentro del rango de 177 mg/L – 576 mg/L.

Los resultados mostraron que ambos humedales tenían eficiencias parecidas de sólidos totales. El porcentaje de remoción de menor valor se dio en la semana del 10/04/2012 con un porcentaje de 9% de remoción. El resto de valores varía entre el 30% y 50% que son valores muy similares a los obtenidos en el humedal de tratamiento.

En la figura 4.4.2A y 4.4.2B se muestran los resultados para los sólidos volátiles.

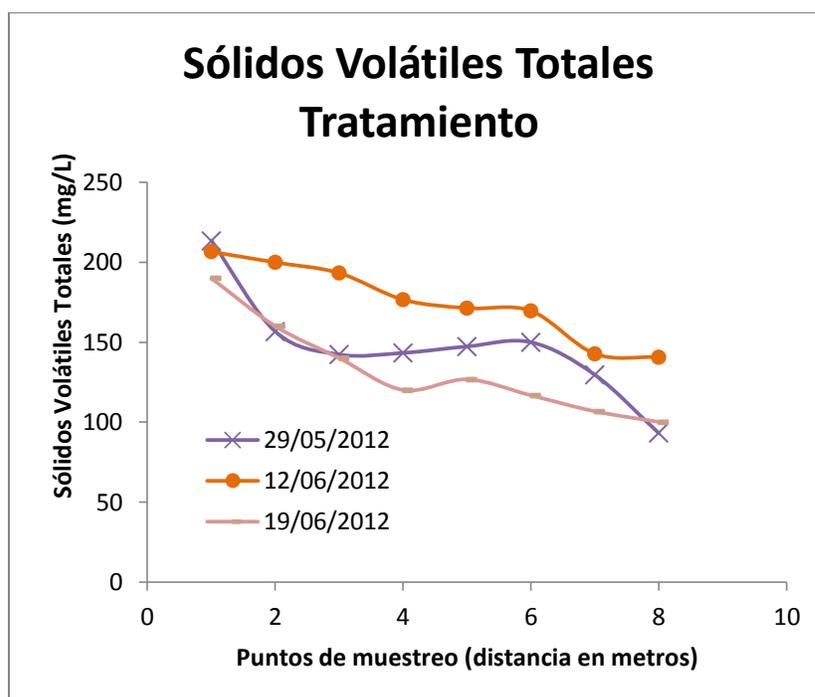


Figura 4.4.2A: Gráfica SV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento

Para el humedal de tratamiento, según se puede apreciar, este tipo de sólidos son los que representan el mayor porcentaje de los sólidos totales, si se toma en cuenta la semana del 29/05/2012, los SV representan el 58% de los ST, en la semana del 12/06/2012 los SV fueron el 60% de los ST y finalmente en la semana del 19/06/2012 los SV representaron el 67% de los ST.

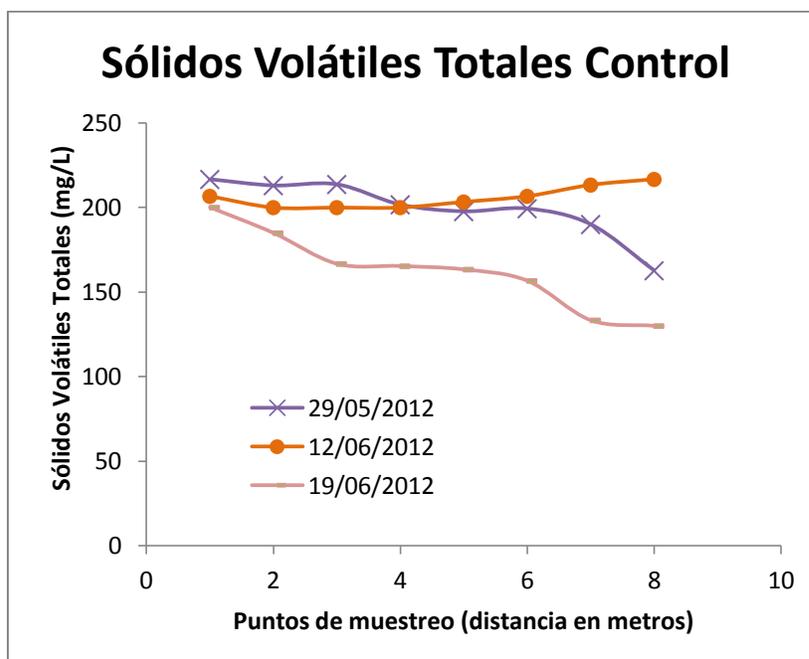


Figura 4.4.2B: Gráfica SV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control

Para el humedal de control, los SV también representaron el mayor porcentaje de los ST. En la semana del 29/05/2012, los SV representaron el 85% de los ST, en la semana del 12/06/2012 los SV fueron el 87% de los ST. Finalmente en la semana del 19/06/2012 los SV representaron el 68% de los ST. En la tabla 4.4.1 se muestra las eficiencias de remoción de SV para ambos humedales.

% Eficiencia remoción SV		
Fecha	Tratamiento	Control
29/05/2012	56	25
12/06/2012	32	0
19/06/2012	47	35
% Promedio	45	20

Tabla 4.4.1: Eficiencias de remoción porcentual de SV para los humedales de tratamiento y control

En la tabla 4.4.1 se evidencia que existe una mayor remoción de SV en el humedal de tratamiento, siendo el humedal de tratamiento 25% más eficiente que el humedal de control.

En la figura 4.4.3A se muestran los resultados de los sólidos suspendidos totales (SST) del humedal de tratamiento y en la figura 4.4.1B se muestran los resultados de los sólidos suspendidos totales para el humedal de control.

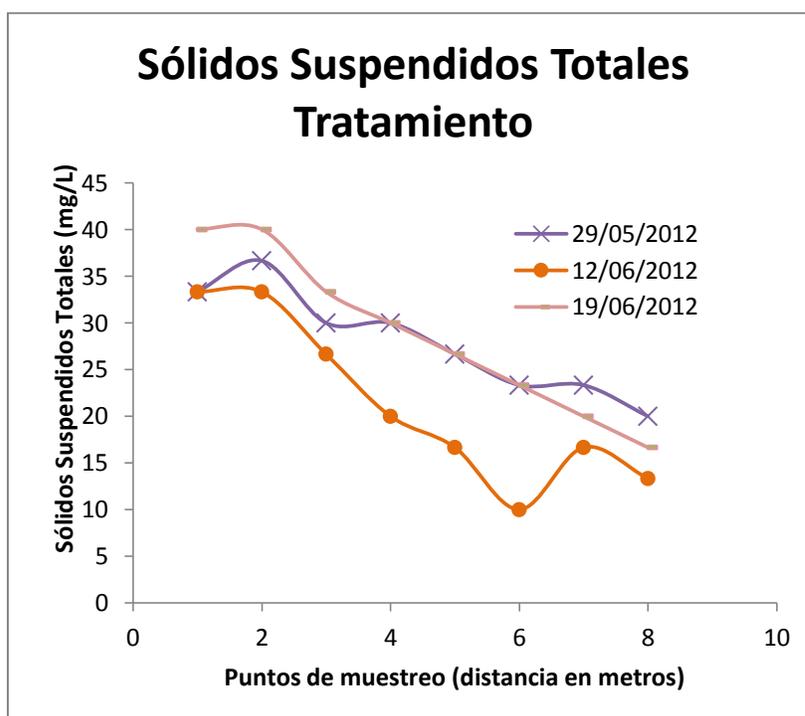


Figura 4.4.3A: Gráfica SST vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento

En la figura 4.4.3A se observa una tendencia de disminución de los SST en el humedal de tratamiento para las tres semanas. Se aprecia también que los SST tienen una concentración baja, entre 30 mg/L y 40 mg/L para el afluente, y entre 10 mg/L y 20 mg/L para el efluente. Los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales son similares a los obtenidos para los sólidos totales (ver tabla 4.4.2).

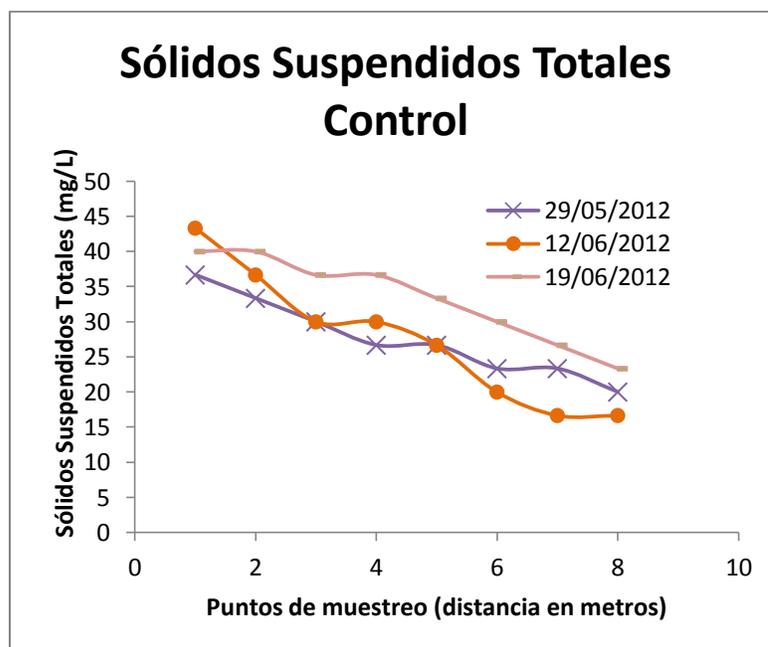


Figura 4.4.3B: Gráfica SST vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control

En la figura 4.4.3B se observa una disminución de los SST en el humedal de control similar a la que hubo en el humedal de tratamiento. Los SST tienen una concentración baja, entre 35 mg/L y 45 mg/L para el afluente, y entre 15 mg/L y 25 mg/L para el efluente.

% Eficiencia remoción SST		
Fecha	Tratamiento	Control
10/04/2012	40	45
17/04/2012	60	62
03/05/2012	58	42
% Promedio	53	50

Tabla 4.4.2: Eficiencias de remoción porcentual de SST para los humedales de tratamiento y control

En la tabla 4.4.2 se aprecia que la remoción de SST es similar para ambos humedales. Esto se debe a que el principal factor en la remoción de los SST es la arena que filtra el agua al pasar y remueve los SST.

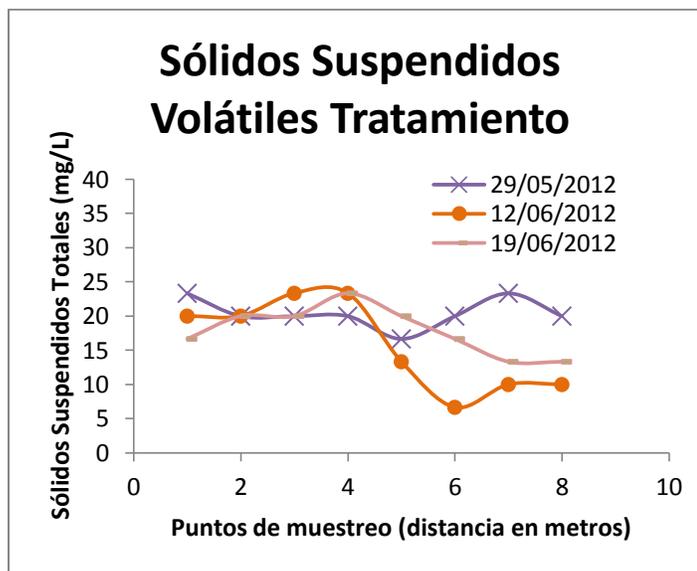


Figura 4.4.4A: Gráfica SSV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento

Para el humedal de tratamiento los SSV representan el mayor porcentaje de los SST. Al comparar los datos de SSV con los datos de la DQO soluble, se encuentra que son similares, con concentraciones bajas por debajo de los 50 mg/L y en ambos se evidencia remoción.

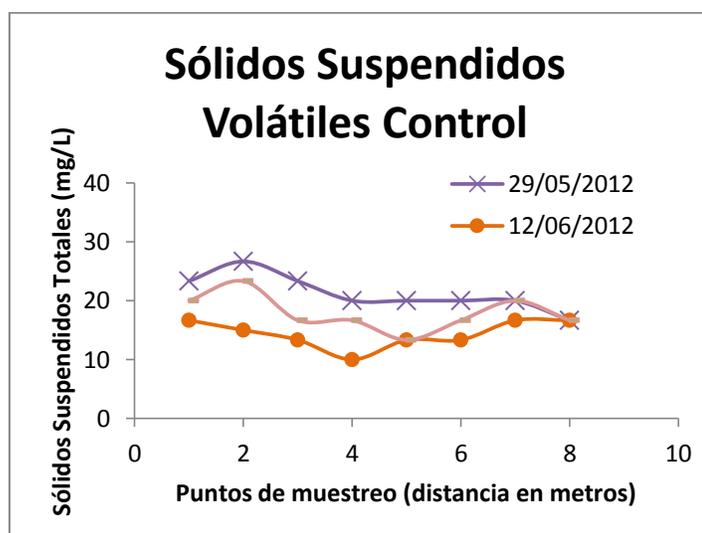


Figura 4.4.4B: Gráfica SSV vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control

Para el humedal de control los SSV también representaron el mayor porcentaje de los SST.

% Eficiencia remoción SSV		
Fecha	Tratamiento	Control
29/05/2012	13	26
12/06/2012	50	0
19/06/2012	20	17
% Promedio	28	14

Tabla 4.4.3: Eficiencias de remoción porcentual de SSV para los humedales de tratamiento y control

La tabla 4.4.2 registra la remoción de SSV en ambos humedales. En promedio la eficiencia del humedal de tratamiento para la remoción de SSV es del 28%, y para el humedal de control es el 14%. Los SSV presentan menores eficiencias de remoción debido a que es una medida indirecta de la biomasa que incrementa en el transecto del humedal, la cual no se remueve.

4.5 Resultados Coliformes Totales

La determinación, o conteo de coliformes totales, es el único experimento en donde solamente se tomó en cuenta la concentración de patógenos en el caudal de entrada y en el caudal de salida de cada uno de los humedales. Esto se debió a que la disminución de la presencia de los organismos patógenos depende en gran parte del tiempo de retención que existe dentro de los humedales y por lo tanto se decidió que no se consideraría los demás puntos de muestreo.

En la tabla 4.5.1 se muestran los resultados obtenidos de coliformes totales en las semanas de monitoreo.

Semana	10/04/2012	17/04/2012	24/04/2012	03/05/2012	15/05/2012	29/05/2012	12/06/2012
Concentración Coliformes Totales en el caudal de Entrada (UFC/100mL)	5500	700	4300	16600	5600	7900	3800
Concentración Coliformes Totales en el caudal de Salida Tratamiento (UFC/100mL)	2200	500	1200	3400	1200	9600	1000
Concentración Coliformes Totales en el caudal de Salida Control (UFC/100mL)	3000	500	3400	7900	2400	9700	3700
Porcentaje Remoción Tratamiento	60	29	72	80	79	0	74
Porcentaje Remoción Control	46	29	21	52	57	0	3

Tabla 4.5.1: Resultados Coliformes Totales y porcentajes de remoción para humedales de tratamiento y control.

En todas las semanas existe una disminución de coliformes totales en la salida del humedal de tratamiento, sin embargo si se lo compara con el límite establecido por el TULSMA de 1000 UFC/100mL [18], en dos semanas (17/04/2012 y 12/06/2012) se alcanzan niveles igual o menores a lo establecido en la normativa. En la semana del 17/04/2012 se determinó una concentración de coliformes totales en el caudal de entrada, que era menor 700 UFC/100mL a lo establecido en el TULSMA y en los caudales de salida del tratamiento y de salida del control se obtuvieron valores iguales de la concentración de coliformes totales (500 UFC/100mL). Otro valor que resalta es el obtenido en el caudal de entrada de la

semana del 03/05/2012 que presentó una concentración de 16600 UFC/100mL. El resto de semanas la alimentación de los humedales presentaba una concentración de coliformes totales dentro del rango de 4300 UFC/mL – 7900 UFC/mL.

En lo que respecta a la remoción de coliformes totales dentro del humedal de tratamiento, llaman la atención los siguientes resultados: en la semana del 17/04/2012 hubo una remoción del 29% (recordando que en esta semana el caudal de entrada fue el más bajo con 700 UFC/100mL), en la semana del 03/05/2012 existió una remoción del 80% (recordando que en esta semana la concentración de patógenos fue la más alta con 16600 UFC/100mL).

Los resultados para la remoción de coliformes totales dentro del humedal de control registran una disminución, y destacan los siguientes resultados: en la semana del 17/04/2012 hubo una remoción del 29% (semana donde la concentración de coliformes totales fue de 700 UFC/100mL), en la semana del 03/05/2012 existió una remoción del 52%, y en la semana del 15/05/2012 la remoción fue del 57%, remociones que son altas considerando que es el humedal de control.

Al comparar ambos humedales, el humedal de tratamiento tiene un mayor promedio de remoción llegando a ser casi el doble de eficiente que el humedal de control. El humedal de tratamiento tiene una eficiencia de remoción del 65% y el humedal de control tiene un promedio de remoción de 34%.

En la tabla 4.5.2 se muestran los resultados obtenidos de *E. Coli* en las semanas de monitoreo.

Semana	10/04/2012	17/04/2012	24/04/2012	02/05/2012	15/05/2012	29/05/2012	05/06/2012
Concentración de <i>E. Coli</i> en el caudal Entrada (UFC/100mL)	2300	400	1100	5000	4600	100	100
Concentración de <i>E. Coli</i> en el caudal Salida Tratamiento (UFC/100mL)	200	200	500	100	600	100	0
Concentración de <i>E. Coli</i> en el caudal Salida Control (UFC/100mL)	1700	300	700	2200	1100	200	100
% Remoción Tratamiento	91	50	54	98	87	0	100
% Remoción Control	26	25	36	56	76	0	0

Tabla 4.5.2: Resultados *E. Coli* y porcentajes de remoción para humedales de tratamiento y control.

En todas las semanas existe una notable disminución de *E. Coli* en la salida del humedal de tratamiento. En las semanas de monitoreo, la alimentación de los humedales presentaba una concentración de *E. Coli* dentro del rango de 100 UFC/100mL – 5000 UFC/100mL. Para la remoción de *E. Coli* dentro del humedal de tratamiento se registró un promedio el humedal de tratamiento tiene una eficiencia de remoción de *E. Coli* del 80% (sin tomar en cuenta la semana donde hubo 0% de remoción). Para el humedal de control se registró un promedio de eficiencia de remoción de *E. Coli* del 44%.

Al comparar los rendimientos de los humedales, el humedal de tratamiento tiene un promedio de remoción del 65% de coliformes totales y un 80% de remoción de *E. Coli*. El

humedal de control tiene un promedio de remoción de 34% de coliformes totales y un 44% de remoción de *E. Coli*. Se observa una tendencia de que el humedal de tratamiento tiene mayor remoción de patógenos.

4.6 Resultados Oxígeno Disuelto

En la figura 4.6.1A se muestran los resultados del oxígeno disuelto a lo largo del humedal de tratamiento y en la figura 4.6.1B se muestran los resultados del oxígeno disuelto (OD) a lo largo del humedal de control.

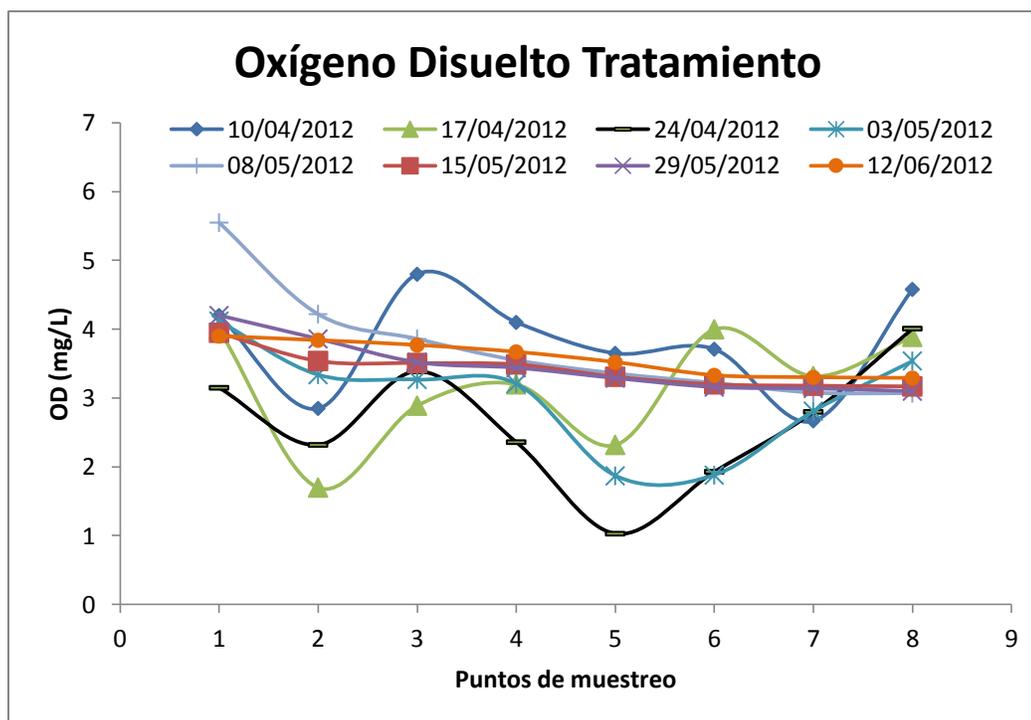


Figura 4.6.1A: Gráfica OD vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de tratamiento

Al observar la figura 4.6.1A se aprecia que para el humedal de tratamiento los valores de oxígeno disuelto en el caudal de entrada fluctúan entre el rango de 3,15 mg/L – 5,55 mg/L, valores menores al valor de oxígeno disuelto determinado para Tumbaco en el Anexo 3 (6,9

mg/L). Existen picos que llaman la atención como un pico alto de la semana del 10/04/2012 (4,8 mg/L) o el pico bajo de la semana del 24/04/2012 (1,03 mg/L). En el efluente del tratamiento se puede observar que los valores de OD entran dentro del rango de 3,07 mg/L – 4,58 mg/L.

En la figura 4.6.1B y se puede observar los resultados de oxígeno disuelto para el humedal de control.

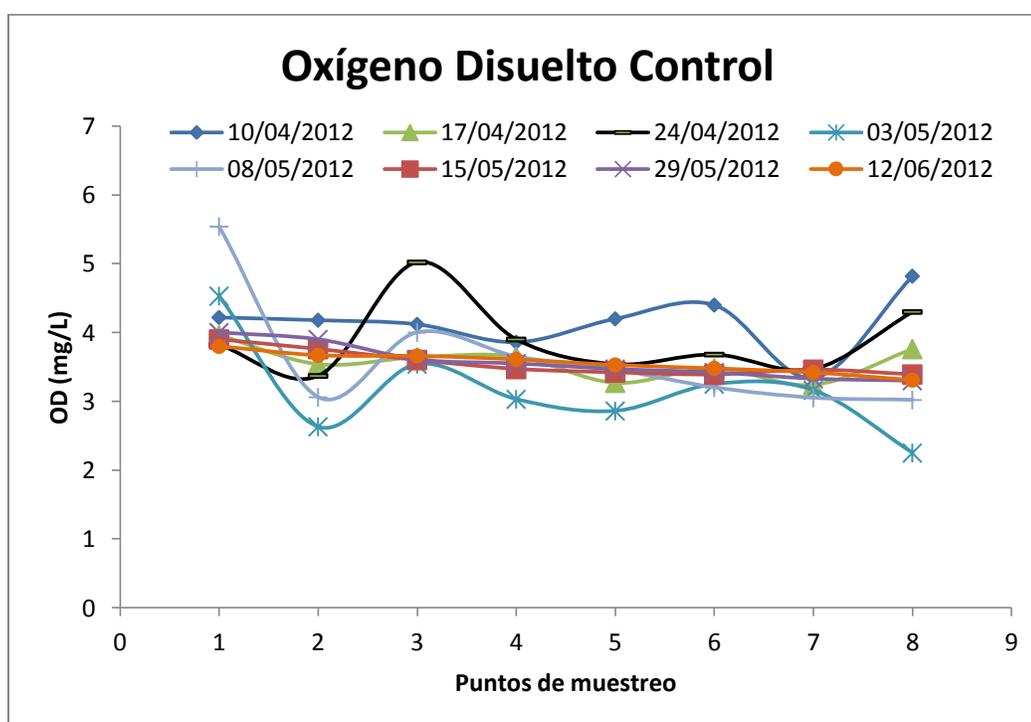


Figura 4.6.1B: Gráfica OD vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de control

Se observa que para el humedal de control, los valores de oxígeno disuelto en el caudal de entrada fluctúan entre el rango de 3,8 mg/L – 5,5 mg/L, valores menores al valor de oxígeno disuelto determinado para Tumbaco en el Anexo 3 (6,9 mg/L). Como se puede apreciar en la figura existen menores fluctuaciones que en el humedal de tratamiento. En el

efluente del tratamiento se puede observar que los valores de OD entran dentro del rango de 2,3 mg/L – 4,8 mg/L.

4.7 Resultados Conductividad

Los resultados de la medición de la conductividad se los muestra en la figura 4.7.1A y 4.7.1B tanto para el humedal de tratamiento como para el humedal de control respectivamente. En el TULSMA se presenta el límite de conductividad eléctrica para aguas de riego como 3 milimhos/cm, los resultados en la figura 4.7.1 se los presenta en $\mu\text{S/cm}$, la relación o transformación es $1000 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ milimhos/cm}$, por lo tanto el límite es $3000 \mu\text{S/cm}$ [18].

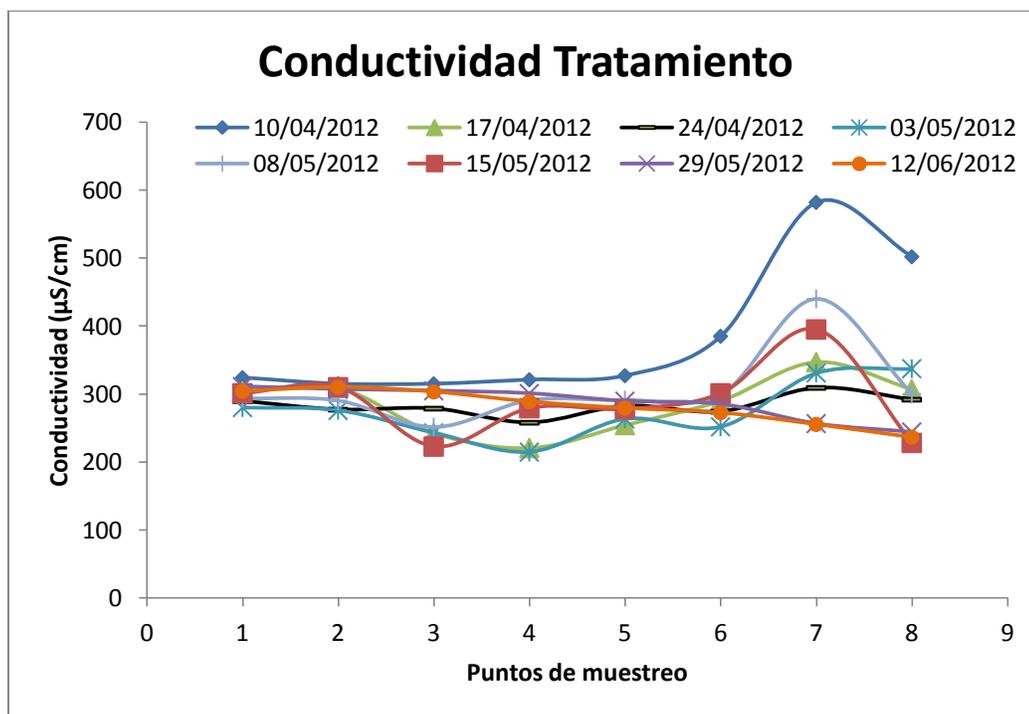


Figura 4.7.1A: Gráfica conductividad vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de tratamiento.

En la figura 4.7.1A se puede evidenciar que a lo largo del humedal de tratamiento los valores de la conductividad eléctrica se mantienen estables con un aumento a partir del punto de muestreo 6. La conductividad eléctrica durante todas las semanas en el caudal de entrada se mantuvo dentro del rango de 280,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 324 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Llama la atención el resultado obtenido en la semana del 10/04/2012 ya que a diferencia del resto de semanas el aumento en la conductividad eléctrica es mucho mayor en los puntos de muestreo 6, 7, y 8 llegando a tener un valor máximo de 582 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

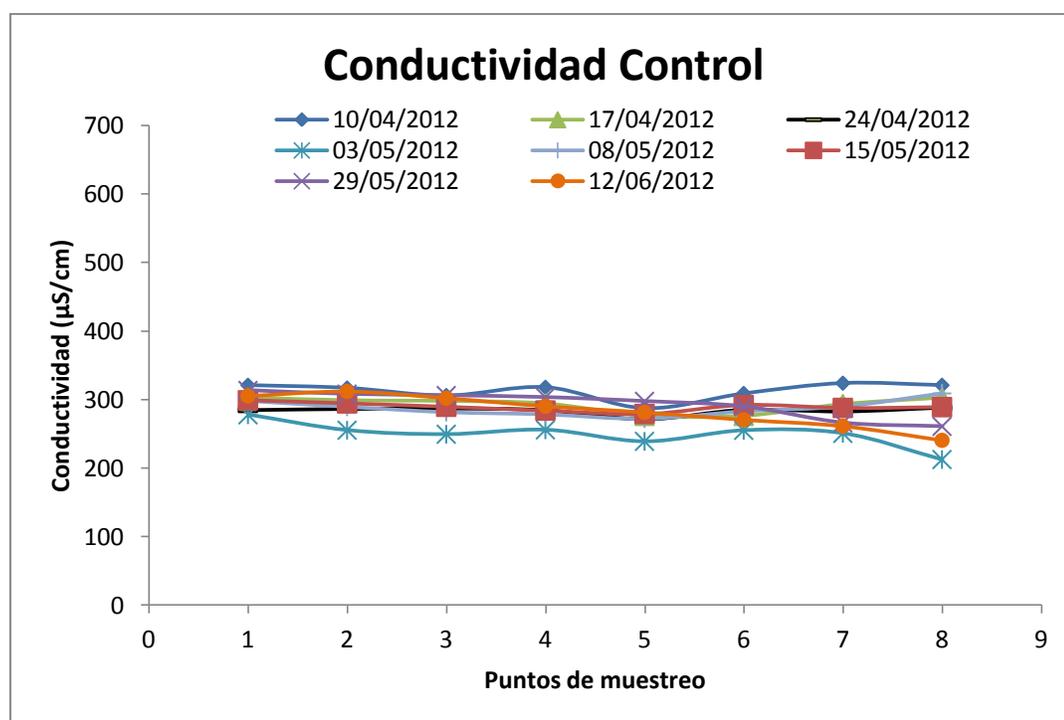


Figura 4.7.1B: Gráfica conductividad vs puntos de muestreo en un periodo de 8 semanas del humedal de control.

En la figura 4.7.1B se evidencia que a lo largo del humedal de control los valores de la conductividad se mantienen estables, a diferencia que con el humedal de tratamiento, en

ninguno de los puntos de muestreo se registra un incremento de la conductividad. La conductividad eléctrica durante todas las semanas en el caudal de entrada se mantuvo dentro del rango de 277,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 321 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

% Incremento Conductividad		
Fecha	Tratamiento	Control
10/04/2012	55	0
17/04/2012	1	0
24/04/2012	1	1
03/05/2012	20	-24
08/05/2012	2	4
15/05/2012	-24	-3
29/05/2012	-22	-17
12/06/2012	-22	-21

Tabla 4.7.1: Porcentaje de incremento de conductividad en los humedales de tratamiento y de control.

En la tabla 4.7.1 se muestran los porcentajes de incremento de conductividad eléctrica al comparar el caudal de entrada y el de salida, en algunos casos se observa que se disminuye la conductividad. Como se había mencionado previamente, destaca el incremento registrado en la semana del 10/04/2012, con un 55% de aumento. Algo también muy notorio es el hecho de que en el humedal de tratamiento se registran más incrementos que en el humedal de control.

4.8 Resultados pH y Turbidez

Los resultados de pH para el humedal de tratamiento se muestran en la figura 4.8.1A, y en la figura 4.8.1B se muestran las mediciones de pH para el humedal de control.

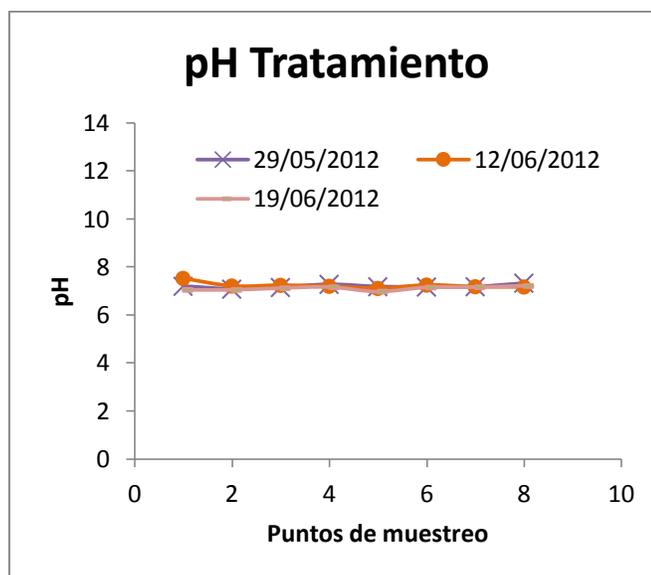


Figura 4.8.1A: Gráfica pH vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.

Como se puede ver en la figura 4.8.1A el pH entra entre el rango de 7,1 – 7,3 los cuales son aceptables para agua de riego (rango establecido en el TULSMA de 6,5 - 8,4) [18].

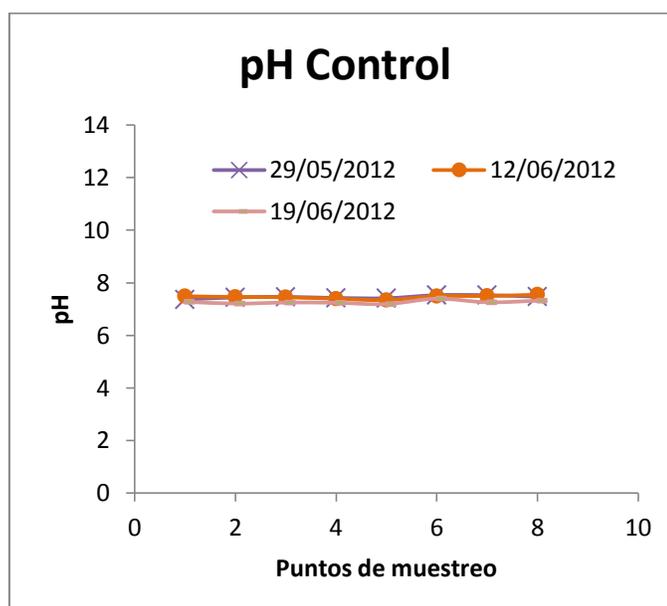


Figura 4.8.1B: Gráfica pH vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de control.

En la figura 4.8.1B se muestra algo similar, el pH varía dentro del rango de 7,2 – 7,6. Se aprecia que en el humedal de control existe un entorno más básico que en el humedal de tratamiento, pero las diferencias son mínimas.

Los resultados de turbidez para el humedal de tratamiento se muestran en la figura 4.8.2A, y para el humedal de control se muestran en la figura 4.8.2B. El valor establecido por el TULSMA como valor normal de turbidez de agua de estuario se encuentra en el rango de 0 NTU – 50 NTU [18].

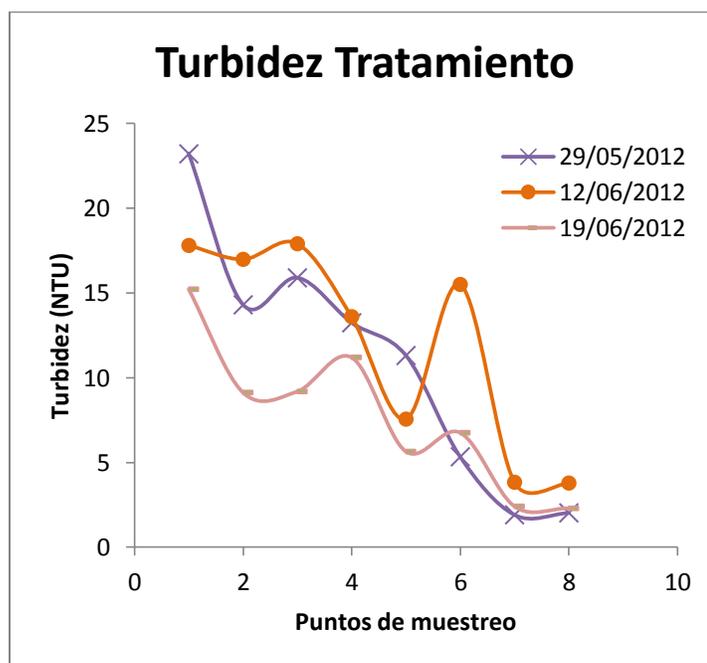


Figura 4.8.2A: Gráfica turbidez vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de tratamiento.

Como se puede ver en la figura 4.8.2A la turbidez del agua disminuye a lo largo del humedal de tratamiento, el valor máximo de turbidez se lo registró en la semana del 29/05/2012 con un valor de 23 NTU, y el valor mínimo se lo registró en la misma semana con un valor de 2 NTU.

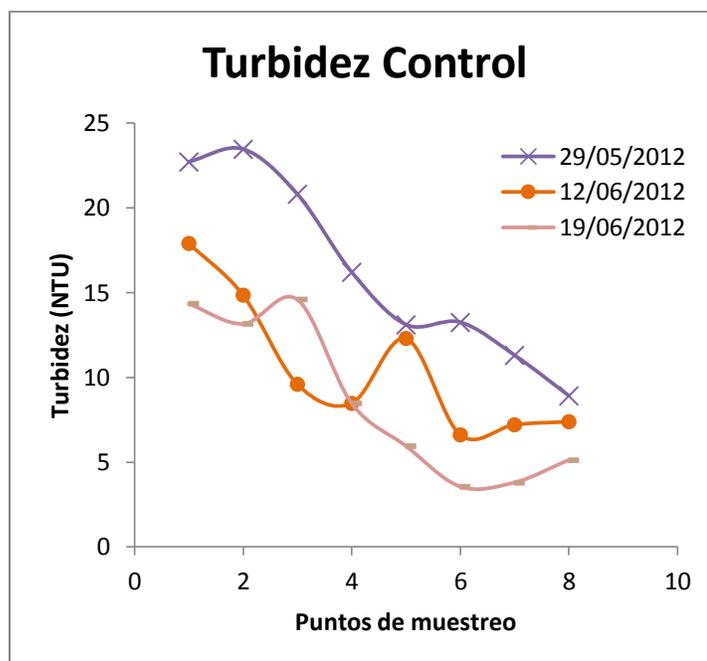


Figura 4.8.2B: Gráfica turbidez vs puntos de muestreo en un periodo de 3 semanas del humedal de Control.

En la figura 4.8.2B se observa que la turbidez del agua disminuye a lo largo del humedal de control. El valor máximo de turbidez se lo registró en la semana del 29/05/2012 con un valor de 23 NTU, y el valor mínimo se lo registró en la semana del 19/06/2012 con un valor de 4 NTU.

% Eficiencia remoción turbidez		
Fecha	Tratamiento	Control
10/04/2012	91	61
17/04/2012	79	59
03/05/2012	85	64
% Promedio	85	61

Tabla 4.8.1: Porcentaje de remoción de turbidez en los humedales de tratamiento y de control.

En la tabla 4.8.1 se registran los porcentajes de remoción de turbidez de ambos humedales.

El humedal de tratamiento tiene una mayor eficiencia en la remoción de turbidez, con un 85% de eficiencia, que el humedal de control con un 61% de eficiencia.

4.9 Resultados Amonio y Nitratos

Los resultados para las mediciones de amonio se los muestra en la figura 4.9.1A para el humedal de tratamiento, y en la figura 4.9.1B para el humedal de control. Los datos presentados son aquellos de las semanas en las cuales existieron concentraciones presentes de amonio, es decir en el resto de semanas de monitoreo los datos de las mediciones salían de la curva de calibración, mostrando que en esas semanas las concentraciones de amonio eran inferiores a 1 mg/L.

Las mediciones de nitratos también se realizaron y se encontró que en ninguna de las semanas de estudio los valores de nitrato eran inferiores a 1 mg/L. En concentraciones elevadas el nitrato y el amonio son nocivos para los cultivos ya que un exceso de los mismos puede resultar en un desarrollo vegetativo excesivo, detenimiento y retraso de la madurez [26].

El TULSMA no cuenta con un valor límite para la cantidad de amonio o nitrato máxima para agua de riego, sin embargo se considera que valores inferiores a 5 mg/L de nitrógeno no afectan a los cultivos, valores entre 5 mg/L y 30 mg/L de nitrógeno afectan a cultivos sensibles, y concentraciones por sobre los 30 mg/L de nitrógeno ya son de preocupación. Se toma en cuenta que 1,3 mg/L de amonio es equivalente a 1 mg/L de nitrógeno, y 4,5 mg/L de nitrato es igual a 1 mg/L de nitrógeno [28].

En la figura 4.9.1A se pueden apreciar los resultados para el humedal de tratamiento.

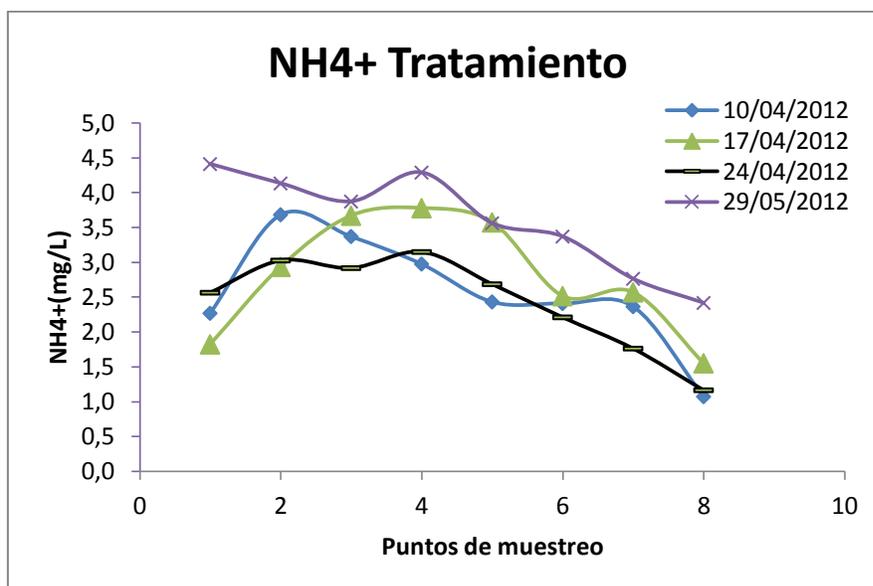


Figura 4.9.1A: Gráfica NH₄⁺ vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas del humedal de tratamiento.

Para las 4 semanas que se encontró presencia de amonio, el rango de las concentraciones del mismo en el afluente fue entre 1,8 mg/L – 4,4 mg/L. Como se puede ver, a lo largo del humedal hay una disminución de la concentración de amonio.

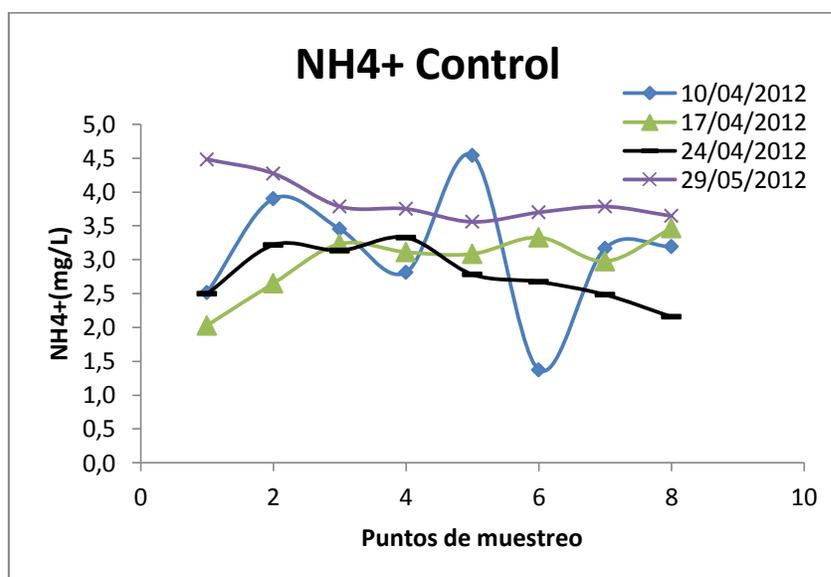


Figura 4.9.1B: Gráfica NH₄⁺ vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas del humedal de control.

En la figura 4.9.1B se presentan los resultados para el humedal de control. Para las 4 semanas que se encontró presencia de amonio, el rango de las concentraciones de amonio en el caudal de entrada fue entre 2,0 mg/L – 4,5 mg/L. A lo largo del humedal de control no se registra una disminución de la concentración de amonio pronunciada.

% Eficiencia remoción NH₄⁺		
Fecha	Tratamiento	Control
10/04/2012	53	0
17/04/2012	15	0
24/04/2012	55	14
29/05/2012	45	19
% Promedio	42	8

Tabla 4.9.1: Porcentaje de eficiencia de remoción NH₄⁺.

La tabla 4.9.1 muestra los porcentajes de eficiencia de remoción de amonio para ambos humedales. Se aprecia que el humedal de tratamiento tiene una mayor eliminación de amonio que el humedal de control.

Las mediciones de nitratos mostraron que en todas las semanas de monitoreo, incluso en las semanas donde se evidenció amonio, se encontraba en concentraciones menores a 1 mg/L. La mayor concentración de amonio con respecto a los nitratos sugiere que el agua de riego ha tenido contacto con agua servida procedente de las comunas aledañas [29]. En la figura 4.9.2 se muestra de manera gráfica que los resultados para nitratos, en las semanas donde se evidenció amonio fueron inferiores a 1 mg/L.

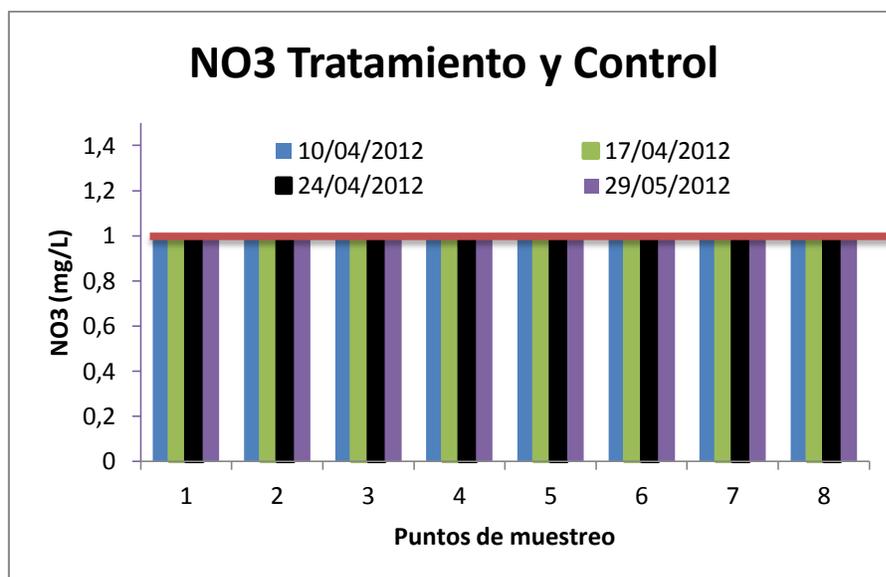


Figura 4.9.2: Gráfica NO3 vs puntos de muestreo en un periodo de 4 semanas en ambos humedales se detectaron concentraciones por inferiores a 1 mg/L.

CAPÍTULO V

Discusión

A continuación se presenta la tabla 5.1, donde se presenta un resumen de los promedios de eficiencias de remoción de contaminantes de ambos humedales.

Parámetro	% Promedio de Remoción Contaminante	
	Humedal de Tratamiento	Humedal de Control
DQO total	88	63
DQO particulada	86	54
DQO soluble	92	88
SST	53	50
Coliformes totales	65	34
<i>E. Coli</i>	80	37
Turbidez	85	61
Amonio	42	8

Tabla 5: Resumen de % remoción de distintos contaminantes para el humedal de tratamiento y el humedal de control.

En la tabla 5.1 se puede apreciar la diferencia entre las eficiencias de ambos humedales, siendo el humedal de tratamiento el que presenta mayor eficiencia de remoción en todos los contaminantes. Se evidencia menor diferencia en eficiencia de remoción en los SST ya que el proceso de remoción es por medio de la filtración y no depende mucho de las macrófitas. En las siguientes secciones se discute los resultados obtenidos, basándose en resultados de otros estudios de experimentos similares.

5.1 Discusión DQO total, DQO particulado y DQO soluble

Anteriormente se había mencionado que la materia orgánica que existe en el agua, se la puede encontrar en forma particulada y en dilución. La manera de cómo los humedales

remueven la materia orgánica (representada por la DQO), es principalmente por la actuación de bacterias que se encargan de degradarla. El suelo de los humedales también retiene la materia orgánica particulada actuando como filtros [29].

Como se evidencia en la tabla 5.1, la remoción de DQO del humedal de tratamiento tuvo una eficiencia de remoción del 88%, y para el humedal de control se obtuvo una eficiencia de remoción del 63%. Los rendimientos de remoción de DQO esperados para humedales de flujo horizontal subsuperficial se espera que se encuentren dentro del rango de 75% - 85% [29]. El resultado es el esperado y de hecho el rendimiento es 3% mejor de lo que se espera. En el humedal de control a pesar de existir disminución de la DQO la eficiencia no se compara con la eficiencia establecida por un humedal con vegetación macrófita. En lo que respecta a la DQO particulada, se esperaba que fuese eliminada rápidamente por medio de la arena actuando como filtro, sin embargo los resultados muestran que esto no sucede del todo sino que el humedal de tratamiento elimina el 86% de la DQO particulada mientras que el humedal de control elimina el 54%. En lo que respecta a la DQO soluble se evidencia una remoción del 92% para el humedal de tratamiento y una remoción del 88% para el humedal de control.

Los resultados de remoción de DQO obtenidos en la construcción de un humedal de 671 m² en la EDAR de los Gallardos, municipio de Almería en España, no concuerdan con aquellos obtenidos en este estudio. Al humedal se lo construyó conectado a una laguna de maduración, la cual provee con el caudal de alimentación para este humedal. A este humedal se le suministra una carga hidráulica de 0,23 m/día, y una carga orgánica de 0,0236 kg/m²día (datos menores a los de este estudio 1,9 m/día y 0,674 kg/m²día) Se

obtuvo un valor de 224 mg/L de DQO para la alimentación del humedal, valor mayor al que se obtuvo en este estudio (mayor valor de DQO fue de 118 mg/L). La diferencia radica en que a la salida del humedal de los Gallardos se obtuvo una concentración de 155 mg/L de DQO lo que representa un rendimiento del 33%, un porcentaje mucho menor al obtenido en este estudio (88%). El porcentaje del 33% se justifica ya que en ese caso el humedal se lo implantó a manera de tratamiento terciario [30].

Otro estudio realizado por CHI Li-hua y otros, demuestra la eficiencia en la remoción de DQO por sistemas de humedales híbridos, humedales de flujo horizontal en combinación con humedales de flujo vertical. De un tanque séptico sale el caudal que alimenta el humedal de flujo horizontal, y el efluente de este humedal alimenta el humedal de flujo vertical. Descubrieron también que el tiempo de retención hidráulico aumenta o disminuye la eficiencia de remoción de DQO. El experimento se lo realizó para las distintas estaciones del año y se demostraron eficiencias de remoción del 89%, 87%, 83%, y 86% para el verano, otoño, invierno, y primavera respectivamente. Se aprecia que todos los valores se asemejan mucho al 88% obtenido de este estudio, la diferencia siendo que la alimentación es diferente ya que en este caso se da tratamiento a agua proveniente de un reservorio, mientras que en el estudio realizado por CHI Li-hua se trata agua de un tanque séptico con valores mayores de contaminación [31].

En un estudio realizado por Valderrama y otros, se compara la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes, utilizando diferentes macrófitas acuáticas (*E. crassipes*, *Lemna* sp., *Limnobium laevigatum*, y una especie de micro algas). En el estudio se demostró que el tratamiento con *E. crassipes* se obtiene una remoción del 83% de DQO, mientras que con el

resto de especies los porcentajes de remoción se encuentran entre el 45% - 55%. Se explica que la macrófita *E. crassipes* tiene raíces densas y plumosas que proporcionan más sitios donde las comunidades bacterianas pueden acentuarse. Lo mismo sucede con el *Arundo donax*, que tiene raíces similares a las explicadas para la *E. crassipes*, por lo cual se podría explicar el porqué de la alta eficiencia de remoción [32].

5.2 Discusión ST, SV, SST y SSV

El principal agente en la eliminación de los sólidos (ST, SV, SST y SSV) en un humedal, es el suelo. En este caso la arena actúa como un filtro que retiene una gran cantidad de sólidos presentes en el agua. Los resultados de mayor interés son los que respectan a los sólidos suspendidos ya que el resto de sólidos pueden sedimentar con facilidad y ser filtrados. Normalmente para un humedal de flujo horizontal se esperaría una depuración de sólidos suspendidos entre el 85% - 90% [29]. Los resultados en este caso sugieren que para el humedal de tratamiento hay una remoción promedio de SST del 53% y para el humedal de control hay una remoción promedio de SST del 50%. Se podría decir que los porcentajes de remoción de SST son bajos, sin embargo hay que tener en cuenta de que las concentraciones de SST son muy bajas es decir concentraciones menores a 50 mg/L, recordando que el límite máximo permisible para aguas de riego de SST establecido en el TULSMA es de 100 mg/L.

En un estudio realizado en Estados Unidos, se recogieron resultados de varios tipos de humedales (humedales de flujo horizontal, de flujo vertical, e híbridos). Los resultados de interés son aquellos para los humedales de flujo horizontal. Se encontró que de los resultados obtenidos para varios humedales de flujo horizontal, se obtuvo un promedio de

eficiencia de remoción de SST del 75%. Al ser comparado con el 53% obtenido en este estudio se demuestra que en este caso el tratamiento de sólidos suspendidos totales no es el deseado ni el esperado [23].

Otro estudio realizado en la provincia de Cotopaxi, Ecuador, se analizaron la eficiencia de remoción de dos humedales conteniendo dos macrófitas distintas. Uno de ellos contenía el lechuguín (*Eichhornia crassipes*) y el otro utilizaba el carrizo (*Arundo donax*). También se mostraron los resultados para distintos tiempos de funcionamiento: 0, 2, y 4 días de operación. Los resultados para el humedal de lechuguín indicaban que durante en los tres diferentes tiempos de operación siempre se obtuvo que la concentración de SST era menor a 50 mg/L, lo que sucede de igual manera en este estudio. No se presentan porcentajes de remoción en ese estudio pero no lo son necesarios ya que las concentraciones son mucho más bajas que el límite máximo permisible. En el humedal de carrizo ocurrió lo mismo que en el humedal de lechuguín, se obtuvieron siempre concentraciones menores a 50 mg/L [33].

En un estudio realizado por Keith R. Hench y otros, se realizó estudios en humedales de escala de laboratorio (capacidad de 400 L con un caudal de alimentación de 19 L/día), uno con vegetación y otro de control sin vegetación. El resultado obtenido para SST en el afluente de ambos humedales fue de 156 mg/L, y los resultados para el efluente del humedal con vegetación y de control fueron 26,2 mg/L y 14,6 mg/L respectivamente. El porcentaje de remoción para el humedal con vegetación fue del 83% mientras que para el humedal de control fue del 91%. Explica que el hecho de que haya mayor remoción en el

humedal de control se debe a la mayor evapotranspiración y/o movimiento del sustrato por las raíces de las plantas en el humedal de tratamiento [27].

5.3 Discusión Coliformes totales y *E. Coli*

En anteriores secciones se ha explicado que la remoción de organismos patógenos se da en gran parte por la acción de bacteriófagos, muerte natural de las células, y la toxicidad que hay sobre los organismos patógenos por antibióticos producidos en las raíces de las plantas. Se espera que en un humedal de flujo horizontal haya una eliminación entre el 90% - 99% de las bacterias coliformes fecales (*E. Coli*) [29]. Los resultados obtenidos de las semanas del monitoreo indican que en un promedio el humedal de tratamiento removió el 65% de los coliformes totales y el 80% de *E. Coli*. En el humedal de control removió el 34% de los coliformes totales y el 44% de *E. Coli*. El resultado obtenido para el humedal de tratamiento da muestra de que algún factor influye para que el tratamiento no haya sido suficiente respecto a los coliformes totales, pero en lo que respecta a *E. Coli* el tratamiento está muy cercano a lo esperado. En algunas de las semanas de monitoreo, el tratamiento brindado no permitiría la utilización del agua para el riego de cultivos agrícolas ya que los niveles de coliformes totales del efluente sobrepasan el límite establecido por el TULSMA de 1000 UFC/100 mL.

Un experimento realizado en 1970 por Seidel demostró que los efectos bactericidas varían con las diferentes especies de plantas, en 10 especies de plantas obtuvieron una eficiencia de remoción de *E. Coli* del 99%, en otras 13 especies obtuvieron una eficiencia del 85% y otras 31 especies solamente removieron el 15%. Este experimento fue corroborado por otro experimento realizado en 1996 por Rivera, en el cual se demostró una eficiencia de

remoción de *E. Coli* entre el 35% - 90% en humedales con dos tipos de especie de macrófitas (*Phragmites* y *Typha*). También demostraron que la remoción es mucho mayor (no se especifica porcentaje) en humedales con vegetación que en humedales sin vegetación al utilizar en el experimento, un humedal de control [11].

En un estudio realizado en Diciembre del 2004, se utilizó una combinación de una laguna facultativa, un humedal de flujo horizontal superficial y un humedal de flujo subsuperficial para determinar la eficiencia de remoción de distintos patógenos. Lo importante para este estudio es lo que respecta a la eficiencia de remoción del humedal de flujo subsuperficial, los resultados mostraron una eficiencia de remoción de *E. Coli* del 72,02% que resulta ser menor al de este estudio. Sin embargo el sistema combinado dio como resultado una remoción del 99,33% [34].

En el estudio que se realizó en la provincia de Cotopaxi, donde se comparó humedales con carrizo y lechuguín, para el humedal de lechuguín se obtuvieron los siguientes resultados de coliformes fecales (*E. Coli*), para el día inicial (día 0) un conteo de 4000 UFC/mL, para el segundo día un conteo de 57 UFC/mL y para el cuarto día un conteo de 5 UFC/mL. Esto indicó una remoción del 99,87% en la remoción de *E. Coli* al final del cuarto día, resultado de eficiencia esperado. En el humedal de carrizo se obtuvieron los siguientes resultados de coliformes totales, para el día inicial (día 0) un conteo de 10000 UFC/mL, para el segundo día un conteo de 900 UFC/mL y para el cuarto día un conteo de 200 UFC/mL. Esto indicó una remoción del 98% en la remoción de coliformes totales [33].

5.4 Discusión Oxígeno Disuelto

Los resultados de oxígeno disuelto demostraron aumentos y disminuciones de la concentración de oxígeno disuelto a lo largo del humedal, y al comparar la concentración en el afluente con la del efluente, no existe mayor diferencia. La vegetación se encarga de distribuir una mayor cantidad de oxígeno por medio del tallo y las hojas hacia las raíces, por lo cual se esperaría que en ciertas zonas del humedal, en donde la vegetación es de mayor densidad, existan concentraciones de OD más elevadas (explicando así los picos) [30].

En el estudio realizado por Valderrama y otros, que se había mencionado previamente en la sección 5.1 en el cual se había realizado un experimento con tres tipos de macrófitas y uno con micro algas, se obtuvieron valores bajos de oxígeno disuelto (entre 0 mg/L - 1,8 mg/L) sin embargo se asemejan mucho los resultados obtenidos en este estudio ya que la variación entre la concentración inicial de OD y la concentración final de OD es mínima. Explican que una de las razones para tener concentraciones tan bajas de OD es que la cubierta que tienen los humedales debido a las plantas impide la difusión del aire de la atmósfera hacia el agua (con las micro algas obtuvieron una concentración de 11,53 mg/L) [32].

En el estudio realizado por Keith R. Hench y otros, se realizó estudios en humedales de escala de laboratorio (capacidad de 400 L con un caudal de alimentación de 19 L/día), uno con vegetación y otro de control sin vegetación. Los resultados de OD de este experimento fueron parecidos al del estudio realizado ya que no difieren en mucho las concentraciones iniciales (1,85 mg/L) y finales (1,62 mg/L para el humedal de control y 2,52 mg/L para el humedal de tratamiento) de OD. Explican que hay mayor cantidad de oxígeno en el efluente del humedal con vegetación ya que las raíces liberan oxígeno hacia la rizosfera, esto

también podría explicar el porqué hay picos más pronunciados en la gráfica del humedal de tratamiento (4.6.1A) que en la gráfica del humedal de control (4.6.1B) [27].

Finalmente en el estudio realizado por Elizabeth Ramírez y otros, en dos humedales distintos en las localidades de Jilotepec y Matilde en México. El sistema de Jilotepec tiene la siguiente configuración, tanque aerobio, humedal y tanque de almacenamiento. El sistema de Matilde cuenta con el siguiente diseño: tanque anaerobio, humedal y tanque de almacenamiento. Los resultados de OD encontrados para el sistema de Jilotepec muestran una concentración media de oxígeno disuelto en el caudal de ingreso en el rango de 1,4 mg/L – 3,8 mg/L y una concentración alta en la salida entre el rango de 4,1 mg/L – 8 mg/L. Para el sistema de Matilde, los resultados de OD demostraron concentraciones bajas en tanto el caudal de entrada (0,9 mg/L – 2,3 mg/L), como en el de salida (0,9 mg/L – 1,5 mg/L) [35].

5.5 Discusión Conductividad

Los resultados de conductividad muestran un aumento en las concentraciones de la misma al final de ambos humedales (más evidente en el humedal de tratamiento que en el de control). Al ser un lecho de arena el que se utiliza en ambos humedales, puede que el arrastre del agua desprenda algunas sales minerales de la arena y por consecuencia se evidencia el alza de la misma en el efluente [36]. En el caso del humedal de tratamiento, el agua arrastra los restos de suelo y minerales encontrados en las raíces de los carrizos al momento de ser trasplantados y por esa razón se explica el aumento de conductividad en los puntos 6,7, y 8. Algo importante es que los valores de salinidad (conductividad eléctrica) están siempre por debajo del límite de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ establecido en el TULSMA, por lo cual no representan un riesgo al ser utilizada el agua para el riego de cultivos.

En el estudio mencionado previamente en la sección 5.1 acerca del sistema de tratamiento con humedales en Gallardo, se obtuvieron de resultados de incremento de conductividad eléctrica al igual que en este estudio. Esto indicaría que es algo común y recurrente que a la salida del tratamiento con humedales artificiales exista un incremento de salinidad dado a las características del lecho. La cantidad de conductividad eléctrica en el afluente fue de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la conductividad eléctrica en el efluente del humedal fue de 3068 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [30].

En el estudio realizado por Bernal, F. y otros, reporta los avances logrados por la construcción de un humedal por medio de la Corporación Universitaria de la Costa (CUC). El humedal es de flujo horizontal subsuperficial y dispone a dar tratamiento a 0,33 $\text{m}^3/\text{día}$ de agua residual municipal. De resultados obtuvieron valores de conductividad eléctrica entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 475 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el efluente del sistema, valores muy similares a los presentados en este estudio (rango de 228,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 502 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Explican que este incremento se debe a la fricción creada por el movimiento del agua contra el lecho, el cual libera sales que se incorporan al agua [36].

5.6 Discusión pH y Turbidez

Los resultados de pH mostraron que durante el tratamiento el mismo no varió mucho y se mantuvo entre el rango de 6,98 – 7,53 para el humedal de tratamiento y en el rango de 7,18 – 7,55 para el humedal de control valores que se encuentran dentro del rango establecido por el TULSMA de 6,5 – 8,4.

En el estudio realizado por Batty, L.C. y otros, se instaló un sistema de dos humedales para dar tratamiento a agua proveniente de acciones mineras en Yorkshire. A ambos humedales

se los dividió en tres secciones, ingreso, sección media, y salida. Los resultados obtenidos de pH para el primer humedal para las distintas secciones fueron de 7,6 (ingreso), 7,68 (sección media), y 7,6 (salida). Para el segundo humedal los resultados de pH fueron de 7,77 (ingreso), 7,63 (sección media), y 7,77 (salida). Estos datos muestran una regularidad existente en relación al pH y concuerda con los resultados de este estudio [37].

Respecto a la turbidez, los resultados mostraron una clara disminución de la misma a lo largo de ambos humedales. Como se había mencionado el valor establecido por el TULSMA como valor normal de turbidez de agua de estuario se encuentra en el rango de 0 NTU – 50 NTU, lo que indica que todos los valores obtenidos dentro de este estudio pertenecen a este rango. La turbidez además de indicar de manera indirecta una medición de sólidos en suspensión, también puede indicar de manera indirecta el grado de eutrofización del agua [38].

En el estudio realizado en Cotopaxi, donde se utilizó el carrizo y el lechuguín en dos distintos humedales también se midió la turbidez. Para el periodo de 0 días, 2 días, y 4 días se encontró que la turbidez para el humedal conteniendo lechuguín fue de 2,13 NTU, 2,91 NTU, y 0,93 NTU respectivamente. Para el periodo de 0 días, 2 días, y 4 días se encontró que la turbidez para el humedal conteniendo el carrizo fue de 2,13 NTU, 10,17 NTU, y 9,92 NTU respectivamente. La razón del incremento en la turbidez no se lo discute en el estudio [33].

5.7 Discusión Amonio y Nitratos

Como se había establecido, el exceso de amonio puede resultar nocivo para los cultivos ya que puede tener como consecuencia un desarrollo vegetativo excesivo, y/o detenimiento y

retraso de la madurez [26]. También excesos de amonio influyen el consumo acelerado de oxígeno debido a la nitrificación [39]. Estudios concuerdan en que el tener concentraciones de: 5 mg/L de amonio en aguas de irrigación no presentan un problema serio, concentraciones entre 5 mg/L - 30 mg/L afectan a cultivos sensibles, y concentraciones mayores a 30 mg/L representan problemas para irrigación [40 y 41]. Los resultados de amonio en el humedal de tratamiento mostraron un rango de concentraciones entre 1,8 mg/L – 4,4 mg/L para el afluente, y para el efluente concentraciones entre 1,1 mg/L – 2,4 mg/L (eficiencia de remoción promedio del 42%). Los resultados de amonio en el humedal de control demostraron que existió concentraciones entre 2,0 mg/L – 4,5 mg/L para el afluente, y para el efluente concentraciones entre 2,2 mg/L – 3,6 mg/L (eficiencia de remoción promedio del 16%). Se espera usualmente que los humedales tengan una eficiencia de remoción de nitrógeno total (incluido amonio, nitritos, y nitratos) entre 20% - 40%, valor que es similar al obtenido en este estudio [29]. Respecto a los nitratos, no se encontraron concentraciones superiores a 1 mg/L. La diferencia entre el humedal de tratamiento y el de control es que las plantas asimilan los nutrientes dentro de ellas, y al no haber vegetación en el humedal de control, la remoción es de menor velocidad. Lo cual justifica el hecho de que no se registre un incremento de NO_3 en el humedal de tratamiento. En el humedal de control no existe mayor remoción de amonio lo que significa que no hay un incremento de NO_3 por nitrificación. En una caracterización de agua para irrigación realizada en el estado de Aragua, Venezuela en el 2010, también encontraron que los valores de amonio eran mucho mayores a los valores de nitratos, y por lo cual sugieren que el agua ha tenido contacto con aguas servidas [42].

Un estudio de dos humedales artificiales que dan tratamiento a agua de escorrentía producida por lluvias en dos distintas granjas, fue realizado por Fabrice Gouriveau en el sudeste de Escocia. El proyecto buscaba demostrar las eficiencias de los humedales en respecto a la remoción de distintos compuestos. Se monitoreó los humedales por un periodo de 2 años (2006 – 2008) y los resultados mostraron que ambos removían los contaminantes en cierto porcentaje. Se demostró que los porcentajes de remoción de amonio para ambos humedales fueron del 42% para el primero (granja de lácteos) y del 34% para el segundo (granja de ganado). Los resultados son similares y concuerdan a los obtenidos con el humedal de tratamiento de este estudio [17].

Otro estudio que demuestra resultados similares a los obtenidos en este proyecto es el que se realizó a escala de laboratorio con tres tipos de macrófitas, un tipo de micro alga y uno de control (se ha mencionado este estudio realizado por Valderrama en secciones anteriores). En este estudio obtuvieron como resultados que la macrófita *E. crassipes* depuró el 95,6% de amonio al final del tratamiento. El resto de macrófitas depuraron entre el 39% - 44% y el humedal de control removió el 5,4% de amonio. Explican que la remoción de amonio se le asocia a la presencia de organismos fotosintéticos y puede deberse a procesos de absorción y de nitrificación – desnitrificación [32].

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones

La instalación de los humedales para el tratamiento del agua del reservorio de la granja fue exitosa. Los objetivos de diseño, construcción, y monitoreo se cumplieron obteniendo resultados complacientes. Respecto a la eficiencia del humedal se ha podido demostrar que cumple con lo esperado y se ha corroborado estos hallazgos con otros estudios que han encontrado resultados similares. La remoción de la mayoría de agentes contaminantes fue eficaz y cumple con los parámetros establecidos para agua de riego. La remoción de organismos coliformes todavía indica que hace falta una mayor depuración, la remoción será mucho mayor si se disminuye el caudal de entrada, prolongando así el tiempo de retención hidráulico y permitiendo una mayor efectividad de eliminación de coliformes totales y *E. Coli* sin afectar el rendimiento de los demás parámetros.

Cabe mencionar que a pesar de haber sido un proyecto exitoso, en caso de querer replicar el mismo proyecto en otra ubicación se debería tomar en cuenta unas recomendaciones que salieron a partir de la experiencia con este estudio. En la fase de construcción sería mucho mejor haber colocado los puntos de muestreo antes de colocar el lecho de arena, hubo dificultades al momento de cavar los puntos de muestreo debido a inestabilidad de la arena. Otra recomendación sería colocar una capa de geo-textil sobre los folios de polietileno para evitar el desgaste de los mismos debido al contacto con el sol y la lluvia. Antes de construir tomar en cuenta que todas las mediciones sean precisas. De esta manera se podrá evitar lo sucedido en este proyecto que no se tomó en cuenta el diámetro de los puntos de muestreo y esto causó que en lugar de existir 9 puntos (que era lo inicialmente planeado), existan

solamente 8 puntos. Otro error identificado en este proyecto fue que no se consideró que al momento de comenzar a alimentar los humedales, la arena comenzó a compactarse lo que originó a una disminución del nivel del lecho y provocó que en los metros finales del humedal haya agua superficial. Otro punto importante sería el recubrimiento con rejillas a los puntos de muestreo, en la semana del 05/06/2012 se encontraron dos roedores en estado de descomposición en dos puntos de muestreo distintos por lo cual los resultados obtenidos de esa semana no eran representativos y se los excluyó de este estudio como se explicó en varias secciones anteriores.

Otros factores a tomarse en cuenta para que no haya problema con los resultados son:

- La remoción de hojarasca y vegetación invasora dentro de los humedales para que los resultados representen solamente el tratamiento realizado por la vegetación elegida.
- Debido a la intermitencia del tratamiento por falta de agua, siempre se tuvo que esperar a que los humedales se llenen por completo y lograr que los caudales se igualen para dejar en funcionamiento.

Con estas sugerencias y un buen mantenimiento de los humedales, se tiene un tratamiento de aguas ligeramente contaminadas efectivo y relativamente bajo en costos que puede ser implementado en diferentes sectores.

Referencias Bibliográficas

1. Rodríguez, E.L., *Plan de manejo de los humedales existentes en la comunidad: Pichan-San Isidro-Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011. Riobamba: p. 01-10.
2. CENIA, *Manual de depuración de aguas residuales urbanas: Lagunaje*. Alianza por el Agua: p. 151-163.
3. Gonzaga, S.L., *Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Ingenio Monterrey MALCA*. Universidad Técnica Particular de Loja, 2007. Catamayo: p. 01-03.
4. Llagas, W.A., & E.G. Gómez, *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNSMSM*. Revista del Instituto de Investigaciones Facultad Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2006: p. 85-96.
5. Bécares, E., *Limnology of natural systems for wastewater treatment. Ten years of experiences at the Experimental Field for Low-Cost Sanitation in Mansilla de las Mulas (León, Spain)*. *Limnetica*, 2006. **25**(1-2): p. 143-154.
6. Peña, M.R., M.V. Ginneken, & C.A. Madera, *Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales*. Universidad del Valle. Ingeniería y Competitividad, 2003. **5**(1). Santiago de Cali: p. 01-09.
7. Márquez, M.R., A.M. Castillo, & J.S. Sierra, *Manual de Plantas Útiles*. Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2003: Chihuahua. p. 07.
8. DuPoldt, C., et al., *A handbook of constructed wetlands, a guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, and stormwater in the Mid-Atlantic Region*. EPA. p. 17-19.
9. Arias, C.A., H. Brix, *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina ISSN 0124-8170, 2003: p. 17-24.
10. Bais, H.P., et al., *The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms*. *Plant Biol.*, 2006. **57**: p. 233-266.
11. Stottmeister, U., et al., *Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment*. Elsevier: *Biotechnology Advances* 22, 2003: p. 93-117.
12. Setty, K., *Propuesta para un Proyecto Piloto: Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Negras en la Colonia Cinco de Marzo, San Cristóbal de las Casas, México*. University of California. Santa Barbara: p. 01-10.
13. Greenway, M., *The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia*. Elsevier: *Ecological Engineering* 25, 2005: p. 501-509.

14. Gónzales, O., G.D. Valdés, *Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2011. **32**(1): p. 61-70.
15. Sánchez, I., G. Darwin, *Diseño y construcción de una tamizadora de arenas para moldes de fundición. Capítulo 1: Propiedades de las Arenas*. Ingeniería Mecánica CUE, 2011: p. 08.
16. Barrera, N.E., et al., *Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias*. XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia. Bogotá: p. 10.
17. Gouriveau, F., *Constructed Farm Wetlands (CFWs) designed for remediation of farmyard runoff: an evaluation of their water treatment efficiency, ecological value, costs and benefits*. University of Edinburgh, 2009. Edinburgh: p. 01-144.
18. Ministerio del Ambiente Ecuador (MAE), *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. TULSMA: Libro VI Anexo 1: p. 295-336.
19. Mena, A., *Las nuevas centralidades urbanas del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: p. 12.
20. CONECEL, *Ficha ambiental y plan de manejo de la estación base celular Laviña provincia de Pichincha Conecel*. Terrambiente, 2012: p. 03-09.
21. Google, *Google Earth [Internet]*. Mountain View, 2006. California [consultada 26 de agosto de 2012]. <<http://earth.google.com/>>
22. Ruales, C., *Estudios para la recuperación de la flora nativa en el valle de Tumbaco – Distrito Metropolitano de Quito: Inventario florístico y ensayo de propagación vegetativa*. Universidad San Francisco de Quito, 2007. Quito: p. 06.
23. Vymazal, J., *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Water ISSN 2073-4441, 2010: p. 530-549.
24. Pérez, G., et al., *Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio*. Instituto Tecnológico de Tuxtia Gutierrez. Chiapas: p. 01-07.
25. *Placas Petrifilm para el Recuento de E. Coli y Coliformes Totales*. 3M, 2004: p. 01-02.
26. Sánchez, J., *Clasificación y uso de las aguas de riego*. FERTITEC S.A.: p. 01-12.
27. Hench, K.R., et al., *Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands*. Pergamon-Elsevier: Water Research, 2003. **37**: p. 921-927.
28. Ayers, R.S., & Wercot, D.W., *Miscellaneous Problems*. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1994. Rome: cap. 5.

29. Gómez, R., *Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales. Costes de construcción de un humedal artificial*. Consorcio Agropecuario Provincial de Segovia. Segovia: p. 07-09.
30. Lahora, A., *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería)*. Gestión de Aguas del Levante Almeriense. Almería: p. 99-112.
31. Li-hua, C., et al., *Performance of hybrid constructed wetland systems for treating septic tank effluent*. Journal of Environmental Sciences, 2006. **18**(4): p. 665-669.
32. Valderrama, L.T., et al., *Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (E. Crassipes, Lenma sp. Y L. Laevigatum) en la remoción de indicadores de contaminación fecal en aguas residuales domésticas*. Universidad del Valle: p. 193-199.
33. Pozo, C.G., & J.R. Velasteguí, *Fitorremediación de las aguas del canal de riego Latacunga-Salcedo-Ambato mediante humedales vegetales a nivel de prototipo de campo. Salcedo-Cotopaxi*. Universidad Técnica de Ambato, 2012. Salcedo: p. 01-07.
34. Reinoso, R., L.A. Torres, & E. Bécares, *Efficiency of natural systems for removal of bacteria and pathogenic parasites from wastewater*. Elsevier: Science of the Total Environment, 2008. **395**: p. 80-86.
35. Ramírez, E., et al., *Aplicación de humedales artificiales para el tratamiento del agua residual de casa-habitación en áreas rurales*. Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente. Tlalnepantla: p. 01-07.
36. Bernal, F., et al., *Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la Corporación Universitaria de la Costa*. Universidad del Valle: p. 149-154.
37. Kantawanichkul, S., *Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control*. International Water Association, 2010. **36**: p. 01-44.
38. Department of the Environment, Heritage and Local Government, *Chapter 7: Operation, Maintenance, and Monitoring*. Integrated Constructed Wetlands. Guidance Document for Farmyard Soiled Water and Domestic Wastewater Applications, 2010: p. 76-77.
39. Greenway, M., *The Role of Macrophytes in Nutrient Removal using Constructed Wetlands*. Griffith University. **15**: p. 331-349.
40. P.R. George, *Agricultural Water Quality Criteria Irrigation Aspects*. Government of Western Australia, 2004: p. 06.
41. Department of Water Affairs and Forestry, *Volume4: Agricultural Use: Irrigation*. South African Water Quality Guidelines (second edition), 1996: p. 106-111.

42. Hernandez, J., et al., *Calidad del agua de riego y parámetros microbiológicos y químicos del suelo de la zona agrícola de Barbacoas, Estado Aragua*. Fac. Agron., 2011. **37**(1): p. 01-10.
43. Metcalf & Eddy., *Constituents in Wastewater: Dissolved Oxygen*. Wastewater Engineering Treatment and Reuse International Edition. McGraw-Hill, 2004. Singapore: p. 64-70.

ANEXO 1

Costos Finales de Construcción Humedales

Materiales	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Cinta P/Invernadero	2	5,77	11,54
Piola Cableada Algodón	1	4,21	4,21
Saco Cementina Rocafuerte 25kg	1	3,97	3,97
Tubo PVC P Roscable 1"	6	22,13	132,78
Codo Polimex 1" x 90	16	1,51	24,23
Unión Hidro3 1"	3	0,94	2,82
Tee Polimex 1"	2	1,86	3,73
Universal Polimex 1"	1	4,60	4,60
Tapón hidro3 hembra 1"	2	0,53	1,05
Tapón hidro3 macho 1"	2	0,52	1,03
Cajetín rectangular metal Cal.24	1	0,43	0,43
Tirafondo Galv. 1/4" x 2"	8	0,04	0,35
Taco Fischer F-10	8	0,04	0,32
Clavo acero BL. 2" Chino	10	0,04	0,45
Tornillos Colepato 3/4" x 12 crom	7	0,02	0,16
Neplo Polimex Corrido 1"	4	0,89	3,56
Neplo Polimex Corrido 1" x 10cm	2	0,47	0,94
Teflón paolo 10 mts	9	0,30	2,72
Pega tubos PVC 250 CC. Kalipega	1	3,91	3,91
Válvula de pie 1" C/C plástica	2	15,18	30,36
Válvula check tipo RW China 1"	2	8,60	17,20
Saco Cemento Selvalegre 50kg	1	7,35	7,35
Carretilla Ripio	1	1,12	1,12
Sellante polipropileno 50 CC	1	5,10	5,10
Bomba periférica 1/2HP 110/220V	1	38,48	38,48
Enchufe Cooper (3 tapas metal)	2	2,67	5,33
Arena negra lavada de río 10 m3/viaje	3	160,00	480,00
Plástico negro 1,5mts (2,20 mts x kg)	50,90	2,60	132,26
Mano de obra	-	235,00	235,00
TOTAL			1155,00

Tabla A1.1: Costos de materiales de construcción.

ANEXO 2

Protocolos experimentos

A2.1 Cálculos para sólidos totales (TS), sólidos volátiles (VS), sólidos totales en suspensión (TSS) y sólidos volátiles en suspensión (VSS) por filtración

Cálculos:

Parámetro	Unidades (g)	Cálculo
m_{lsT}	Masa lodo seco total	(peso de lodo seco + crisol) – peso del crisol
m_{cT}	masa de la ceniza	(peso de cenizas + crisol) – peso del crisol
m_{ls}	masa del lodo seco	(peso de lodo seco + filtro) – peso del filtro
m_c	masa de la ceniza	(peso de cenizas + filtro) – peso del filtro
V	Volumen muestra (L)	

Tabla A2.2: Parámetros necesarios para calcular TS, VS, TSS y VSS.

Para determinar los siguientes parámetros en g/L se aplican las siguientes ecuaciones:

A) Sólidos totales (TS)

$$TS \text{ (g/L)} = \frac{m_{lsT}}{V}$$

B) Sólidos volátiles totales (VS)

$$VS \text{ (g/L)} = \frac{m_{cT} - m_{lsT}}{V}$$

C) Sólidos totales en suspensión (TSS)

$$TSS \text{ (g/L)} = \frac{m_{ls}}{V}$$

D) Sólidos volátiles en suspensión (VSS)

$$VSS \text{ (g/L)} = \frac{m_c - m_{ls}}{V}$$

A2.3 Figura Coliformes Totales y *E. Coli*

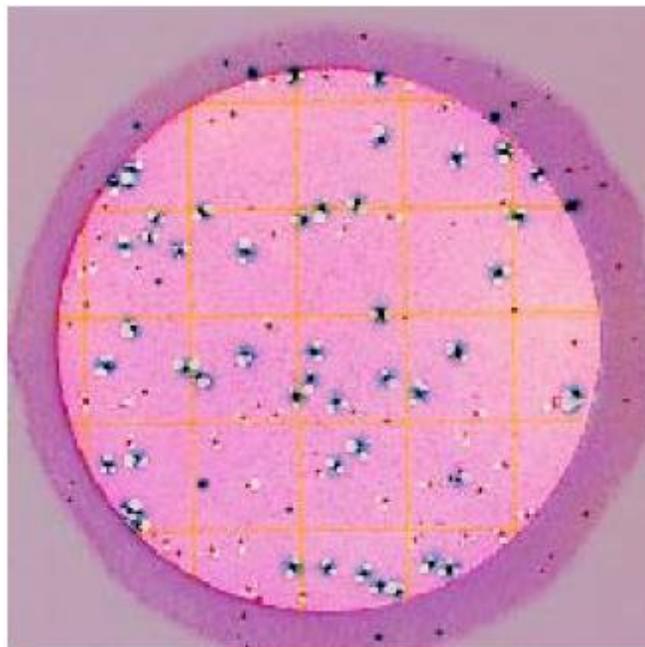


Figura A2.3.1: Petrifilm con colonias de *E. Coli* (azules junto a burbuja de gas) y Coliformes Totales (rojas junto a burbuja de gas).

ANEXO 3

A3.1 Desarrollo ecuación de reacción de primer orden para un sistema tipo flujo de pistón

Se tiene la siguiente ecuación para una reacción de primer orden:

$$\frac{dC}{dt} = -K_T C$$

$$\frac{dC}{C} = -K_T dt$$

Se integra la ecuación y queda lo siguiente:

$$\ln \frac{C_e}{C_o} = -K_T t$$

$$\ln C_e - \ln C_o = -K_T t$$

$$\ln C_o - \ln C_e = K_T t$$

$$t = \frac{\ln C_o - \ln C_e}{K_T}$$

Siendo t el tiempo de retención hidráulico se tiene lo siguiente:

$$t = \frac{V_{H2O}}{Q_{H2O}}$$

$$V_{H2O} = A_s * d * n$$

Siendo A_s el área superficial, d la profundidad y n la porosidad del medio se tiene que:

$$\frac{V_{H2O}}{Q_{H2O}} = \frac{\ln C_o - \ln C_e}{K_T}$$

$$\frac{A_s * d * n}{Q_{H_2O}} = \frac{\ln C_o - \ln C_e}{K_T}$$

Se desarrolla y se obtiene la ecuación para calcular el área superficial del humedal:

$$A_s = \frac{[Q(\ln C_o - \ln C_e)]}{K_T dn}$$

A3.2 Cálculos Oxígeno disuelto para Tumbaco

Hay que tener en cuenta de que el oxígeno disuelto depende mucho de la altura sobre el nivel del mar, esto es porque a distintas alturas existen distintas presiones atmosféricas lo que determina lo que se considera una concentración normal de oxígeno disuelto en agua dulce. Para el caso de una temperatura de 20°C a nivel del mar (0 msnm) hay una concentración normal de 9,09 mg/L de oxígeno disuelto en el agua [23]. Ahora para determinar la concentración normal de oxígeno en la altura en la cual se encuentra el proyecto, se necesita primero determinar la presión atmosférica a dicha altura, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{P_b}{P_a} = e^{\left[\frac{-gM(z_b - z_a)}{RT} \right]} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Dónde:

P_b = presión atmosférica desconocida (N/m^2)

P_a = presión atmosférica conocida (a nivel del mar $1,01325 \times 10^5 N/m^2$)

g = gravedad ($9,81 m/s^2$)

M = peso molecular del aire ($28,97 kg/kmol$)

z_b = elevación sobre el nivel del mar del proyecto (m)

z_a = nivel del mar del proyecto (0 m)

$$R = \text{constante universal de los gases} \left(8314 \frac{N \cdot m}{kg \cdot mol \cdot K} \right)$$

$$T = \text{Temperatura (K)} [23]$$

La altura a la que se encuentra el proyecto como se mencionó en la sección 3.1 es de 2357 m y tiene una temperatura de 17°C (290,15 K), por lo que se determinó que en el área del proyecto se tiene una presión atmosférica de $7,6757 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ (0,757 atm). Ahora para obtener la concentración que se debería esperar en el agua en el sitio del proyecto, se utiliza la siguiente ecuación:

$$X_g = \frac{P_T}{H} p_g \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Dónde:

$$X_g = \text{fracción del gas en agua} \left(\frac{\text{mol gas}}{\text{mol agua}} \right); \text{ se considera que mol gas} \\ \ll \text{mol agua}$$

$$p_g = \text{presión parcial del gas} \left(0,21 \frac{\text{mol } O_2}{\text{mol aire}} \right)$$

$$H = \text{constante de Henry} \left(41100 \text{ atm} \left(\frac{\frac{\text{mol } O_2}{\text{mol aire}}}{\frac{\text{mol } O_2}{\text{mol agua}}} \right) \right)$$

$$P_T = \text{presión atmosférica total} (0,757 \text{ atm}) [43]$$

Con esta ecuación se obtiene una fracción del oxígeno en el agua de $3,868 \times 10^{-6} \text{ mol } O_2/\text{mol } H_2O$ que al transformar a mg/L da una concentración de OD de 6,881 mg/L.