

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN A ESCALA  
LABORATORIO EMPLEANDO COMO MEDIO FILTRANTE  
ASTILLAS DE CIPRÉS PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES  
MUNICIPALES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
AMBIENTAL**

**SAMAYTA KAREN QUIJIA PERALTA**  
[karen\\_quijia@hotmail.com](mailto:karen_quijia@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL M.Sc.**  
maria.aldas@epn.edu.ec

**Quito, noviembre 2018**

## DECLARACIÓN

Yo Samayta Karen Quijia Peralta, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**SAMAYTA KAREN QUIJIA PERALTA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Samayta Karen Quijia Peralta, bajo mi supervisión.

---

**Ing. MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL M.Sc.**  
**DIRECTORA DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida, por brindarme sabiduría y fortaleza cada día y por poner en mi vida a las personas indicadas que han sido mi apoyo y soporte para seguir adelante y cumplir cada uno de mis metas y sueños. Sobre todo gracias por darme una familia maravillosa que a pesar de los problemas y dificultades hemos permanecido unidos.

A mis padres, Amparito y Celso, por enseñarme que con el trabajo diario se consigue el éxito, por todo el esfuerzo que entregan día a día para sacarnos adelante a mis hermanas y a mí. Además por su amor y cariño incondicional a lo largo de toda mi vida, por ser mi apoyo en los momentos difíciles y por motivarme a ser cada día una mejor persona. Mil gracias por todo lo que han hecho y harán por mí.

A mis hermanas: Elsi y Betzy, quienes se han convertido en mis compañeras de vida, mis mejores amigas, mis cómplices y mis confidentes. Gracias por ser parte mis alegrías, triunfos, derrotas y desamores, porque a pesar de los momentos difíciles sé que siempre podré contar con ustedes para cumplir mis metas. Las quiero mucho.

A mis sobrinos: Joao, Dafne, Jaret y Keysi, por llenarme de alegría cada día con sus ocurrencias y travesuras, por ser mi aliento para seguir luchando en cada uno de mis sueños y sobre todo por brindarme una sonrisa en los momentos difíciles. Gracias enanos por su amor sincero.

A mis cuñados: Alberto y Christian, por ser como mis hermanos, por hacer de mis alegrías y tristezas como las suyas y sobre todo por su apoyo desinteresado en este proyecto. Gracias por confiar en mí.

A mis amig@s: Alex, Danny, Cris, Dayta y Sofí con quienes he compartido toda mi etapa universitaria y que a pesar de las diferencias me han brindado su cariño y

amistad sincera e incondicional, sin ustedes esta experiencia no hubiera sido la misma. A todos aquellos amigos que fui concienciado a lo largo de esta etapa universitaria y de toda mi vida, con los cuales he compartido lindas experiencias. Gracias a todos ustedes por brindarme su amistad sincera e incondicional.

A la Ing. María Belén Aldás, mi gratitud sincera por su apoyo constante y desinteresado en este proyecto. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias y tiempo durante la ejecución de este proyecto. Al LDIA, LDH y CICAM por brindarme las facilidades para la ejecución del presente proyecto y estar prestos a resolver cualquier inquietud.

A la Escuela Politécnica Nacional, donde adquirí valiosos conocimiento durante toda mi carrera que me servirán para mi vida profesional y conocí personas maravillas que cambiaron mi vida.

Y finalmente a mis amigas del cole (Krol y Jois), primos, tíos y demás personas que me brindaron su apoyo desinteresadamente durante la realización de este proyecto y toda mi carrera. A todos ustedes de todo corazón muchas gracias.

**SAMY Q.**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado principalmente a mis padres Amparito y Celso, por motivarme y confiar en mí para cumplir mis sueños y metas. Con mucho amor y cariño para ustedes.

A Elsi, Betzy, Christian y Alberto porque creyeron en mí y compartieron cada uno de los momentos previos al logro de esta meta. Sé que al igual que yo se sienten felices al verme cumplir este objetivo.

A mis sobrinos Joao, Dafne, Jaret y Keysi, porque son el mejor regalo que Dios me ha dado y son mi motivación para la culminación de este proyecto.

Y a mis ángeles del cielo, en especial a mi abuelito Enrique y mi primita Paula.

**SAMY Q.**

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
DEDICATORIA .....	VI
CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ANEXOS .....	XV
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS .....	XVI
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
PRESENTACIÓN .....	XIX
CAPÍTULO I .....	1
1 ASPECTOS GENERALES .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 ANTECEDENTES .....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.5 ALCANCE .....	5
CAPÍTULO II .....	6
2 MARCO TEÓRICO .....	6

2.1	AGUAS RESIDUALES.....	6
2.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES .....	8
2.3.2	REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	10
2.2	BIOFILTRACIÓN.....	11
2.3.1	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.....	13
2.3.2	MATERIALES FILTRANTES .....	15
2.2.2.1	Tipos de materiales filtrantes .....	17
2.3.3	BIOFILTRO DE FLUJO LIBRE .....	18
2.3.4	CIPRÉS.....	19
2.3	NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE .....	20
2.3.1	CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS PARA USO AGRÍCOLA EN RIEGO .....	21
2.3.2	GUÍAS DE LA EPA-2012 PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA LA AGRICULTURA.....	22
	CAPÍTULO III.....	23
3	METODOLOGÍA.....	23
3.1	PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE ORGÁNICO .....	23
3.3.1	PREPARACIÓN DEL MATERIAL.....	23
3.3.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	24
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR .....	26
3.3.1	SITIO DE MUESTREO .....	27
3.2.1.1	Periodo de muestreo .....	28
3.3	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN.....	29
3.3.1	DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCION DE SISTEMA EXPERIMENTAL.....	29
3.3.2	ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA .....	32



3.4	ACONDICIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS .....	33
3.5	MONITOREO DE LOS BIOFILTROS .....	34
3.6	EVALUACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN .....	34
CAPÍTULO IV.....		36
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE .....	36
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR .....	37
4.3	EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN .....	38
4.3.1	REMOCIÓN DE LA DQO.....	38
4.3.2	REMOCIÓN DE LA DBO <sub>5</sub> .....	42
4.3.3	REMOCIÓN DE SST .....	45
4.3.4	REMOCIÓN DE CF .....	48
4.3.5	COMPORTAMIENTO DEL pH.....	51
4.3.6	COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA .....	53
4.4	PÉRDIDA DE CARGA .....	55
CAPÍTULO V.....		57
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	57
5.1	CONCLUSIONES .....	57
5.2	RECOMENDACIONES .....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		60
ANEXOS.....		66

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales .....	10
FIGURA 2.2 Esquema de una columna de biofiltración.....	13
FIGURA 2.3 Ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ) .....	20
FIGURA 3.1 Predio del Colegio donde se obtuvo el ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ) .....	23
FIGURA 3.2 Tamaños de material filtrante empleados .....	24
FIGURA 3.3 Método de máximo contenido de humedad para astillas empleadas	25
FIGURA 3.4 Sitio de la toma de muestra .....	28
FIGURA 3.5 Esquema experimental del sistema de biofiltración.....	30
FIGURA 3.6 Conexiones del sistema de biofiltración .....	31
FIGURA 3.7 Sistemas de biofiltración instalados en el laboratorio .....	33
FIGURA 4.1 Efluentes de los biofiltros al día 98 de operación .....	38
FIGURA 4.2 Pérdida de carga de los biofiltros al día 98 de operación .....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 Comportamiento de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m .....	39
GRÁFICO 4.2 Comportamiento de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m .....	40
GRÁFICO 4.3 Eficiencia de remoción de DQO en el período de experimentación .....	41
GRÁFICO 4.4 Comportamiento de la $DBO_5$ durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m ....	42
GRÁFICO 4.5 Comportamiento de la $DBO_5$ durante el período de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m ....	43
GRÁFICO 4.6 Eficiencia de remoción de $DBO_5$ en el período de experimentación .....	44
GRÁFICO 4.7 Comportamiento de los SST durante el periodo de estabilización y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m .....	46
GRÁFICO 4.8 Comportamiento de los SST durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m ....	46
GRÁFICO 4.9 Eficiencia de remoción de los SST en el período de experimentación .....	47
GRÁFICO 4.10 Comportamiento de los CF durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m ....	48
GRÁFICO 4.11 Comportamiento de los CF durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m ....	49

GRÁFICO 4.12 Eficiencia de remoción de las CF en el período de experimentación .....	50
GRÁFICO 4.13 Medidas de pH en el período de experimentación con una altura del material filtrante de 0,45 m .....	52
GRÁFICO 4.14 Medidas de pH en el período de experimentación con una altura del material filtrante de 0,60 m .....	53
GRÁFICO 4.15 Comportamiento de la temperatura durante el período experimental con una altura del material filtrante de 0,45 m .....	54
GRÁFICO 4.16 Comportamiento de la temperatura durante el período experimental con una altura del material filtrante de 0,60 m .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Tipos de aguas residuales .....	6
TABLA 2.2 Composición típica de las aguas residuales municipales .....	9
TABLA 2.3 Eficiencias de remoción de materiales filtrantes orgánicos en aguas residuales .....	18
TABLA 2.4 Resumen de la normativa ecuatoriana aplicable al tratamiento de las aguas residuales .....	20
TABLA 2.5 Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego .....	21
TABLA 2.6 Guías de la EPA para la reutilización de las aguas residuales tratadas en el sector agrícola .....	22
TABLA 3.1 Parámetros para la caracterización del efluente .....	26
TABLA 3.2 Período de muestreo .....	29
TABLA 3.3 Dimensiones y parámetros de los biofiltros .....	32
TABLA 3.4 Parámetros de monitoreo .....	34
TABLA 4.1 Características del material filtrante .....	36
TABLA 4.2 Caracterización promedio del agua residual municipal .....	37
TABLA 4.3 Porcentajes de remoción de DQO en período de monitoreo .....	41
TABLA 4.4 Porcentajes de remoción de DBO <sub>5</sub> en el período de monitoreo .....	45
TABLA 4.5 Porcentajes de remoción de SST en el período de monitoreo .....	48
TABLA 4.6 Porcentaje de remoción de CF en el período de monitoreo .....	51

Tabla A1.1 Características de las astillas de ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ) de tamaño $\frac{3}{4}$ " .....	67
Tabla A1.2 Características de las astillas de ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ) de tamaño $\frac{1}{2}$ " .....	67
Tabla A1.3 Características de las astillas de ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ) de tamaño $\frac{3}{8}$ " .....	68

## ANEXOS

ANEXO 1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE .....	67
ANEXO 2 MEDICIONES DE DQO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN .....	71
ANEXO 3 MEDICIONES DE DBO <sub>5</sub> EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN .....	72
ANEXO 4 MEDICIONES DE SST EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN .....	73
ANEXO 5 MEDICIONES DE CF EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN ....	74
ANEXO 6 MEDICIONES DE pH EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN ....	75
ANEXO 7 MEDICIONES DE TEMPERATURA EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN .....	76

## SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

<b>ASTM</b>	Asociación Americana de Ensayo de Materiales (por sus siglas en inglés)
<b>CF</b>	Coliformes Fecales
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>LMP</b>	Límite Máximo Permisible
<b>NMP</b>	Número Más Probable
<b>OEFA</b>	Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental
<b>PET</b>	Polietilentereftalato
<b>pH</b>	Potencial Hidrógeno
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Agua Residual
<b>SENAGUA</b>	Secretaría Nacional del Agua
<b>SENPLADES</b>	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales
<b>U.log</b>	Unidades logarítmicas



## RESUMEN

El presente proyecto de titulación emplea astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) como material filtrante orgánico en sistemas de biofiltración a escala laboratorio, con la finalidad de evaluar el efecto del tamaño de partícula y la altura del material filtrante sobre las eficiencias de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF y corroborar si estos sistemas cumplen con la normativa ambiental ecuatoriana para el uso del agua en el riego y de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para reúso de las aguas residuales en el riego de cultivos de alimento para consumo humano y que se procesan comercialmente.

Se construyó seis biofiltros: el primero (B1) y segundo (B2) empacado con un tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ " y altura de material filtrante de 0,45 m y 0,60 m respectivamente, el tercero (B3) y cuarto (B4) con un tamaño de partícula de  $\frac{1}{2}$ " y altura 0,45 m y 0,60 m, el quinto (B5) y sexto (B6) con tamaño de partícula de  $\frac{3}{8}$ " y una altura de 0,45 m y 0,60 m. Los biofiltros se alimentaron con el agua del Río Machángara a flujo continuo por gravedad con una carga hidráulica superficial de  $0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ .

Se realizaron muestreos semanales del agua a tratar y de los efluentes de los biofiltros, para determinar la eficiencia de remoción para cada uno de los parámetros analizados. Las astillas de ciprés mostraron mayor eficiencia de remoción en el biofiltro B6 con porcentajes promedio de  $65,26 \pm 1,47 \%$  en DQO,  $83,29 \pm 4,00 \%$  en DBO<sub>5</sub>,  $75,96 \pm 4,19 \%$  en SST y  $99,58 \pm 0,46 \%$  (2,47 unidades logarítmicas) en CF. Los resultados obtenidos en este biofiltro, determinó que el efluente cumple con la normativa nacional e internacional para los parámetros de DBO<sub>5</sub>, SST y pH, pero no para coliformes fecales por lo que efluente no debería usarse para el riego agrícola.

## ABSTRACT

This project uses cypress wood chips as an organic filter material in biofiltration systems at laboratory-scale, with the propose of valuing the effect of the particle size and the filtering material height in the removal efficiency of Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub>), Total Suspended Solids (TSS) and Fecal Coliformes (CF). Also this project helps to corroborate if these systems comply with the regulations of Environmental Protection Agency of United States for reuse wastewater in the irrigation of food crops for human consumption and that are processed commercially and the Ecuadorian environmental regulations for the use of water in irrigation.

Six biofilters was ensambled: the firs filter (B1) and the second (B2) packed with  $\frac{3}{4}$ " of particle size and 0.45 m and 0.60 m height, respectively. The third (B3) and the fourth (B4) with  $\frac{1}{2}$ " of particle size and 0.45 m and 0.60 m height. Finally, the fifth (B5) and the sixth (B6) with  $\frac{3}{8}$ " of particle size and 0.45 m and 0.60 m height. The biofilters were filed with water of Machangara River with a continuous flow under gravity action with superficial hydraulic load of  $0.55 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ .

Wastewater and water of biofilter effluents were sampling weekly, in order to determinate the removal efficiency for each analyzer parameter. The cypress wood chips with the highest removal efficiency were the ones packed in the biofilter B6. The average percentage for B6 were  $65.26 \pm 1.47$  % of COD,  $83.29 \pm 4.00$  % of BOD<sub>5</sub>,  $75.96 \pm 4.19$  % of TSS and  $99.58 \pm 0.46$  % (2.47 logarithmic units) of FC. The results of this biofilter show that the effluent comply with the national and international regulation for BOD<sub>5</sub>, TSS and pH, but in the other hand the results exceed the limit for fecal coliforms, so the effluent cannot be used for agricultural irrigation.

## PRESENTACIÓN

El proyecto de titulación analiza la eficiencia de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF de las astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) en las aguas residuales municipales mediante la biofiltración con la finalidad de reutilizarlas en el riego de cultivos del Sector San Pedro del Valle de la parroquia de Nayón. El estudio está conformado por cinco capítulos, estructurados de la siguiente manera:

El Capítulo 1 comprende los Aspectos Generales del presente proyecto, exponiendo la introducción, los antecedentes, objetivo general y objetivos específicos, la justificación para realizar este estudio y el alcance del proyecto.

El Capítulo 2 corresponde al Marco Teórico, aborda los fundamentos teóricos de la caracterización de las aguas residuales, haciendo énfasis en las municipales y la reutilización que durante años se le ha dado en diferentes actividades antrópicas. Además de los principales aspectos alrededor de la biofiltración y el marco legal aplicable al tema de estudio.

El Capítulo 3 detalla la Metodología utilizada para la elaboración de la parte experimental, con la cual se desarrolla los procedimientos de la caracterización del ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y el agua residual, construcción y operación de los sistemas de biofiltración con tres tamaños de partículas y dos alturas de material filtrante. También se incluye los procedimientos para los análisis realizados en laboratorio y la determinación de las eficiencias de remoción obtenidas en los 6 biofiltros.

El Capítulo 4 contempla los Resultados y Análisis, de la caracterización del ciprés (*Cupressus macrocarpa*) como material filtrante y el agua residual empleada. Así como también, de cada uno de los parámetros analizados en laboratorio para determinar los porcentajes de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF para cada biofiltro estudiado y realizar un análisis comparativo entre los porcentaje de eficiencia obtenidos por cada uno. También se detalla el comportamiento del pH,

temperatura y pérdida de carga para biofiltro a flujo libre durante el período de experimentación.

Finalmente el capítulo 5 de Conclusiones y Recomendaciones, sintetiza y recopila las conclusiones obtenidas y presenta sugerencias para estudios futuros.

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El fuerte crecimiento poblacional, el acelerado desarrollo económico y la falta de eficiencia del uso del agua dentro de las actividades antropogénicas ocasiona la generación de grandes volúmenes de agua residual (Ardakanian, 2017), las cuales, sin ningún tipo de tratamiento o un inadecuado tratamiento son descargadas en los cuerpos de agua superficiales, provocando contaminación ambiental y problemas de salud (Sosa, 2015).

Todo esto sumado al alto consumo de agua en la irrigación de cultivos agrícolas con un 69 % dentro de los principales usos que la humanidad le da a este recurso, han ocasionado en varias partes del mundo, principalmente en el sector rural, la utilización de las aguas residuales como fuente de abastecimiento para riego agrícola como una alternativa para satisfacer parte de la demanda de agua en esta actividad (Toledo, 2012).

Las aguas residuales en varios casos han sido utilizadas sin ningún tipo de tratamiento, incrementando por un lado la productividad del terreno, debido a los elevados contenidos en nutrientes orgánicos para las plantas, pero a su vez, se han incrementado también el número de enfermedades gastrointestinales, debido a la presencia de organismos patógenos presentes en este tipo de aguas (Veliz Lorenzo, Llanes Ocaña, Asela Fernández, & Bataller Venta, 2009), por tal motivo, es necesario implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que puedan adaptarse a las condiciones técnicas, económicas y sociales de estos sitios, debido a que los sistemas convencionales limitan su implementación en diversos sectores de la población por sus elevados costos de operación y mantenimiento (Sosa, 2015).

El proceso de biofiltración con materiales orgánicos, resulta ser una alternativa a esta situación, ya que es un sistema que requiere poca inversión técnica, además de ser una tecnología de bajo costo, fácilmente adaptable (Garzón-Zuñiga y Buelna, 2011), altamente eficiente en la remoción de contaminantes físicos y químicos (Buelna, 1994), y la calidad de los efluentes cumple con los parámetros que exige la normativa internacional para la reutilización de las aguas residuales en la agricultura. También resulta ser un sistema modular, lo que permite adaptarlo en función del efluente a tratar y de los objetivos de descarga (Vigueras, 2012).

## **1.2 ANTECEDENTES**

En Ecuador, el porcentaje del agua que recibe un adecuado tratamiento previo a la descarga final en ríos y quebradas es tan solo el 12 %, de acuerdo a la Secretaría Nacional del Agua (La Hora, 2016), lo que ha generado un alto grado de contaminación de los cuerpos de agua, convirtiéndose en uno de los principales problemas ambientales (SENPLADES, 2013).

En el caso del Distrito Metropolitano de Quito, la falta de plantas de tratamiento ha provocado que las aguas residuales urbanas sean descargadas sin ningún tipo de tratamiento o un tratamiento inadecuado a los ríos Machángara, San Pedro, Monjas y Guayllabamba, siendo el río Machángara el principal receptor, debido a que en éste se descargan el 75 % del total de las aguas residuales de la ciudad de Quito (Reinoso, 2015).

Según estudios realizados, se ha establecido que las aguas del río Machángara no son aptas para ninguno de los usos potenciales, tales como abastecimiento de agua potable, riego, uso recreativo con y sin contacto y preservación de la vida acuática y silvestre (Ávila, Guerrón, Carolina, Flores y Andrade, 2014), pero según los datos de la SENAGUA (2009), los principales usos que se le dan a este río son en el riego con 54 concesiones otorgadas e hidroelectricidad con una concesión.

En la parroquia de Nayón, en el sector San Pedro del Valle se han canalizado las aguas del río Machángara, mismas que no reciben ningún tipo de tratamiento para

el riego de cultivos. Frente a esta perspectiva, una alternativa a la necesidad de tratamiento en este sector es la biofiltración, ya que es una tecnología de bajo costo, poca inversión técnica y con el uso de materiales disponibles en el sector como material filtrante orgánico (Sosa, 2015).

En el presente estudio se emplearán las astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) como material filtrante, que aún no ha sido reportado como material de empaque en el proceso de biofiltración en la literatura científica revisada y se registran estudios previos con virutas de coníferas y turba con eficiencias de remoción de 96 % DBO<sub>5</sub>, y del 99 % para SST (Buelna, Dubé & Tremblay, 2001).

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales son descargadas sin ningún tratamiento o con un inadecuado tratamiento en ríos y quebradas, causando problemas ambientales. Los cauces de los ríos que reciben las aguas residuales son utilizados para el riego de varios cultivos, lo que resulta ser un serio riesgo para salud pública, pues constituyen una importante fuente de agentes patógenos, que causan infecciones gastrointestinales en la población (Veliz *et al.*, 2009). Ante esta situación, en las dos últimas décadas, se ha venido desarrollando la biofiltración sobre cama orgánica como una alternativa para el tratamiento de este tipo de aguas, ya que es una tecnología que produce efluentes con el fin de hacer un uso eficiente del agua a través de la reutilización en forma segura cumpliendo con la normativa vigente (Sosa, 2015).

La biofiltración emplea materiales orgánicos autóctonos y disponibles en cada sector como material de soporte, sobre este medio de soporte se forma la biopelícula encargada de remover organismos patógenos y materia orgánica que se encuentran en el agua (Vigueras-Cortés, Villanueva-Fierro, Garzón-Zúñiga, de Jesús Návar-Cháidez, Chaires-Hernández & Hernández-Rodríguez, 2013). Estudios anteriores han empleado virutas de coníferas y turba astillas de madera de mezquite (*Prosopis*) sin modificaciones para tratar aguas residuales municipales (Sosa, 2015).

En el presente estudio se empleará astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) como material de empaque del biofiltro, debido a que estudios previos han obtenido eficiencias de remoción de 96 % DBO<sub>5</sub>, y del 99 % para SST empleando coníferas (Buelna *et al.*, 2001). Además de ser un material disponible en el sector donde se propone la instalación de este sistema de biofiltración para el tratamiento de las aguas residuales municipales empleadas en el riego, resulta ser una alternativa para la gestión de los residuos generados en la poda del ciprés. También se caracterizará el material de soporte empleado para conocer las propiedades del mismo y aportar con futuras investigaciones que empleen ciprés (*Cupressus macrocarpa*) en sistemas de biofiltración.

Por último, los datos obtenidos serán comparados con la normativa ecuatoriana para uso agrícola en el riego y con la normativa de la EPA para reusó de las aguas residuales en la agricultura, se empleará una norma internacional debido a que en la normativa ecuatoriana no se establecen límites máximos permisibles para los parámetros de DBO<sub>5</sub> y SST.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar un sistema de biofiltración a escala de laboratorio empleando como medio filtrante astillas de madera de ciprés para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales municipales.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las aguas del río Machángara mediante análisis de laboratorio para determinar su carga contaminante actual.
- Caracterizar físicamente el material filtrante orgánico a través de estudios en laboratorio para ser utilizado en el sistema de biofiltración.



- Diseñar el biofiltro empleando astillas de madera de ciprés con diferentes proporciones de material filtrante y tamaños de partícula para tratar las aguas captadas del Río Machángara.
- Determinar el porcentaje de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF del agua residual mediante pruebas de monitoreo, con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema de biofiltración.

## 1.5 ALCANCE

El presente proyecto de titulación, busca evaluar la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF) de un sistema de biofiltración empleando como material filtrante orgánico astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) alimentados con el agua del río Machángara a flujo continuo descendente, a escala laboratorio, como una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en el sector rural a través de un sistema de tratamiento económico y de fácil implementación.

El proyecto se llevará a cabo mediante un estudio experimental usando 6 reactores a escala laboratorio con variaciones de altura del material filtrante y variaciones del tamaño de partícula cuya eficiencia de remoción se registra a través de los valores medidos de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF en el efluente.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 AGUAS RESIDUALES

Son derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden ser vertidos sin tratamiento en los cuerpos de agua naturales, con el propósito de evitar la contaminación de los mismos (Reynolds, 2001).

La Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014) define a las aguas residuales como aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillas.

En general, las aguas residuales contienen aproximadamente un 99,9 % de agua y el 0,1 % está conformado por materia inorgánica y materia orgánica. La materia inorgánica compuesta por metales, arena y sales y la materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas (Rojas, 2002). De manera general la Tabla 2.1 presenta los tipos de agua residual.

**TABLA 2.1 Tipos de aguas residuales**

Tipo de agua	Definición
<b>Agua residual doméstica</b>	De origen residencial y comercial que contiene desechos fisiológicos, entre otros. Los contaminantes están presentes en moderadas concentraciones.
<b>Agua residual industrial</b>	Las resultantes del desarrollo de un proceso productivo incluyendo a los provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, entre otras. Su contenido de contaminantes depende del tipo de industria y/o proceso productivo.

<b>Agua residual municipal</b>	Es el agua residual doméstica que puede estar mezclada con agua de drenaje fluvial o con agua residual de origen industrial que son transportadas por el alcantarillado de una ciudad. Estas aguas contienen materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc.
<b>Agua residual pluvial</b>	Es el agua lluvia que escurre por la superficie, arrastrando residuos y materiales presentes en el suelo.

FUENTE: Espigares García y Pérez López, 1990

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Para obtener una imagen verdadera de una muestra en particular de agua residual, es necesario cuantificar diferentes parámetros mediante análisis que permitan determinar sus características físicas, químicas y biológicas. Las principales consideraciones para establecer la calidad del agua se basan más en las características físicas que en las químicas y biológicas. Las propiedades físicas, usualmente empleadas para determinar las impurezas en el agua residual son la turbidez, sólidos, temperatura y color (Noyola, Vega, Ramos y Calderón, 2000), mismas que proporcionan información del origen de las aguas residuales, el grado de contaminación y de cómo se van a reutilizar después de tratarlas (Sosa, 2015).

Los sólidos suspendidos totales (SST) son aquellos sólidos que al filtrar las aguas residuales no atraviesan la membrana permeable de 0,45 micras de diámetro de poro. Los SST constituyen el sumatorio de los sólidos suspendidos volátiles (expuestos a una temperatura mayor a 500°C, logrando su volatilización) y los sólidos suspendidos fijos (material que queda luego de la volatilización) (Muñoz y Aldás, 2017).

Las características químicas tienden a ser más específicas en su naturaleza que algunos de los parámetros físicos y por eso son más útiles para evaluar de inmediato, las propiedades de una muestra, entre ellas se encuentran el pH, la DQO, DBO<sub>5</sub>, diferentes formas de nitrógeno y fósforo, principalmente (Noyola *et al.*, 2000).

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno consumida por una muestra de agua para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presenta en ella (Noyola *et al.*, 2000).

La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requerida los microorganismos para transformar la materia orgánica en CO<sub>2</sub> y nuevo material celular (Noyola *et al.*, 2000).

En cuanto a constituyentes biológicos se consideran los parámetros de Coliformes Fecales (CF) y Huevos de Helminto (HH), que son los objetivos básicos de remoción en el tratamiento biológico de aguas residuales (Sosa, 2015).

Las coliformes fecales son un subgrupo de las coliformes totales, denominadas termotolerantes por su capacidad de soportar elevadas temperaturas. Habitan y se desarrollan en el tracto intestinal de los animales de sangre caliente, por lo que constituyen un indicativo de contaminación fecal (Noyola *et al.*, 2000), (Ríos-Tobón, Agudelo y Gutiérrez, 2017).

### **2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

Las aguas residuales municipales son esencialmente aquellas aguas de abastecimiento que después de ser utilizadas en las actividades domésticas y productivas son descargas a los alcantarillados domiciliarios o directamente al ambiente (Maldonado, Zuleta, Vizcaino, Yepes, Ramírez, Rizzetto y Pastrana, 2002).

Las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua residual de cada centro urbano varían de acuerdo a los factores externos como localización, temperatura, origen del agua captada, entre otros y factores internos como la población, el desarrollo socioeconómico, el nivel industrial, los hábitos alimenticios, las prácticas de uso eficiente de agua, etc. Por estas razones, cada municipio presenta características y composición variada en sus aguas residuales (Maldonado *et al.*, 2002). La composición típica de un agua residual municipal se presenta en la Tabla 2.2.

**TABLA 2.2 Composición típica de las aguas residuales municipales**

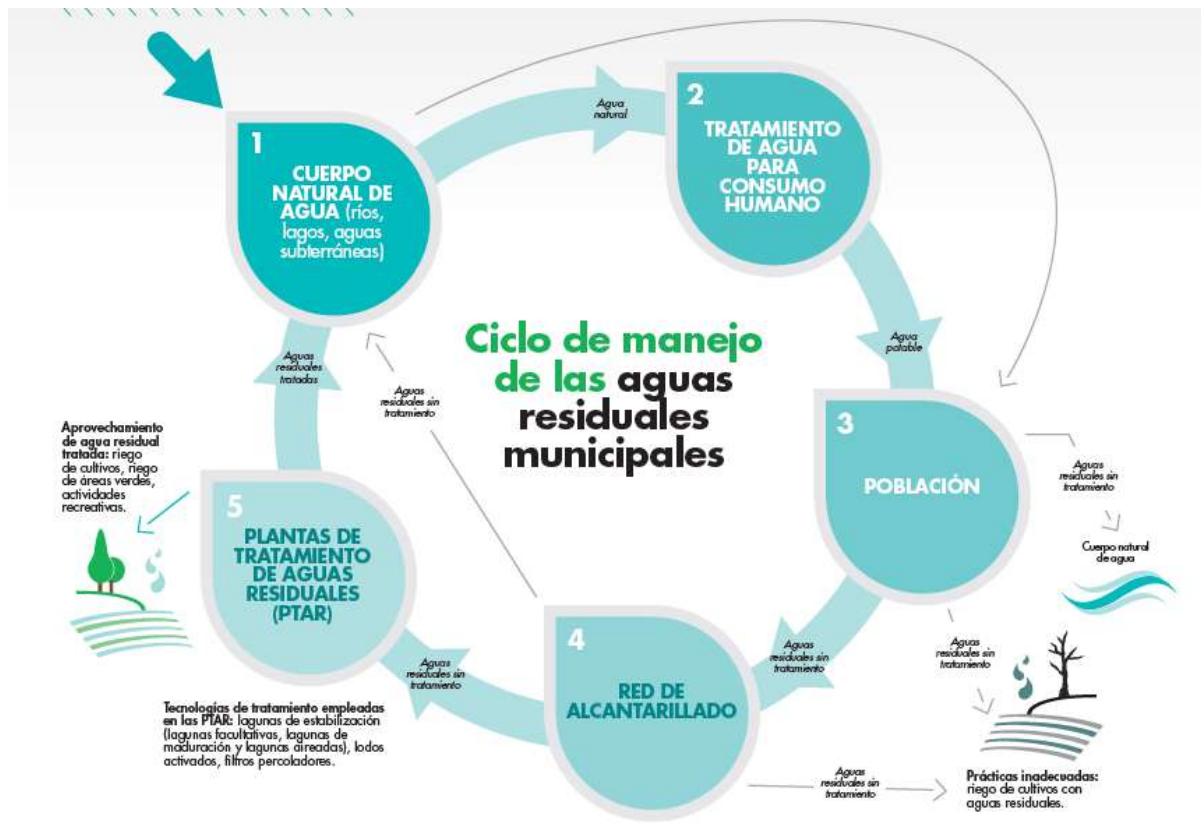
Componente	Unidad	Concentración		
		Alta	Media	Baja
Sólidos Totales	mg/L	1000	500	200
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	500	300	100
Sólidos Sedimentables	mg/L	12	8	4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> a 20°C)	mg/L	300	200	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1000	500	250
Nitrógeno Total	mg/L	80	50	25
Fósforo Total	mg/L	20	15	5
Grasas y Aceites	mg/L	40	20	0
Coliformes Fecales	NMP/100ml	10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>5</sup>

FUENTE: Maldonado *et al.*, 2002

Las aguas residuales municipales son vertidas a la red de alcantarillado de la ciudad, parte de estas aguas son derivadas a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para su tratamiento empleando diversas tecnologías como: lagunas facultativas, lodos activados o filtros percoladores, entre otros. Posteriormente estas aguas tratadas son empleadas para el riego de cultivos, áreas verdes, piscicultura o vertidas a cuerpos de agua natural según la Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014).

Las aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado que no son derivadas a las PTAR, al igual que las aguas residuales que no son descargadas a una red de alcantarillado son vertidas sin ningún tratamiento a los cuerpos de agua naturales, terrenos baldíos o son empleadas en prácticas inadecuadas como el riego de cultivos, lo que representa un riesgo para la salud y el ambiente (OEFA, 2014); en la Figura 2.1 se puede observar de manera general el ciclo de manejo de las aguas residuales municipales.

**FIGURA 2.1** Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales



FUENTE: OEFA, 2014

### 2.3.2 REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

El incremento en la oferta y demanda de agua en el mundo, sumado a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la distribución desigual y las constante sequías, son factores que hacen que el agua residual sea una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso (Silva, Torres y Madera, 2008).

La reutilización del agua residual genera beneficios en la reducción considerable de la carga contaminante que se dispone en los cuerpos receptores superficiales, subterráneos y zonas costeras, mediante vías efectivas y de menos costo, mejora importantes áreas agrícolas aportándole materias orgánicas y nutrientes, ofrece una fuente de agua que promueve el crecimiento en regiones con escasez de agua, entre otros (Veliz Lorenzo *et al.*, 2009). Sin embargo, la reutilización de agua

conlleva cambios en la estructura tradicional de asignación de recursos hídricos, financiamiento de estructuras, consideración de estándares de calidad del agua, marcos reglamentarios y mandatos institucionales con el fin de satisfacer las múltiples necesidades de los usuarios de manera segura (Ardakanian, 2017).

En el año 2016 existían más de 3 300 instalaciones de regeneración de agua a nivel mundial con diversos grados de tratamiento y para diversas aplicaciones como son (Salgot & Huertas, 2006):

- Riego agrícola y de áreas verdes de parques, campos deportivos y jardines.
- Actividades industriales, fundamentalmente para torres de enfriamiento, alimentación de calderas y necesidades de los procesos.
- Recarga de acuíferos subterráneos.
- Alimentación de lagos recreativos, acuicultura, descarga de inodoros, sistemas contra incendios y aire acondicionado.

El tratamiento de las aguas residuales tendrá que ser adecuado al objetivo, dependiendo del uso específico y el grado de contacto humano que exista como por ejemplo si el producto va a consumir crudo, pelado, cocido o si se utiliza para forraje (Winpenny, Heinz, Koo-Oshima, Salgot, Collado, Hernández y Torricelli, 2013).

## **2.2 BIOFILTRACIÓN**

Es un proceso que, mediante el uso de materiales filtrantes biológicos o medios granulares como la arena, la antracita, entre otros, permiten la depuración de las aguas residuales provenientes de diferentes actividades antrópicas para el uso urbano (Arboleda Valencia, Soto y Arnul, 2000) (Paredes, 2016).

La biofiltración es un sistema que purifica el agua en una sola operación, mediante procesos físicos, químicos y biológicos, con la aplicación de bajas tasas de filtración, estableciendo un equilibrio entre la tasa de deposición de contaminantes

y el crecimiento de la población de microorganismos (Garzón, 2004; Viguera-Cortés *et al.*, 2013) que promueve la formación de una biopelícula inmovilizada sobre la superficie del material filtrante, responsable de remover y retener los contaminantes del agua y agentes patógenos (Chávez, Mora, Cabra, Carmona, Revah y Gnecco, 2004).

Esta tecnología se caracteriza por su sencillez, ya que no tiene la necesidad de adicionar nutrientes, coagulantes u otro reactivo, solo requiere que el agua a tratar llegue con características tales que permita la existencia de organismos vivos, entre ellas un pH en el rango de 4,5 a 8 (Buelna, 1994) (SINIA, 2007).

La biofiltración, se ha posicionado como técnica cada vez más utilizada, debido a su versatilidad al momento de elegir el material filtrante, por este motivo, en la actualidad, se realizan investigaciones encaminadas a encontrar materiales de empaque más accesibles, mejorando así su competencia frente a otras alternativas de tratamiento (Arango Ruiz, 2004).

En los últimos años se ha probado la eficiencia de distintos materiales para el tratamiento de aguas residuales utilizando virutas de coníferas y turba con remociones de 96 % de DBO<sub>5</sub>, 90 % nitrógeno total Kjeldahi (N-NTK) y 99 % de SST. Las investigaciones realizadas por Batista, Soares, Santos Bezerra & Oliverra, (2011) utilizando composta, aserrín y bagazo de caña de azúcar, para tratar aguas residuales domésticas, muestran eficiencias de remoción del 60, 80 y 66 % de DQO y 65,71 y 80 % de DBO<sub>5</sub>, respectivamente.

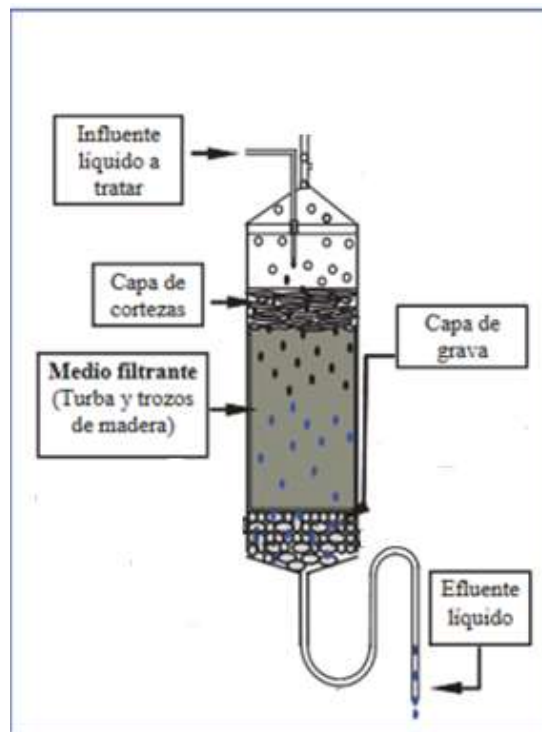
Recientemente, Sosa (2015) utilizó astillas de madera de mezquite (*Prosopis*) para tratar aguas residuales municipales de las que removió 78 % DQO, 92 % DBO<sub>5</sub>, 95 % SST y 4 unidades logarítmicas de Coliformes Fecales.

El diseño de los biofiltros es muy variable, pueden ser sistemas cerrados o abiertos, de uno o múltiples lechos de soporte teniendo cada uno una altura de entre 0,5 y 1,5 m aproximadamente (Paredes, 2016). En la Figura 2.2 se presenta los



principales componentes de un sistema de biofiltración con empaque orgánico. Generalmente, se maneja una entrada para el influente, una salida para el efluente, seguido del material de empaque y grava en la parte inferior.

**FIGURA 2.2 Esquema de una columna de biofiltración**



FUENTE: Garzón-Zúñiga, 2005

### 2.3.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En un sistema de biofiltración se consideran varios parámetros como son: las características del efluente a tratar, la selección del material filtrante y su contenido de humedad, así como los microorganismos que actuarán en el proceso. Este sistema se compone de las siguientes fases (Sekoulov, Rüdiger, Barz y TerraVivaTec, 2009):

- Fase sólida: medio de soporte que ejerce la función de permitir el desarrollo de una población bacteriana

- Fase líquida: agua a tratar

Previo al arranque del sistema, se lleva a cabo la etapa de acondicionamiento, la cual se debe hacer a bajas tasas para permitir la adaptación del sistema. En esta etapa se inicia con un material filtrante limpio, el crecimiento microbiano comienza con la formación de la biopelícula en el momento en que hay sustrato disponible y bajo condiciones adecuadas de temperatura, humedad y/o aire, principalmente porque se necesitará de un período de tiempo para alcanzar el desarrollo de la biopelícula sobre el medio (Sosa, Viguera y Holguín, 2014).

Al principio la eficiencia es baja, de hecho se incrementa la concentración de algunos contaminantes como la DBO y DQO a los que normalmente contiene el agua residual (Viguera, 2012), pero disminuye a medida que crece y se desarrolla la biopelícula.

Al emplear astillas de maderas tropicales como material de soporte se han identificado el desarrollo de los microorganismos como bacterias, hongos, algas, protozoarios, rotíferos y una alta incidencia de amebas teçadas, cuando existen las condiciones favorables y se dispone de los nutrientes (Garzón-Zúñiga *et al.*, 2008); estos microorganismos se encargan de degradar o convertir la materia orgánica soluble y coloidal en gases y tejido celular (Metcalf & Eddy, 1995), la biopelícula se hace más gruesa hasta que es suficientemente pesada y se separa del medio por su propio peso y eventualmente el flujo del agua que escurre entre el medio o empuja la arrastra fuera del sistema (Mihelcic y Zimmerman, 2012). De ahí la importancia de aplicar cargas hidráulicas superficiales óptimas que eviten la separación de la biopelícula (Cohen, 2001).

Las aguas residuales que alimentan los sistemas de biofiltros, pasan a través del medio filtrante y son tratadas por cuatro mecanismos que actúan de manera simultánea; el primero es la filtración lenta y pasiva (0,02 a 0,5 m/día) del agua residual por medio del soporte donde se produce la reducción de los sólidos (Buelna, Garzón-Zúñiga y Moeller, 2011); el segundo absorción, adsorción e intercambio iónico que se efectúa en el material filtrante reteniendo algunos

contaminantes (Couillard, 1994), el tercero es la biodegradación efectuada por los microorganismos, quienes realizan la reducción de la DBO, nitrógeno y fósforo; y por último la desinfección, proceso en el cual se eliminan microorganismos patógenos (Sosa *et al.*, 2014).

En estos sistemas de biopelícula se establece en primer lugar una transferencia externa, seguida de una cinética de consumo generando la biopelícula, responsable de la remoción del sustrato orgánico (Muñoz y Aldás, 2017).

De acuerdo con Lens, Vochten, Speleers, & Verstraete (1994) es importante el control de la carga aplicada para un equilibrio entre el crecimiento y decrecimiento de la biomasa, lo que conduce a una biodegradación pasiva de los contaminantes, sin la producción de lodos biológicos.

Los mecanismos pueden cambiar a lo largo del proceso de biofiltración, debido a que si en un inicio se da la adsorción por haber lugares disponibles para las partículas, luego el medio se satura y las condiciones cambian (Noyola *et al.*, 2000). Es importante darle mantenimiento al sistema para tener consistentemente altas eficiencias de remoción, y debe operarse por debajo de su capacidad de eliminación máxima (Chávez *et al.*, 2004).

### **2.3.2 MATERIALES DE SOPORTE**

El material filtrante generalmente ocupa entre el 50 a 70 % de la altura total del biofiltro, el cual es el encargado de retener los contaminantes contenidos en el agua residual principalmente por procesos físicos y químicos propios de un filtro. El material filtrante, también sirve de soporte para el crecimiento de importantes poblaciones de microorganismos que degradan los contaminantes retenidos en el filtro, regenerando así la capacidad de filtración y de depuración del sistema (Torres, Rodríguez y Uribe, 2003).

Las principales finalidades del material filtrantes según las investigaciones realizadas por Torres *et al.* (2003) son las siguientes:

- Facilitar el contacto entre el agua residual y los sólidos biológicos contenidos en la biopelícula biológica.
- Facilitar un flujo uniforme en el biofiltro.
- Permitir la acumulación de una gran cantidad de biomasa hasta cierto límite.
- Servir de soporte para la formación de la biopelícula.

La selección del medio es de gran importancia, debido a que, de éste dependerá la calidad final que tenga el efluente a tratar y la estabilidad operacional a largo plazo del biofiltro. Algunos de los requerimientos a cumplir por el material filtrante son los siguientes (Pinto y Chernicharo, 1996 citado por Torres *et al.*, 2003) (Hernández, Prado, Almarcha, Lafuente et Gabriel, 2010; Ramírez-López, Corona-Hernandez, Avelar-Gonzales, Omil & Thalasso, 2010).

- Biológica y químicamente inerte, para evitar que ocurra una reacción entre el medio y los microorganismos.
- Mayor superficie específica y mayor porosidad, que permita la adherencia de microorganismos y reduzca la posibilidad de acumulación de sedimentos o colmatación.
- Permitir la rápida proliferación de microorganismos para que disminuya el tiempo de arranque del biofiltro.
- Ser suficientemente liviano con la finalidad de evitar la necesidad de estructuras complejas.
- Buena capacidad de retención de agua; los microorganismos requieren de una importante cantidad de agua para crecer. La humedad óptima del material debe ser entre 40 y 60 %.
- Ser duradero, por lo tanto químicamente y mecánicamente estable y no generar valores de caída de presión.
- Ser estructuralmente resistente, para que soporte el propio peso, adicionado al peso de los sólidos biológicos adheridos a la superficie.
- Ser de bajo costo y localmente disponible para que el proceso sea económicamente viable.

### 2.2.2.1 Tipos de materiales filtrantes

- **Medios inertes**

Se han utilizado durante mucho tiempo como materiales de empaque de filtros percoladores en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Incluyen materiales naturales como arena, antracita, carbón activado, calcita, grava y roca de escoria volcánica (Nacheva, Chávez, Bustos, Garzón-Zúñiga & Orozco, 2008). Estos medios son efectivos en proceso de baja tasa o de pulimiento. También existen medios filtrantes sintéticos como esferas de polietileno y polipropileno, PET triturado a 15 mm (Muñoz y Aldás, 2017), entre otros, que son denominados medios de alta tasa debido a la carga orgánica que soportan (Correa y Sierra, 2004).

La ventaja más importante es que tienen una porosidad en general mayor del 80 % y son muy ligeros, lo que permite aplicar grandes cargas orgánicas sin riesgo de destruir el lecho, debido al excesivo crecimiento de la biopelícula (Sosa, 2015).

- **Medios orgánicos**

En estos materiales se incluyen las virutas de coníferas y turba (Buelna *et al.*, 2001), fibra de agave (Vigueras-Cortés *et al.*, 2013), residuos de poda de tabachin (*Caesalpinia pulcherrima*) y jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) (Garzón-Zúñiga *et al.*, 2011), cáscara de coco y aserrín (Torres *et al.*, 2003), composta y aserrín (Batista *et al.*, 2011), astillas de madera de mezquite (*Prosopis*) (Sosa, 2015) entre otros.

Estos medios han sido utilizados principalmente para tratar aguas residuales industriales (Torres *et al.*, 2003), domésticas (Batista *et al.*, 2011) y municipales (Garzón-Zúñiga *et al.*, 2011); (Vigueras-Cortés *et al.*, 2013), en la Tabla 2.3 se muestran las eficiencias obtenidas en el tratamiento de aguas residuales.

**TABLA 2.3 Eficiencias de remoción de materiales filtrantes orgánicos en aguas residuales**

Autores	Material filtrante orgánico	Tipo de agua residual	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	CF
			Remoción %			Remoción U. log.
Buelna <i>et al.</i> (2001)	Virutas de coníferas y turba	Municipal	96		99	
Torres <i>et al.</i> (2003)	Fibra de cáscara de coco	Industrial	70		90	
	Anillos de guadua	Industrial	65		85	
Garzón-Zúñiga <i>et al.</i> (2011)	Tabachín y jacaranda	Municipal	97	71	95	4
Batista <i>et al.</i> (2011)	Aserrín	Doméstica	71	80		
Viguera-Cortés <i>et al.</i> (2013)	Fibra de agave	Municipal	92	80	91	3

FUENTE: Sosa, 2015

ELABORACIÓN: Quijía, 2018

Talbot *et al.* (1996), Garzón-Zúñiga *et al.* (2011) evaluaron la vida útil de los medios orgánicos empleando turba, tabachín y jacaranda respectivamente, concluyendo que la vida útil era de al menos entre tres y cinco años; y al término de ésta pueden ser utilizados como mejoradores del suelo, previo compostaje.

Este tipo de materiales pueden ser autóctonos, lo que los hace accesibles y por lo tanto se minimiza el costo del proceso, aprovechando de manera sostenible los recursos con lo que cuenta cada sector (Buelna *et al.*, 2011).

### 2.3.3 BIOFILTRO DE FLUJO LIBRE

A este sistema se le aplica el agua a flujo continuo con un rociado tipo lluvia y el tratamiento se produce a lo largo de la circulación de ésta por el material filtrante, además, el sistema con flujo libre requiere una determinada altura, la misma que se traduce con una pérdida de carga hidráulica.

Este biofiltro consume el sustrato en la biopelícula mediante dos fases (Muñoz y Aldás, 2017):

- Fase A: Transferencia externa la cual permite una distribución uniforme del sustrato en el medio de soporte de la biopelícula.
- Fase B: Difusión interna y reacción de consumo son dependientes del espesor de la biopelícula, por lo que se desea que esta tenga el mayor espesor posible para un óptimo consumo.

#### 2.3.4 CIPRÉS

El ciprés (*Cupressus macrocarpa*), perteneciente a la familia *Cupressaceae*, es una conífera arbórea siempreverde originaria del sudeste de Norteamérica. Este árbol alcanza una altura máxima de 25 metros y es de gran longevidad llegando hasta los 500 años (Mamani Inca, 2016).

Generalmente presenta una forma columnar o cónica cuando es joven, pero con la edad puede hacerse redondo. Es una conífera de ramas abiertas con un ángulo aproximado de 45°, hojas en forma de escamas de color verde oscuro superpuestas unas a otras, su tronco es ramificado desde la base con una corteza muy agrietada y de color pardo-grisáceo (Cabrera, Martínez & Granada, 2013), como se puede observar en la Figura 2.3 Se propaga principalmente por semillas, las cuales son pequeñas e irregulares. Presenta resistencia a las heladas y ciertas sequías. Tolerancia todo tipo de suelos, desde ácidos hasta ligeramente alcalinos, incluso resisten cercanía al mar, pero crecen mejor en suelos arenosos (UNAM, 2018).

Este tipo de especie es muy apreciada por su madera y sus atributos ornamentales, estos árboles son susceptibles a plagas y enfermedades, toleran muy bien la contaminación urbana. En Ecuador este tipo de ciprés se cultiva como ornamento en parques o jardines por la belleza y aroma de su follaje, es también utilizada como barrera contra el viento y el ruido (UNAM, 2018), (Merino, 2015).

**FIGURA 2.3 Ciprés (*Cupressus macrocarpa*)**

TOMADA POR: Quijia, 2018

### 2.3 **NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE**

En la Tabla 2.4, se detalla el marco legal aplicable con los artículos de mayor importancia relacionados al tratamiento de las aguas residuales.

**TABLA 2.4 Resumen de la normativa ecuatoriana aplicable al tratamiento de las aguas residuales**

<b>Cuerpo Legal</b>	<b>Artículos</b>
<b>Constitución De La República Del Ecuador</b>	Art. 3 y Art. 14 “La protección del patrimonio natural es deber del Estado así como la protección del ambiente es un interés público.” Art. 264 “Los gobiernos municipales tienen la competencia de prestar el servicio público de depuración de aguas residuales.”
<b>Código Orgánico Ambiental</b>	Art. 196 “Los GADs Municipales deberán contar con la infraestructura técnica para la instalación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Asimismo deberán fomentar el tratamiento de las aguas



	residuales con fines de reutilización, siempre y cuando éstas recuperen los niveles cualitativos y cuantitativos que exija la autoridad competente y no se afecte la salubridad pública.”
<b>Reforma Del Libro VI Del Texto Unificado De Legislación Ambiental Secundaria Del Ministerio De Ambiente</b>	Art. 211 “La Autoridad Ambiental Competente en coordinación con las Agencia de Regulación y Control del Agua, verificará el cumplimiento de las normas técnicas en las descargas provenientes de los sistemas de tratamiento implementadas por los GADs”.

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

### 2.3.1 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS PARA USO AGRÍCOLA EN RIEGO

El Anexo 1 del TULSMA, corresponde a la Norma de Calidad Ambiental y descargas de efluentes: Recurso Agua. En este anexo se establecen los criterios de calidad admisibles para las aguas destinadas a uso agrícola. En la Tabla 2.5 se resumen los parámetros.

**TABLA 2.5 Criterios de calidad de aguas para uso agrícola en riego**

Parámetro	Expresado como	Unidad	Criterio de calidad
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico	As	mg/l	0,1
Berilio	Be	mg/l	0,1
Boro	B	mg/l	0,75
Cadmio	Cd	mg/l	0,05
Cinc	Zn	mg/l	2,0
Cobalto	Co	mg/l	0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,2
Cromo	Cr <sup>6</sup>	mg/l	0,1
Flúor	F	mg/l	1,0
Hierro	Fe	mg/l	5,0
Litio	Lo	mg/l	2,5
Mercurio	Hg	mg/l	0,001
Manganeso	Mn	mg/l	0,2
Molibdeno	Mo	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	0,2
pH	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/l	5.0

Selenio	Se	mg/l	0,02
Vanadio	V	mg/l	0,1
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Huevos de parásitos			Ausencia
Aceites y grasas	Película visible		Ausencia
Material flotante	Visible		Ausencia

FUENTE: TULSMA Libro VI, 2015

### 2.3.2 GUÍAS DE LA EPA-2012 PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA LA AGRICULTURA

En la Tabla 2.6 se muestra la calidad requerida por la EPA para tres categorías de cultivos: riego de cultivos que se ingieren crudos, riego de cultivos que se procesan comercialmente y cultivos de cosechas que no son para consumo humano.

**TABLA 2.6 Guías de la EPA para la reutilización de las aguas residuales tratadas en el sector agrícola**

USO	CALIDAD REQUERIDA
En riego superficial o por asperjado de cultivos de alimentos para consumo humano se ingiere crudo	pH= 6-9 DBO ≤ 10 mg/L Turbiedad ≤ 2 UNT Coliformes Fecales = No detectable Cloro Residual = 1 mg/L
Riego superficial para cultivos de alimento para consumo humano y que se procesan comercialmente	pH= 6-9 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Coliformes Fecales ≤ 200 NMP/100 mL Cloro Residual = 1 mg/L
Riego de cosechas que no se consumen por humanos incluyendo fibras, semillas y pasto	pH= 6-9 DBO ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Coliformes Fecales ≤ 200 NMP/100 mL Cloro Residual = 1 mg/L

FUENTE: Environmental Protection Agency, 2012

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE ORGÁNICO

##### 3.3.1 PREPARACIÓN DEL MATERIAL

El material de empaque utilizado para el sistema de biofiltración en el presente estudio fueron las astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*), las cuales se obtuvieron de la poda de árboles del predio del Colegio Once de Febrero de la parroquia de Nayón (Figura 3.1), el mismo que se encuentra disponible todo el año y resulta ser una buena alternativa para la reutilización en la biofiltración, debido a que hasta el momento sus residuos son desechados sin ser aprovechados.

**FIGURA 3.1** Predio del Colegio donde se obtuvo el ciprés (*Cupressus macrocarpa*)

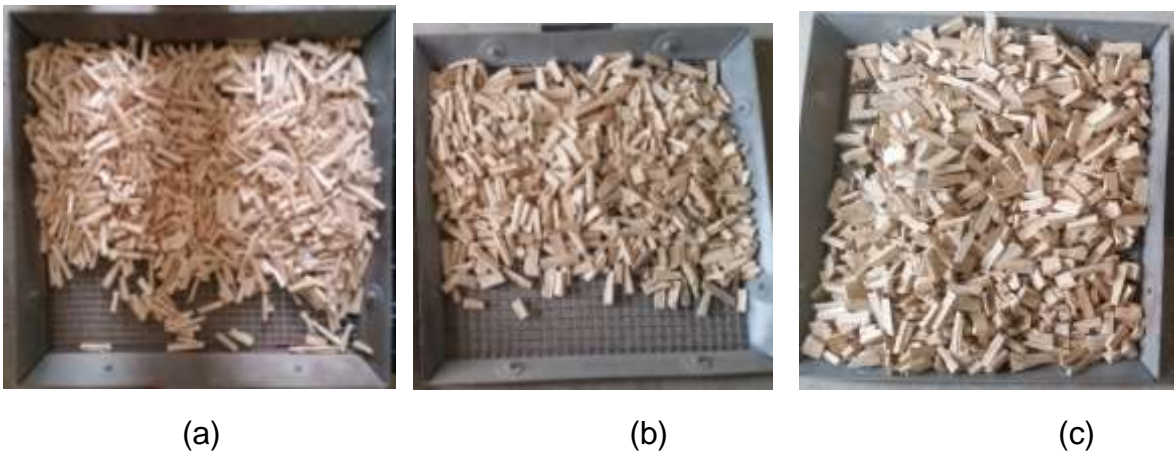


TOMADA POR: Quijia, 2018

La metodología empleada en el estudio fue la propuesta por Sosa (2015), que consiste en el siguiente procedimiento:

1. Se recolectó los troncos y ramas gruesas de la poda de ciprés (*Cupressus macrocarpa*).
2. Se descortezó y trituró en tamaños convenientes para facilitar el secado.
3. Se tamizó el material filtrante mediante una tamizadora eléctrica. Los tamices empleando fueron los  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{8}$ " de la serie ASTM.
4. Se dividió el material filtrante en 3 grupos de acuerdo al tamiz empleado. El primer, segundo y tercer grupo corresponde a las astillas retenidas en los tamices de  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{8}$ " respectivamente como se observa en la Figura 3.2 (a) corresponde a las astillas de ciprés del tamiz  $\frac{3}{4}$ ", (b) material filtrante del tamiz  $\frac{1}{2}$ " y (c) astillas del tamiz  $\frac{3}{8}$  ".
5. Se secó el material dividido durante 4 semanas al sol según lo descrito por Hernández (2009).
6. Se pesó y almacenó el material filtrante.

**FIGURA 3.2 Tamaños de material filtrante empleados**



TOMADA POR: Quijia, 2018

### 3.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material de soporte empleado en los biofiltros fue caracterizado físicamente con respecto al contenido de humedad, densidad aparente, peso específico de la pared celular y porosidad en estado anhidro.

La humedad del ciprés (*Cupressus macrocarpa*) fue determinada de acuerdo a la Norma ASTM D4442-16 (2007), la densidad aparente de la madera y el peso específico de la pared celular de acuerdo con Smith (1954) y la porosidad según Siau (1984). Estos parámetros físicos fueron determinados en estado anhidro.

Para determinar la densidad aparente de las astillas de madera a emplearse se utilizó el método de máximo contenido de humedad propuesta por Valencia y Vargas (1997). El procedimiento llevado a cabo fue el siguiente:

1. Se secaron las muestras de madera en la estufa a 105°C durante 24 horas (Figura 3.3 a).
2. Se determinó el peso anhidro ( $P_o$ ) en una balanza analítica después de deshidratarse las muestras.
3. Se colocaron las astillas de madera en un recipiente con agua durante 8 días para lograr la penetración total del agua en la madera (Figura 3.3 b).
4. Se sacaron del recipiente quitando el exceso de agua y se pesaron en la balanza analítica y de este modo se obtuvo el peso saturado ( $P_s$ ) (Figura 3.3 c).

**FIGURA 3.3 Método de máximo contenido de humedad para astillas empleadas**



(a)



(b)



(c)

TOMADA POR: Quijia, 2018

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR

Los sistemas de biofiltración se alimentaron con el agua del Río Machángara, misma que contiene aguas residuales municipales. La caracterización del efluente se enfocó en los parámetros físico-químicos y biológicos como indicadores para la reutilización del agua residual en el sector agrícola. Estos parámetros fueron Potencial Hidrógeno (pH), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF).

Los análisis se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. El análisis biológico de Coliformes Fecales se realizó en el Centro de Investigaciones y Control Ambiental ubicado en la Escuela Politécnica Nacional. Los ensayos realizados para la caracterización del efluente se describen detalladamente en la Tabla 3.1.

**TABLA 3.1 Parámetros para la caracterización del efluente**

Parámetro	Método	Equipo	Fotografía
Potencial Hidrógeno	4500-H B	Potenciómetro HACH modelo Oakton	
Sólidos Totales Suspendidos	APHA 2540 B	- Estufa BINDER - Bomba de vacío	

Demanda Química de Oxígeno	APHA 5220D	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Digestor HACH para DQO</li> <li>- Espectrofotómetro HACH DR2700</li> </ul>	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	APHA 5210B	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Botellas ámbar para DBO</li> <li>- Equipo manométrico de medición de la DBO, OxyTop.</li> <li>- Incubadora WTW</li> </ul>	
Coliformes Fecales	APHA 9222C	Incubadora MEMMERT	

FUENTE: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1996  
 ELABORACIÓN: Quijia, 2018

### 3.3.1 SITIO DE MUESTREO

El punto de muestreo se ubicó antes de que las aguas residuales municipales sean empleadas en el riego de los cultivos del sector San Pedro del Valle como se observa en la Figura 3.4, con el objetivo de analizar la mejora de la calidad del agua antes de ser utilizada en la irrigación de cultivos. El punto de muestreo está ubicado en las coordenadas UTM (X: 786 506 Y: 9 979 973).

**FIGURA 3.4 Sitio de la toma de muestra**



TOMADA POR: Quijia, 2018

El procedimiento para el muestreo se detalla a continuación:

1. Medición de la temperatura en campo empleando un termómetro marca PromoLab con precisión de  $\pm 2$  °C.
2. Recolección de la muestra compuesta en tanques de plástico para la alimentación de los biofiltros.
3. Recolección de muestra y llenado en envase estéril, para el análisis en el laboratorio.
4. Observaciones y toma de fotografías.
5. Transporte de la muestra a las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional de acuerdo a la Norma NTE INEN 2169:2013.

### ***3.2.1.1 Periodo de muestreo***

Las muestras se empezaron a tomar a inicios del mes de mayo hasta el mes de agosto del 2018 como se indica en la Tabla 3.2. El muestreo se realizó una vez por semana, todas las muestras fueron tomadas en un rango de hora de 9:00 a.m. a 9:30 a.m., de las cuales se obtuvieron un total de 15 muestras.



**TABLA 3.2 Período de muestreo**

<b>Fecha</b>	<b>Volumen (L)</b>	<b>Hora de muestreo</b>
09/05/2018	75	9h20
14/05/2018	75	9h00
21/05/2018	75	9h30
28/05/2018	75	9h10
04/06/2018	75	9h00
11/06/2018	75	9h10
18/06/2018	75	9h00
25/06/2018	75	9h30
02/07/2018	75	9h20
09/07/2018	75	9h00
16/07/2018	75	9h10
23/07/2018	75	9h30
30/07/2018	75	9h00
06/08/2018	75	9h00
13/08/2018	75	9h30

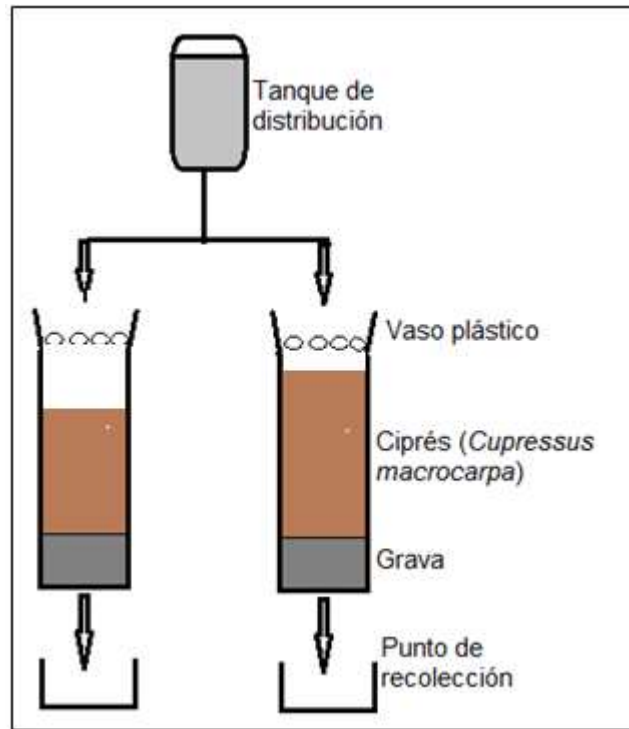
ELABORACIÓN: Quijia, 2018

### **3.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN**

#### **3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCION DE SISTEMA EXPERIMENTAL**

Se diseñaron y construyeron seis biofiltros a flujo libre, a escala laboratorio, para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales municipales captadas del Río Machángara empleando como medio filtrante astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*). El sistema experimental fue construido e instalado en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional, en la Figura 3.5 se muestra un esquema.

**FIGURA 3.5 Esquema experimental del sistema de biofiltración**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Las aguas residuales municipales alimentaron por gravedad al sistema de biofiltración partiendo desde un tanque de distribución, el cual alimentaba a dos biofiltros. El tanque de distribución fue conectado a una llave de compuerta, ésta a su vez fue acoplada a una manguera de diámetro interno de 5/16" seguida de un equipo de venoclisis, con la finalidad de aplicar una carga hidráulica  $0.55 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  como lo recomienda Sosa (2015). Los tanques de distribución a parte de alimentar a los biofiltros, sirvieron como un sedimentador primario para remover los sólidos en suspensión sedimentables presentes en el agua residual a tratar con la finalidad de evitar un posible taponamiento en los biofiltros por tratarse de sistemas con medios porosos (Muñoz y Aldás, 2017).

En base al área superficial del biofiltro y la carga hidráulica se determinó el caudal de diseño a suministrarse de manera constante durante toda la etapa experimental, correspondiente a  $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  como se observa en la Figura 3.6.

**FIGURA 3.6 Conexiones del sistema de biofiltración**



TOMADA POR: Quijia, 2018

Con el objetivo de mantener y asegurar el caudal constante que alimentaba al sistema, se efectuó un control diario del caudal con la ayuda de una jeringuilla de 3 ml y un cronómetro verificando la obtención del caudal de  $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Los biofiltros fueron construidos con botellas PET recicladas, cada biofiltro requirió de cuatro botellas de 1,35 litros con diámetro de 0,0816 m unidas con silicona transparente para alcanzar una altura de 0,75 m, los cuales fueron dispuestos de forma vertical en un soporte de metal.

Los biofiltros están constituidos de dos capas de material descritas a continuación:

- Primera capa: 8 centímetros de grava 9,5 mm (Tamiz ASTM  $\frac{3}{8}$ "), que sirvió de soporte para el material filtrante.
- Segunda capa: astillas de ciprés (alturas 0,45 m y 60 m), que permitió el desarrollo de microorganismos.

Para garantizar una distribución homogénea del efluente a tratar en todo el biofiltro se implementó un vaso plástico de 32 oz con agujeros, ubicado en la parte superior de todos los biofiltros.

Una vez culminada la fase de construcción del sistema experimental se continuó con el periodo de monitoreo, el cual se efectuó mediante la toma de muestras en botellas plásticas de 1 litro y en envases estériles para análisis de CF en el punto de salida del efluente.

En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de las dimensiones del diseño y los parámetros de operación de los biofiltros empleados en la presente investigación.

**TABLA 3.3 Dimensiones y parámetros de los biofiltros**

Parámetros		Valor	Unidad
Altura del material filtrante	Biofiltro 1	0,45	m
	Biofiltro 2	0,60	m
	Biofiltro 3	0,45	m
	Biofiltro 4	0,60	m
	Biofiltro 5	0,45	m
	Biofiltro 6	0,60	m
Tamaño de partícula de acuerdo al tamiz empleado	Biofiltro 1	$\frac{3}{4}$	in
	Biofiltro 2	$\frac{3}{4}$	in
	Biofiltro 3	$\frac{1}{2}$	in
	Biofiltro 4	$\frac{1}{2}$	in
	Biofiltro 5	$\frac{3}{8}$	in
	Biofiltro 6	$\frac{3}{8}$	in
Volumen del biofiltro		0,0039	m <sup>3</sup>
Diámetro del biofiltro		0,0816	m
Área superficial del biofiltro		0,0052	m <sup>2</sup>
Caudal de alimentación		0,0029	m <sup>3</sup> .día <sup>-1</sup>
Carga hidráulica		0,55	m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

### 3.3.2 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

El agua del Río Machángara que alimentaba los seis biofiltros se encontraba almacenada en tres tanques con 50 litros cada uno, cada tanque alimentaba a dos biofiltros con la finalidad de suministrar un caudal de entrada de 2 mL.min<sup>-1</sup> a flujo continuo (Sosa, 2015). El agua empleada en el sistema de biofiltración fue renovada de forma semanal, con el propósito de evitar que el efluente a tratar cambie sus

características físico-químicas y biológicas en su totalidad. En la Figura 3.7 se observa los sistemas de biofiltración instalados en el laboratorio.

**FIGURA 3.7 Sistemas de biofiltración instalados en el laboratorio**



TOMADA POR: Quijia, 2018

### **3.4 ACONDICIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS**

Previo al período de monitoreo, fue necesario un período de acondicionamiento de 35 días durante el cual los microorganismos crecieron y se adaptaron a las condiciones de operación permitiendo la formación de la biopelícula sobre el material filtrante orgánico.

Durante el período de acondicionamiento se incrementaron las concentraciones de DQO y DBO<sub>5</sub>, debido al lavado del material filtrante, después de los 28 días empezaron a disminuir. Una vez que las concentraciones de DQO y DBO<sub>5</sub> en el

efluente empezaron a disminuir y la unidad experimental se acondicionó, se continuó con el periodo de monitoreo.

### 3.5 MONITOREO DE LOS BIOFILTROS

El periodo de monitoreo se efectuó del 21 de junio al 23 de agosto del 2018, en el cual se realizaron mediciones de los parámetros de temperatura, pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF para determinar la eficiencia del material filtrante empleado en los biofiltros.

Para el monitoreo de los biofiltros se realizó la toma de muestras del efluente a la salida del biofiltro, en la Tabla 3.4 se detallan los parámetros monitoreados así como también la periodicidad de los mismos.

**TABLA 3.4 Parámetros de monitoreo**

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Periodicidad</b>
Temperatura	2550	Semanal
Potencial Hidrógeno	4500-H B	Semanal
Sólidos Totales Suspendidos	APHA 2540 B	Semanal
Demanda Química de Oxígeno	APHA 5220D	Semanal
Demanda Bioquímica de Oxígeno	APHA 5210B	Semanal
Coliformes Fecales	APHA 9222C	Semanal

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

### 3.6 EVALUACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN

La eficiencia de los biofiltros se determinó estableciendo dos puntos de muestreo, el primero estuvo ubicado en la entrada del tanque de distribución del agua residual

cruda y el segundo punto a la salida del biofiltro. En cada punto de muestreo de los seis biofiltros se determinó semanalmente DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, CF, pH y T.

Para determinar la eficiencia de remoción en cada parámetro a la salida de los biofiltros, se calculó con la ecuación 1 como se indica a continuación.

$$\% \text{ Eficiencia de Remoción} = \left(1 - \frac{F}{I}\right) * 100 \quad (1)$$

Dónde:

F: concentración del parámetro medido en la salida del sistema

I: concentración del parámetro medido a la entrada del biofiltro

Los resultados obtenidos se organizaran en tablas y gráficos. Las variables medidas se compararon con respecto a los límites permisibles establecidos en las guías de la EPA para la reutilización de las aguas residuales tratadas en el sector agrícola (1992), para el riego superficial de cultivos de alimento para consumo humano y que se procesan comercialmente.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE

En el presente proyecto de titulación se caracterizó los tres tamaños de partícula de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) empleados como material de soporte en los biofiltros. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1. En el Anexo 1 se describe de forma detallada la información obtenida para cada tamaño de partícula.

**TABLA 4.1 Características del material filtrante**

Características	Tamaño del Material Filtrante		
	¾"	½"	⅜"
Contenido de Humedad [%]	43,23 ± 7,12	46,78 ± 7,03	51,09 ± 4,27
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	657,21 ± 92,56	633,31 ± 52,52	584,18 ± 27,00
Peso específico de la pared celular	1,53 ± 0,00	1,53 ± 0,00	1,53 ± 0,00
Porosidad [%]	57,05 ± 6,05	58,61 ± 3,43	61,82 ± 1,76

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

El contenido de humedad de las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) se encuentra entre 43,23 % y 51,09 %, valores que están dentro del rango de humedad óptima (40 al 60 %), por lo que se le considera al ciprés como un material orgánico con una buena capacidad de retención de agua; lo que favorece a los microorganismos, debido a que éstos requieren de una importante cantidad de agua para crecer (Torres *et al.*, 2013).

La densidad aparente del ciprés (*Cupressus macrocarpa*) obtenida en los ensayos de laboratorio se encuentra en un rango de 584,18 a 657,21 kg/m<sup>3</sup>, por lo cual se la clasifica como una madera ligera y estable dimensionalmente frente a los cambios de humedad (Kininmonth & Whitehouse, 1991).



El peso específico de la pared celular tiene el mismo valor para los tres diferentes tamaños de partícula, por tratarse de la misma especie y éste valor tiende a variar cuando se trata de diferentes especies de madera (Pérez-Peña *et al*, 2011).

Los tres diferentes tamaños de partícula presentan una porosidad superior al 50 %, esta característica de acuerdo a Torres *et al*. (2003) lo hace un adecuado material filtrante, que permite la adherencia de microorganismos y reduce la posibilidad de acumulación de sedimentos.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR

La caracterización del agua residual municipal empleada a lo largo del período experimental se muestra en la Tabla 4.2. Según la clasificación de Maldonado *et al*. (2002) para las aguas residuales municipales, los parámetros de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF corresponde a un agua residual municipal de composición baja.

**TABLA 4.2 Caracterización promedio del agua residual municipal**

Parámetro	Unidades	Concertación promedio $\pm$ D.E.	Número de muestras
pH	unidades	7,95 $\pm$ 0,33	15
Temperatura	°C	18,10 $\pm$ 1,00	15
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	160,13 $\pm$ 62,35	15
DBO <sub>5</sub>	mg.L <sup>-1</sup>	84,29 $\pm$ 42,72	14
SST	mg.L <sup>-1</sup>	80,86 $\pm$ 20,19	15
CF	NPM.100mL <sup>-1</sup>	2,26E+06 $\pm$ 1,30E+06	13

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

D.E.=Desviación estándar, NMP= Número más probable

De acuerdo con la relación entre la DQO y la DBO<sub>5</sub> de 1,90, esta agua residual municipal es altamente biodegradable, por lo que es apta para ser depurada a través de un tratamiento biológico de acuerdo con Hernández-Muñoz (1996).

### 4.3 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN

En la Figura 4.1, se muestran los efluentes obtenidos de los biofiltros al día 98 de operación, donde se observó las coloraciones después del proceso de depuración que las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) realizaron al agua residual empleada.

**FIGURA 4.1 Efluentes de los biofiltros al día 98 de operación**



TOMADA POR: Quijia, 2018

A continuación se hace una descripción del comportamiento de los parámetros medidos en la etapa de acondicionamiento y monitoreo de los sistemas de biofiltración.

#### 4.3.1 REMOCIÓN DE LA DQO

El comportamiento de la concentración de DQO del efluente a tratar, a partir del día 63 de operación en adelante tiene un aumento elevado, debido al incremento de temperatura ambiente que se presentó durante este período de verano.

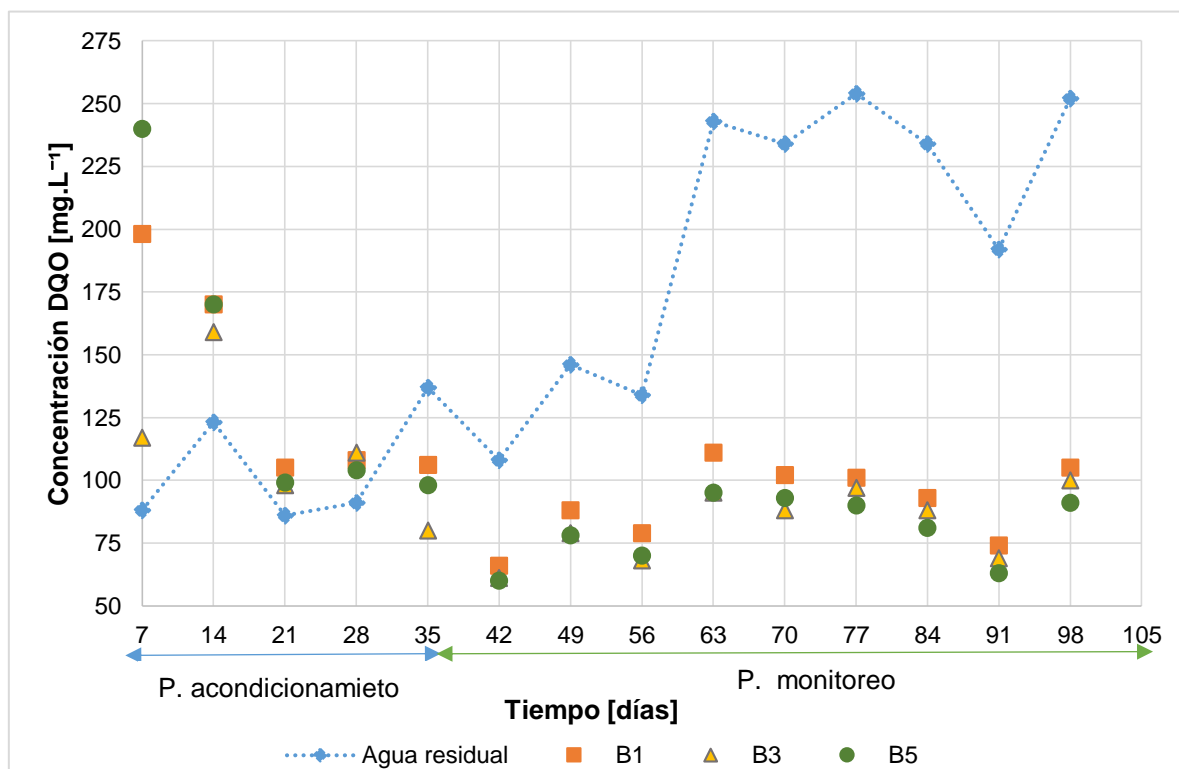
En el período de acondicionamiento de los seis biofiltros, la concentración de la DQO en el transcurso de la primera semana aumento en un 125,00 % el B1, 37,50 % el B2, 32,95 % el B3, 101,14 % el B4, 172,73 % el B5 y 128,41 % el B6 con respecto al efluente a tratar, mismas que disminuyeron con el tiempo. El aumento

en la concentración en la DQO es causado por el lavado del material filtrante, comportamiento que es similar con lo reportado por Garzón-Zúñiga *et al.* (2008).

A partir del día 35 comenzó a disminuir la concentración en la DQO, logrando al final de este período una remoción del 22,63 % en B1, 32,12 % en B2, 41,61 % en B3, 32,12 % en B4, 28,47 % en B5 y 40,15% en B6.

Durante el período de monitoreo la concentración en la DQO tuvo una tendencia a disminuir hasta el final de esta etapa; alcanzando valores de concentración que fluctúan entre 89 y 105 mg.L<sup>-1</sup>. Los datos del comportamiento de las concentraciones en la DQO durante los dos períodos se observa en el Gráfico 4.1 para una altura de material filtrante de 0,45 m.

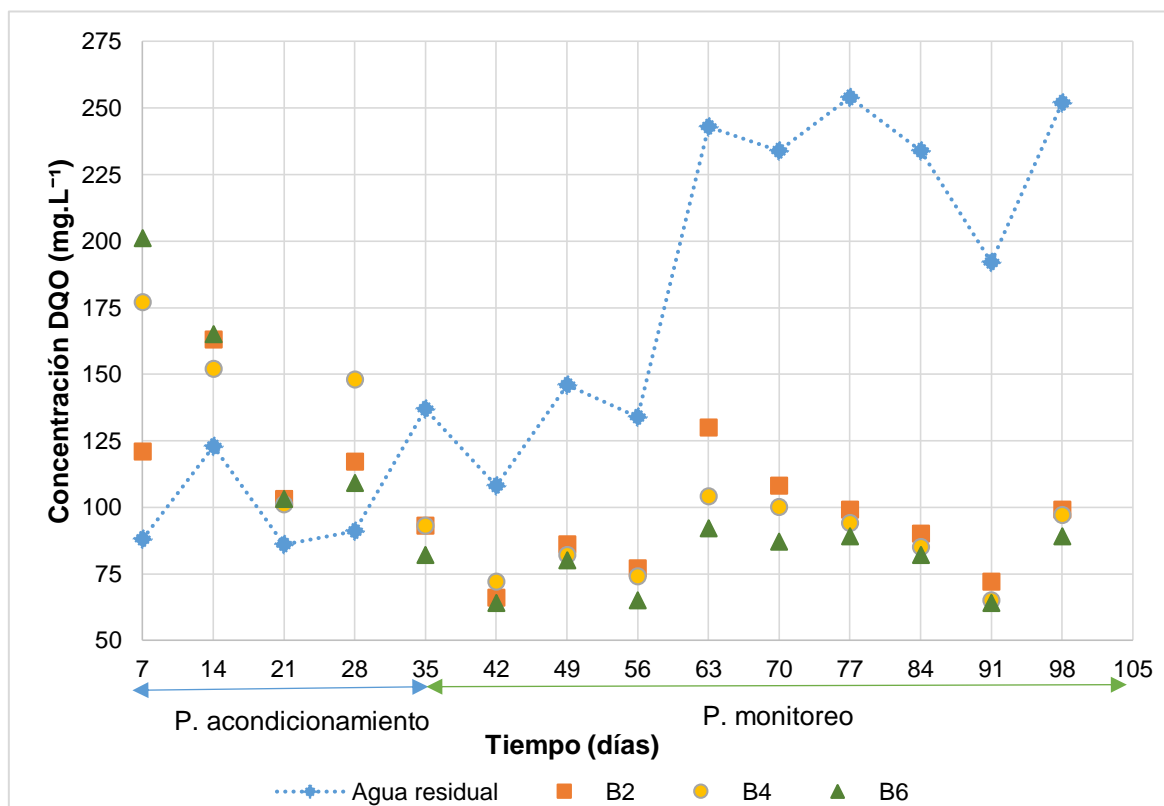
**GRÁFICO 4.1 Comportamiento de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

En el Gráfico 4.2 se presenta el comportamiento de la DQO para una altura de material filtrante de 0,60 m.

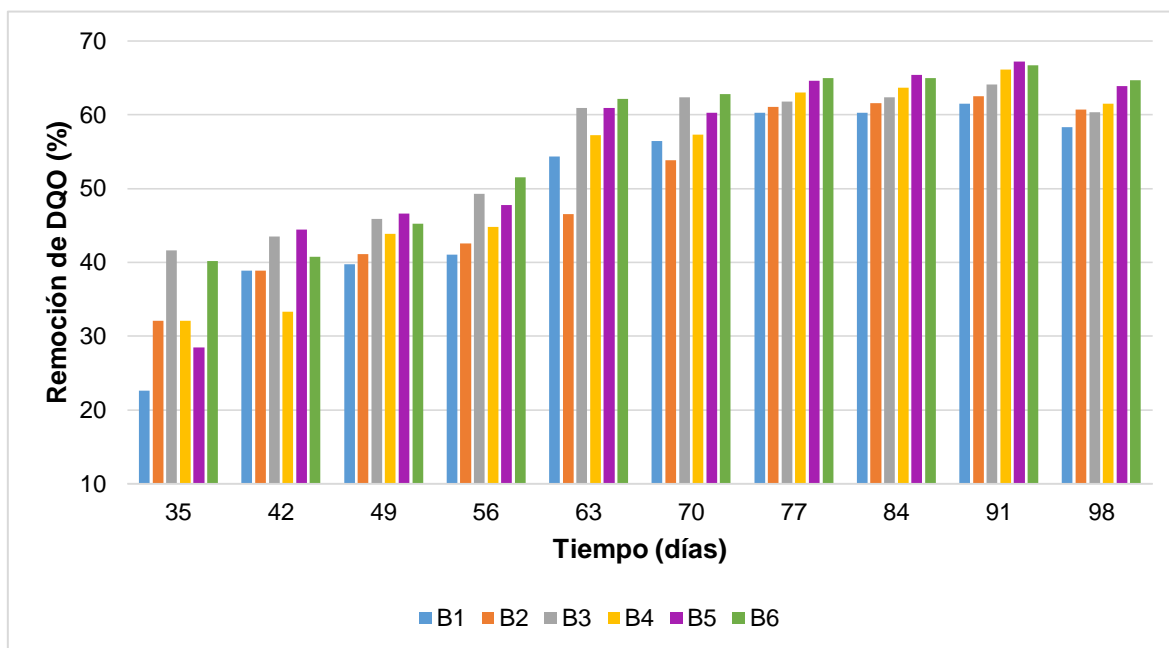
**GRÁFICO 4.2 Comportamiento de la DQO durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Las eficiencias de remoción obtenidas al final de la etapa de monitoreo son superiores al 50 % para los seis biofiltros empleados como se muestra en el Gráfico 4.3. Al día 91 de operación se alcanza la mayor eficiencia de remoción de DQO para los biofiltros 1, 3, 4 y 5 con valores de 63,54 %, 65,10 %, 64,58 % y 67,19 %; a diferencia de los biofiltros 2 y 6 que alcanzaron su mayor eficiencia el día 98 con valores de remoción de 62,59 % y 66,91% respectivamente.

**GRÁFICO 4.3** Eficiencia de remoción de DQO en el período de experimentación



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

En la Tabla 4.3 se representa los porcentajes de remoción de DQO mínimos y máximos alcanzados en el período de monitoreo por los seis biofiltros estudiados, así como también la remoción promedio (a partir del día 70), siendo el biofiltro más eficiente para la remoción de DQO el biofiltro seis con una altura del material filtrante de 0,60 m y un tamaño de partícula de  $\frac{3}{8}$ " ( $64,82 \pm 1,22$  %) y el biofiltro 1 alcanzó la menor eficiencia ( $59,34 \pm 1,77$ ) con respecto a los demás biofiltros.

**TABLA 4.3** Porcentajes de remoción de DQO en período de monitoreo

Biofiltro N°	Período de monitoreo		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
B1	38,89	61,46	$59,34 \pm 1,77$
B2	38,89	62,50	$59,92 \pm 3,10$
B3	43,52	64,06	$62,19 \pm 1,20$
B4	33,33	66,15	$62,32 \pm 2,94$
B5	44,44	67,19	$64,26 \pm 2,28$
B6	40,74	66,91	$64,82 \pm 1,22$

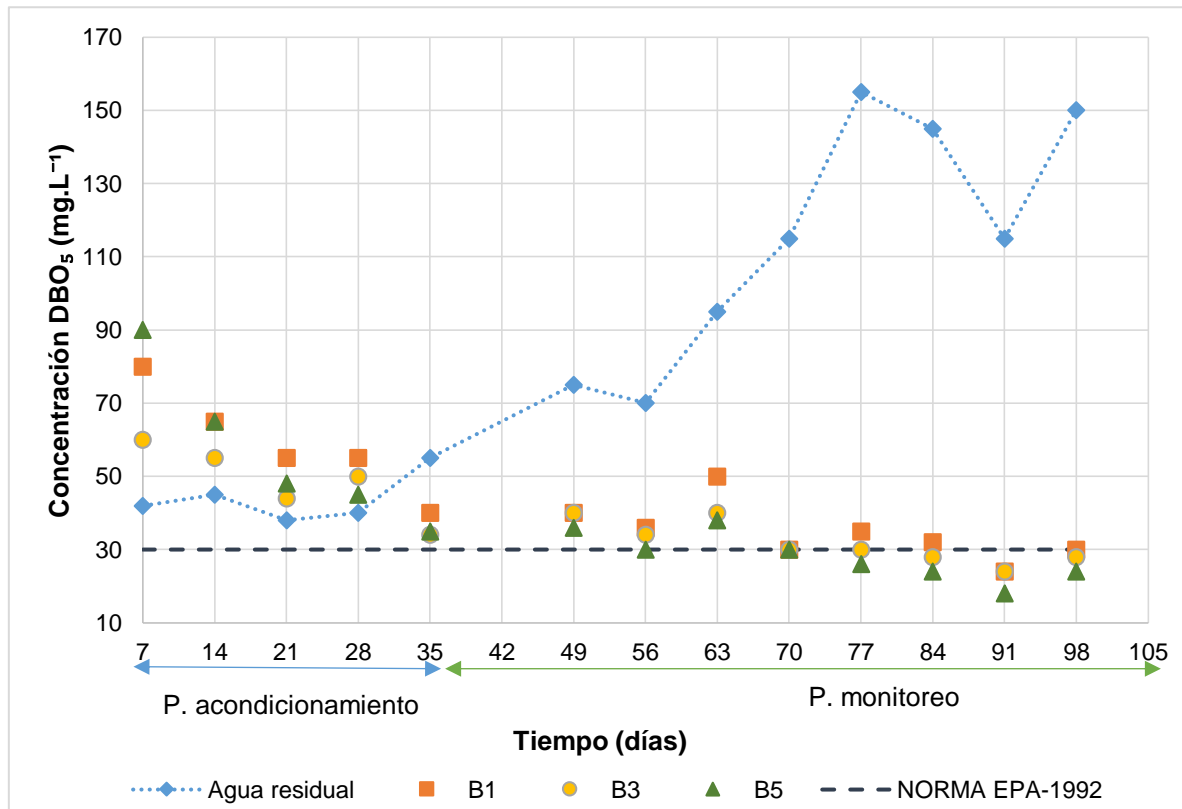
ELABORACIÓN: Quijia, 2018

La remoción promedio obtenida para el biofiltro seis (64,82 ± 1,22 %) aplicando una carga hidráulica superficial de 0,55 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup> es menor a las eficiencias obtenidas en los estudios de Viguera-Cortés *et al.* (2013) y Sosa (2015) correspondiente al 69% y 78 % aplicando una carga hidráulica de 0,80 y 1,07 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>; estos estudios iniciaron con una carga hidráulica superficial inferior a la cual se alcanzó la máxima eficiencia de remoción, debido a que a cargas hidráulicas altas no se puede dar una adecuada formación de la biopelícula (Sosa *et al.*, 2014).

#### 4.3.2 REMOCIÓN DE LA DBO<sub>5</sub>

El comportamiento de la DBO<sub>5</sub> al aplicar una carga hidráulica superficial de 0,55 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup> se muestra en el Gráfico 4.4 para una altura de material filtrante de 0,45 m.

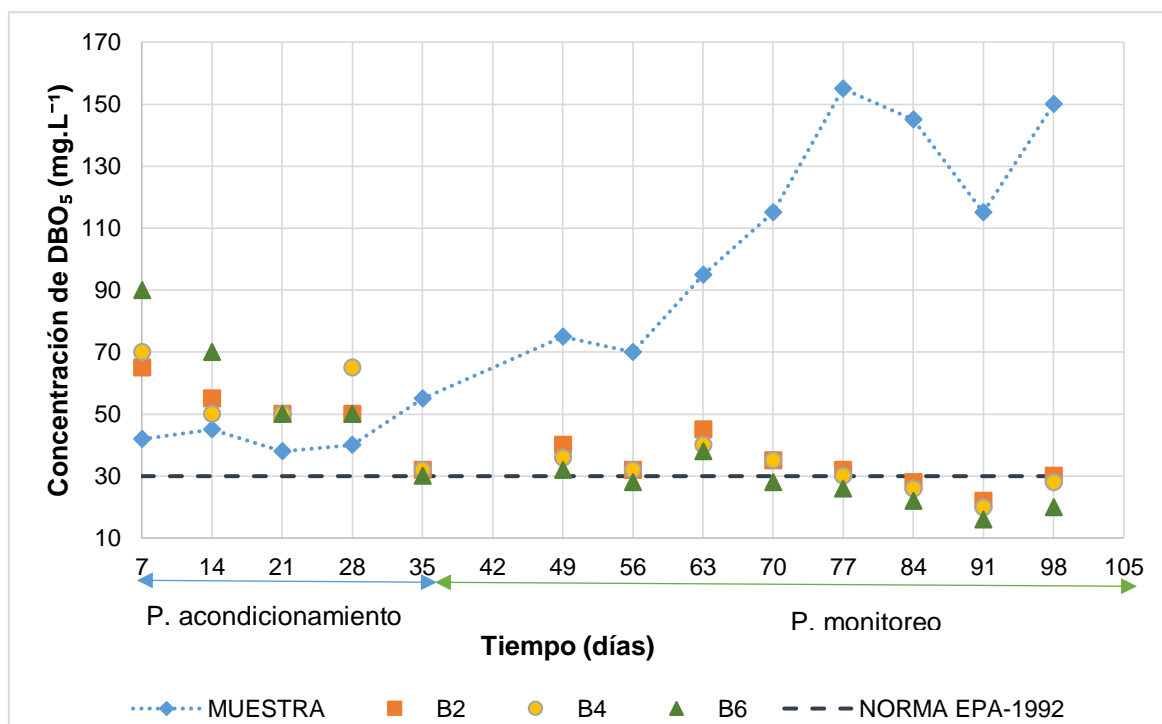
**GRÁFICO 4.4 Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

En el Gráfico 4.5 para una altura de material filtrante de 0,60 m se presenta el comportamiento de la  $DBO_5$ . Al inicio de la etapa de acondicionamiento se presentó un incremento en la concentración con respecto al efluente alimentado del 90,48 % en B1, 54,76 % en B2, 42,86 % en B3, 66,67 % en B4, 114,29 % en B5 y 114,29 % en B6 durante la primera semana.

**GRÁFICO 4.5 Comportamiento de la  $DBO_5$  durante el período de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m**

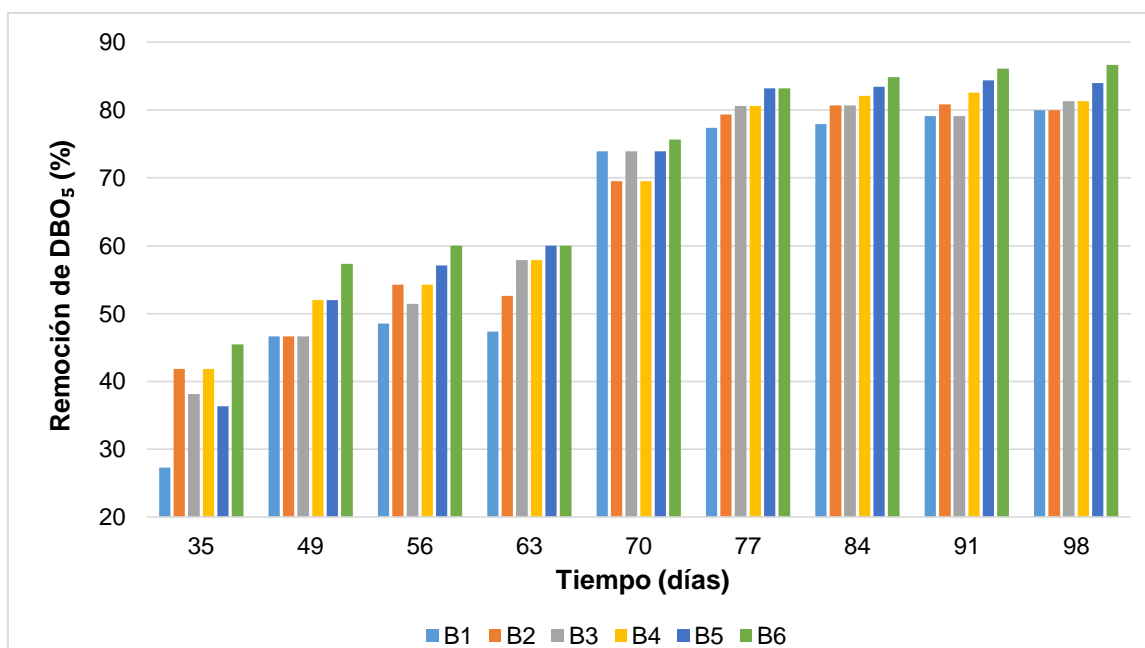


ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Al día 35 de operación (final de la etapa de acondicionamiento) las concentraciones de  $DBO_5$  empezaron a disminuir alcanzando eficiencias de remoción que fluctúan en un rango de 27,27 a 45,45 %.

En la etapa de monitoreo las concentraciones siguieron disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar eficiencias de remoción del 80,00 % en B1 y B2, 83,33 % en B3, 81,33 % en B4, 84,00 % en B5 y 86,67 % en B6 como se muestra en el Gráfico 4.6.

### GRÁFICO 4.6 Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en el período de experimentación



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

A partir del día 77 de operación los biofiltros 3, 4 y 5 alcanzaron el límite máximo permisible (LMP) establecido en las guías de la EPA ( $\leq 30 \text{ mg.L}^{-1}$ ) para la reutilización de aguas residuales en el riego y al final del período de monitoreo todos los sistemas de biofiltración alcanzaron el valor establecido en las guías de la EPA.

Es importante resaltar que el biofiltro 6 con un tamaño de partícula de  $\frac{3}{8}$ " y una altura de material filtrante de 0,60 m logró remover la mayor cantidad de DBO<sub>5</sub> alcanzando un valor de  $24 \text{ mg.L}^{-1}$ , el cual cumple con el LMP establecido en las guías de la EPA.

En la Tabla 4.4 se presentan los porcentajes de remoción mínimo, máximo y promedio obtenidos en los sistemas de biofiltración empleado como material de soporte astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) en el periodo de monitoreo.



**TABLA 4.4 Porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> en el período de monitoreo**

Biofiltro N°	Período de monitoreo		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
B1	46,67	80,00	77,68 ± 2,09
B2	46,67	80,87	78,10 ± 4,30
B3	46,67	83,33	79,14 ± 2,71
B4	52,00	82,61	79,24 ± 4,88
B5	52,00	84,35	81,79 ± 3,96
B6	57,33	86,67	83,29 ± 4,00

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

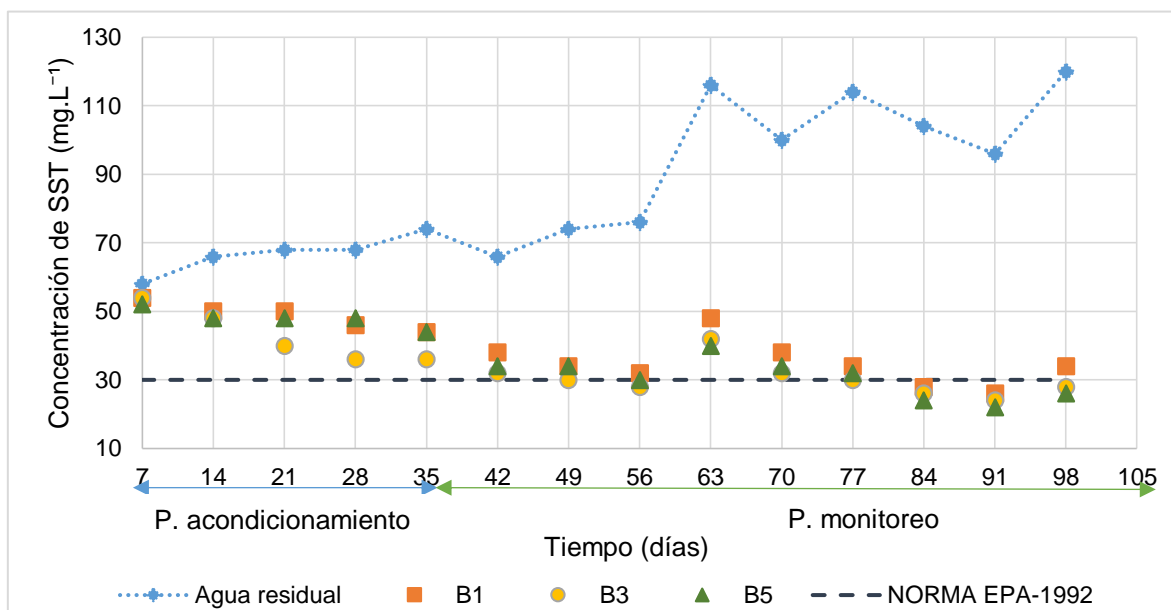
Las eficiencias de remoción promedio alcanzados por los sistemas (a partir del día 70) fluctúan entre 77,68 y 83,29 %, mismo que son inferiores a las obtenidas por Viguera-Cortés *et al.* (2013) y Sosa (2015), con fibra de agave y mezquite como material filtrante alcanzando una eficiencia de 90,9 % y 92 % respectivamente.

#### 4.3.3 REMOCIÓN DE SST

En el período de acondicionamiento las concentraciones de SST disminuyeron con respecto del agua residual a tratar, reportaron concentraciones de 44 mg.L<sup>-1</sup> en B1, 40 mg.L<sup>-1</sup> en B2, 36 mg.L<sup>-1</sup> en B3, 40 mg.L<sup>-1</sup> en B6, 44 mg.L<sup>-1</sup> en B4 y B5 al final de la etapa.

Se observó que durante la etapa de monitoreo las concentraciones de SST continuaron disminuyendo, al día 98 se obtuvieron valores de 30 mg.L<sup>-1</sup> en B2, 26 mg.L<sup>-1</sup> en B6, 28 mg.L<sup>-1</sup> en B3, B4 y B5, alcanzando concentraciones que cumplen el LMP en las guías de la EPA ( $\leq 30$  mg.L<sup>-1</sup>), a excepción del biofiltro 1 (34 mg.L<sup>-1</sup>) que tiene una concentración superior a la establecida en las guías como se muestran en el Gráfico 4.7 para una altura 0,45 m de material filtrante.

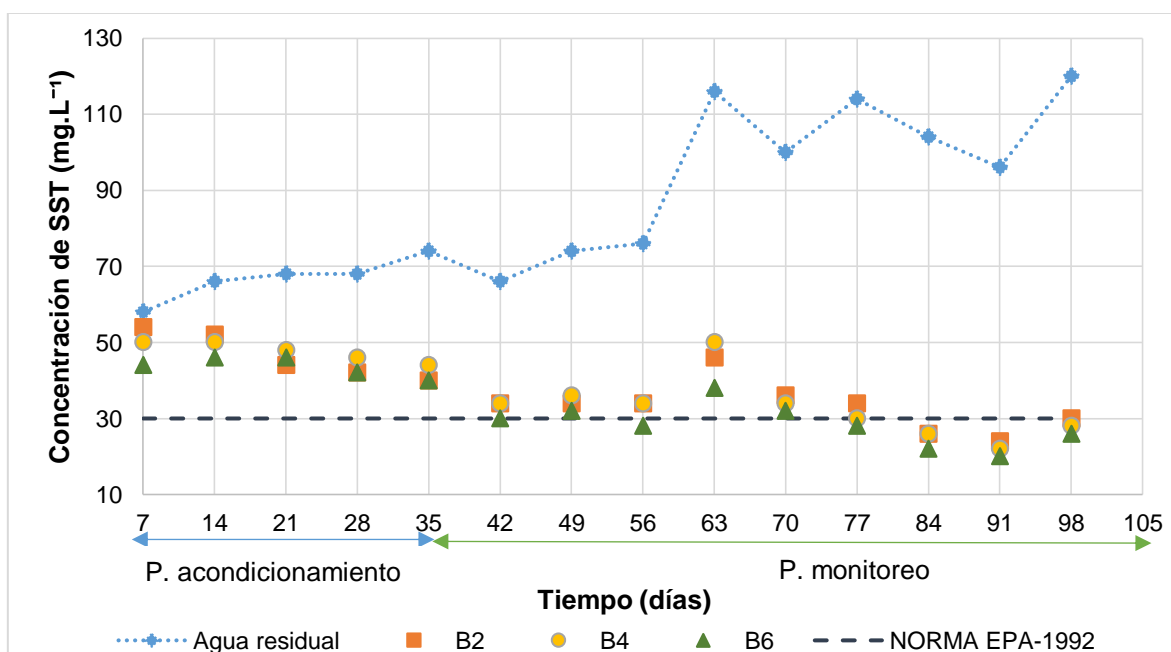
**GRÁFICO 4.7 Comportamiento de los SST durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Los datos del parámetro de SST se muestran en el Gráfico 4.8 para una altura de 0,60 m de material de soporte.

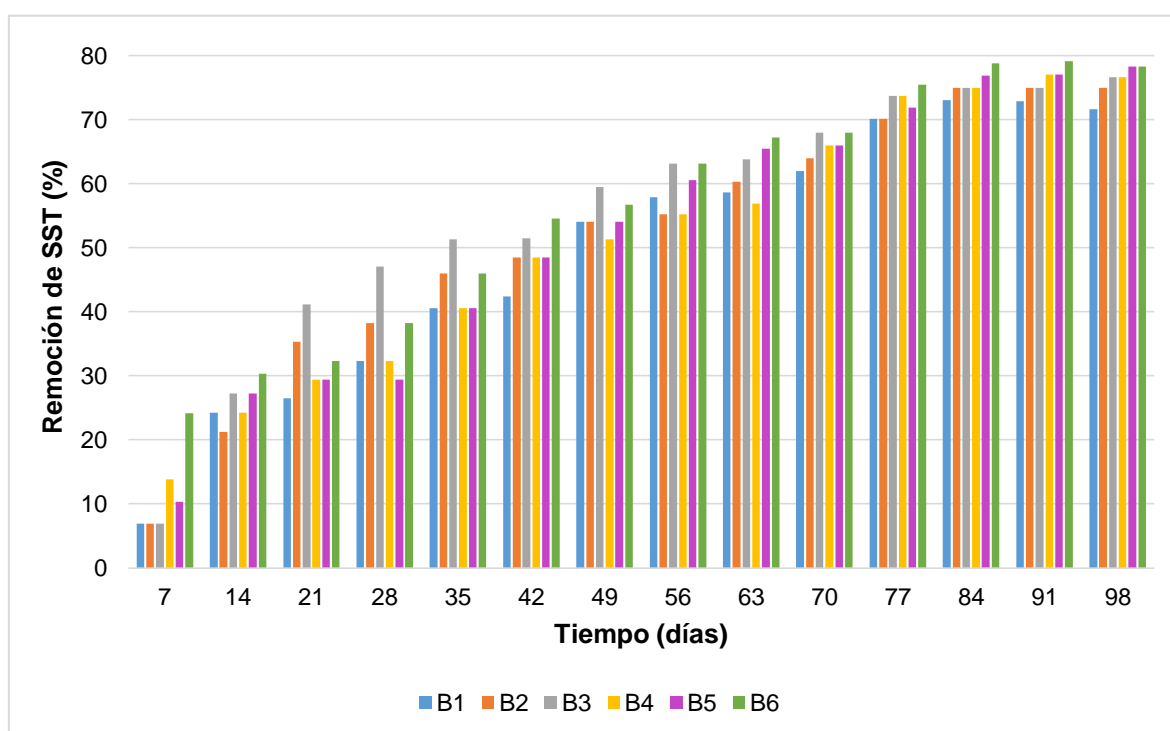
**GRÁFICO 4.8 Comportamiento de los SST durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m**



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Al día 98 de operación los biofiltros alcanzaron su mayor eficiencia, siendo éstos 72,92% en B1, 75,00 % en B2, 79,17 % en B6 y 77,08 % en B3, B4 y B5. En el tamaño de partícula que se alcanzó el mayor porcentaje de remoción promedio de SST es  $\frac{3}{8}$ " con una porosidad de  $61,82 \pm 1,76$  %, lo que permitió una retención eficiente de los sólidos suspendidos totales (Nicolai y Janni, 2001); mientras que en el tamaño de partícula de  $\frac{3}{4}$ " con una porosidad  $57,12 \pm 6,95$  % se obtuvo el menor porcentaje de remoción, respecto a los demás sistemas como se muestra en el Gráfico 4.9.

**GRÁFICO 4.9** Eficiencia de remoción de los SST en el período de experimentación



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Las eficiencias de remoción promedio obtenidas en los sistemas de biofiltración fluctúan entre 69,97 y 75,96 % como se indican en la Tabla 4.5, estas eficiencias son inferiores a las reportadas en sus estudios por Viguera-Cortés *et al.* (2013) y Sosa (2015), las cuales son del 94,4 % y 95 % respectivamente, esto se debe a que los materiales de soporte empleados en estos estudios tenían una porosidad

mayor al 80 %, lo que favorece la retención de los sólidos suspendidos totales (Nicolai y Janni, 2001).

**TABLA 4.5** Porcentajes de remoción de SST en el período de monitoreo

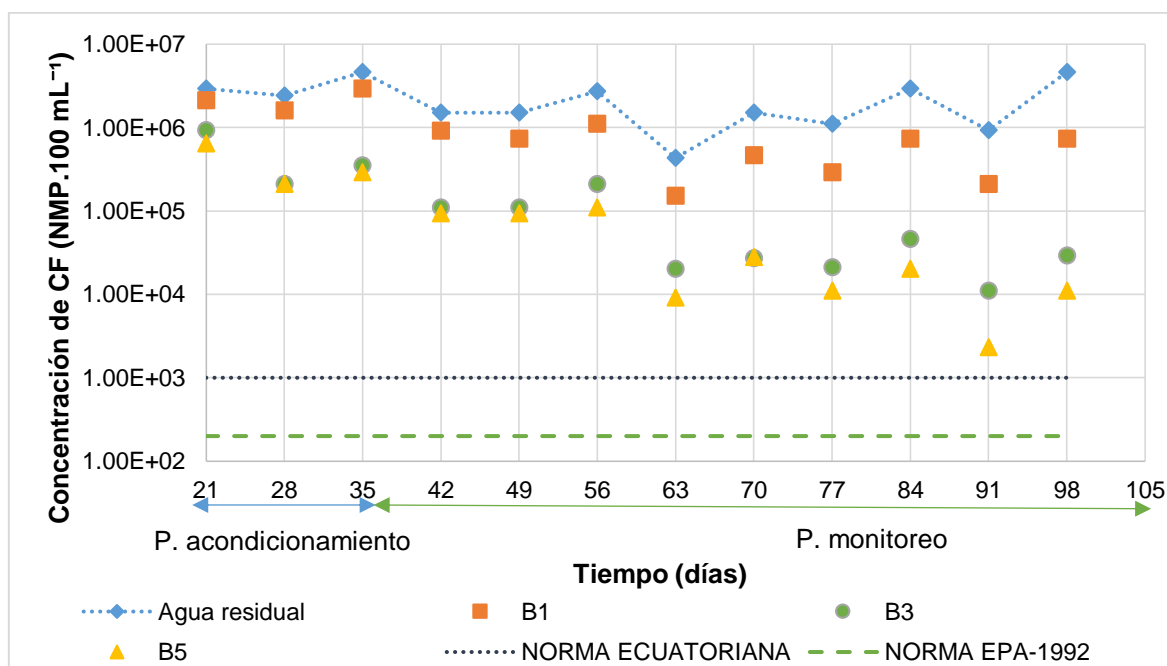
Biofiltro N°	Período de monitoreo		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
B1	42,42	72,92	69,97 ± 4,12
B2	48,48	75,00	71,84 ± 4,34
B3	51,52	76,67	73,67± 2,99
B4	48,48	77,08	73,69 ± 4,03
B5	48,48	77,08	74,05 ± 4,58
B6	54,55	79,17	75,96 ± 4,19

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

#### 4.3.4 REMOCIÓN DE CF

El comportamiento de la concentración de coliformes fecales se muestra en el Gráfico 4.10 para los biofiltros con una altura de material filtrante de 0,45 m.

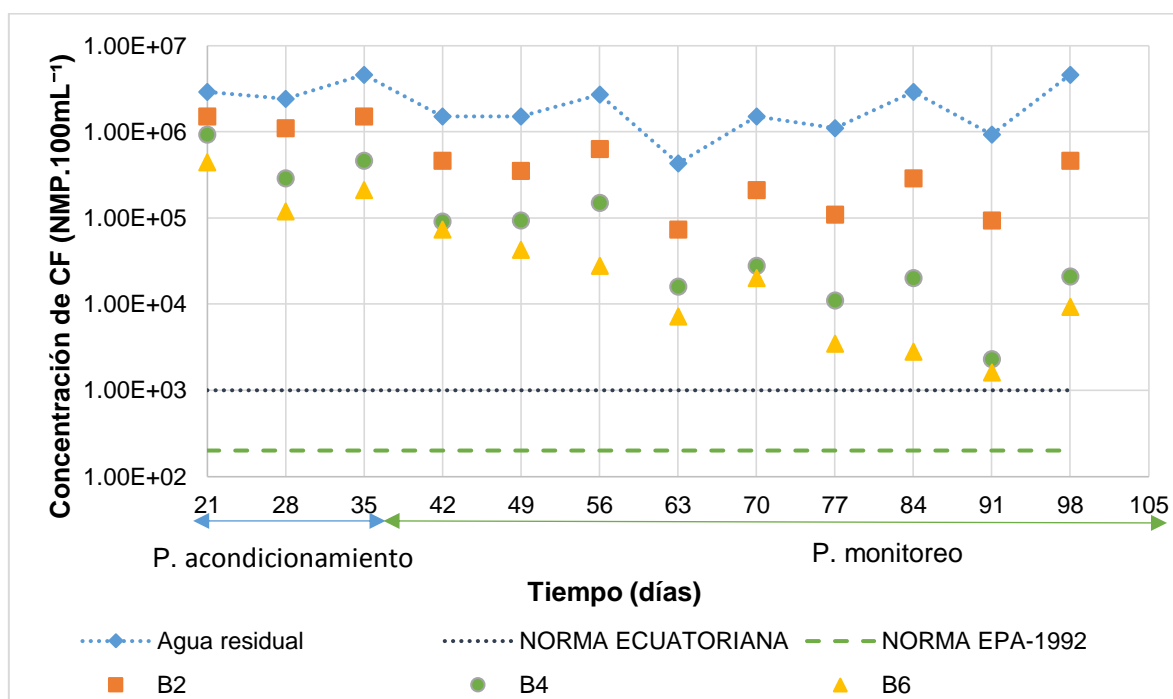
**GRÁFICO 4.10** Comportamiento de los CF durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,45 m



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

En el Gráfico 4.11 se presentan los datos de coliformes fecales para los biofiltros con una altura de 0,60 m de material, al día 21 de operación, se observó que la cantidad de estos microorganismos en los efluentes de los sistemas de biofiltración no se incrementó y continuaron disminuyendo hasta el final del período de acondicionamiento alcanzando eficiencias de 36, 96 % en B1, 67,39 % en B2, 92,39 % en B3, 90,00 % en B4, 93,70 % en B5 y 95,43 % en B6 como se muestra en el Gráfico 4.12. La remoción inicial de CF (primeros 60 días) podría estar dada por fenómenos físicos de filtración (Garzón-Zúñiga *et al.*, 2008), (Vigueras-Cortés *et al.* 2013).

**GRÁFICO 4.11 Comportamiento de los CF durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo con una altura del material filtrante de 0,60 m**



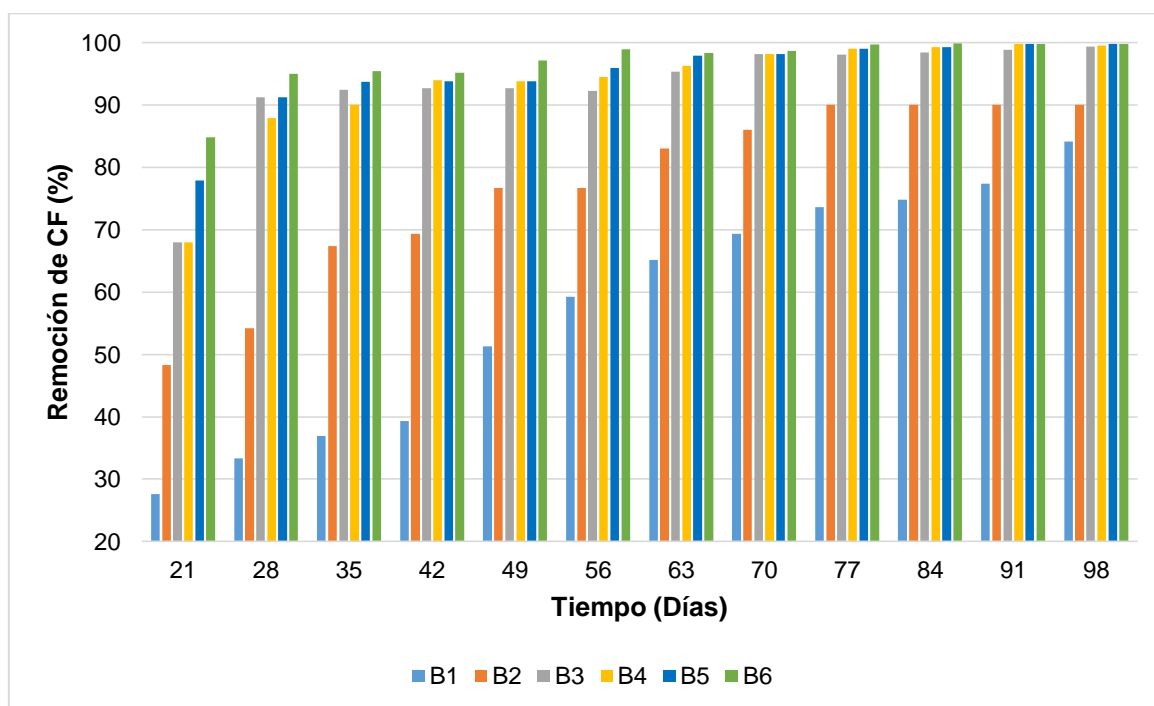
ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Al aplicar una carga hidráulica de  $0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  durante el período de acondicionamiento y monitoreo, los seis sistemas de biofiltración obtuvieron valores superiores a los establecidos en los límites máximos permisibles que establecen las guías de la EPA ( $\leq 200 \text{ NMP} \cdot 100\text{mL}^{-1}$ ) y la normativa ecuatoriana para el recurso agua de calidad ambiental y de descarga de efluentes ( $1000$

NMP.100mL<sup>-1</sup>) para el uso en el riego de cultivos, como se observa en los gráficos 4.10 y 4.11.

Durante el período de monitoreo las concentraciones de CF siguieron disminuyendo hasta el final de esta etapa, logrando eficiencias de remoción de 89,20 % en B1, 90,00 % en B2, 99,37 % en B3, 99,54 % en B4, 99,76 % en B5 y 99,80 % en B6. A partir del día 60 al 98 la eficiencia de remoción se debería principalmente a un proceso de depredación por amebas tecadas que se alimentan de bacterias de vida libre (CF) de acuerdo a Nicolai *et al.* (2001).

#### GRÁFICO 4.12 Eficiencia de remoción de las CF en el período de experimentación



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

En la Tabla 4.6 se muestran los porcentajes mínimos y máximos de las eficiencias de remoción durante el período de monitoreo, así como también la eficiencia promedio (a partir del día 70) de los sistemas de biofiltración y la unidades logarítmicas removidas por cada uno de los sistemas, misma que fluctúan entre 0,66 y 2,47.

**TABLA 4.6 Porcentaje de remoción de CF en el período de monitoreo**

Biofiltro N°	Período de monitoreo			U.log. removidas
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)	
B1	39,33	84,13	75,87 ± 4,89	0,66
B2	69,33	90,00	89,20 ± 1,60	0,98
B3	92,67	99,37	98,58 ± 0,47	1,92
B4	93,93	99,75	99,15 ± 0,57	2,13
B5	93,80	99,76	99,19 ± 0,60	2,18
B6	95,13	99,90	99,58 ± 0,46	2,47

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

U.log.=Unidades logarítmicas

El biofiltro seis alcanzó el valor más alto de remoción en unidades logarítmicas (2,47) en comparación con los demás biofiltros estudiados, este valor de remoción es superior al reportado por Viguera-Cortés *et al.* (2013) de 2 unidades logarítmicas utilizando fibra de agave como material filtrante orgánico a una carga hidráulica superficial superior, de  $0,80 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  y es un valor inferior al obtenido por Sosa (2015) de 4 unidades logarítmicas empleando mezquite con una carga hidráulica de  $1,07 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ .

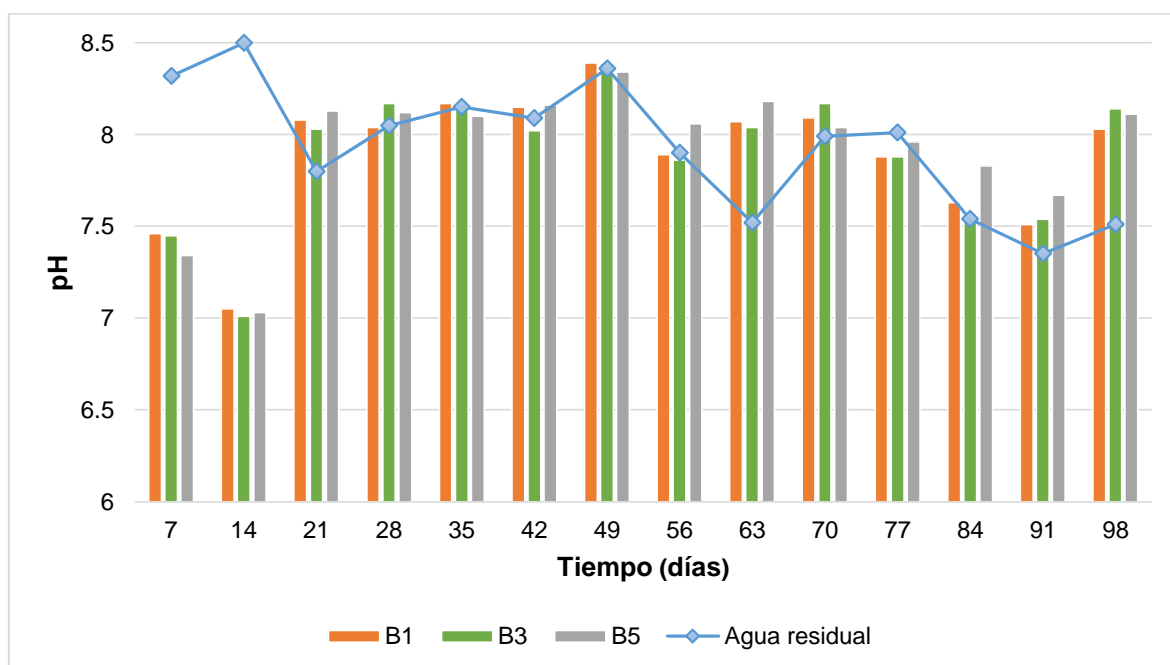
#### 4.3.5 COMPORTAMIENTO DEL pH

Los efluentes de los sistemas de biofiltración mostraron valores bajos de pH con respecto al efluente de entrada, entre 7,01 y 7,61 durante las dos primeras semanas de operación, esta disminución del pH de acuerdo a Pomar García, Díaz Rodríguez, Gonzáles Mendoza, García Fernández y Díaz Díaz (2006) posiblemente se deba a la presencia de ácidos carboxilos y fenólicos extraídos del lavado de la madera durante este período (Niemi & Niemi, 1991).

Los valores de pH promedio de los efluentes de los biofiltros fueron  $7,89 \pm 0,34$  en B1,  $7,89 \pm 0,36$  en B2,  $7,89 \pm 0,36$  en B3,  $7,91 \pm 0,34$  en B4,  $7,93 \pm 0,35$  en B5 y  $7,91 \pm 0,39$  en B6 durante el período de acondicionamiento y monitoreo. En el

Gráfico 4.13 para una altura de material filtrante de 0,45 m se presentan las mediciones de pH obtenidos durante el período de experimentación.

**GRÁFICO 4.13 Medidas de pH en el período de experimentación con una altura del material filtrante de 0,45 m**

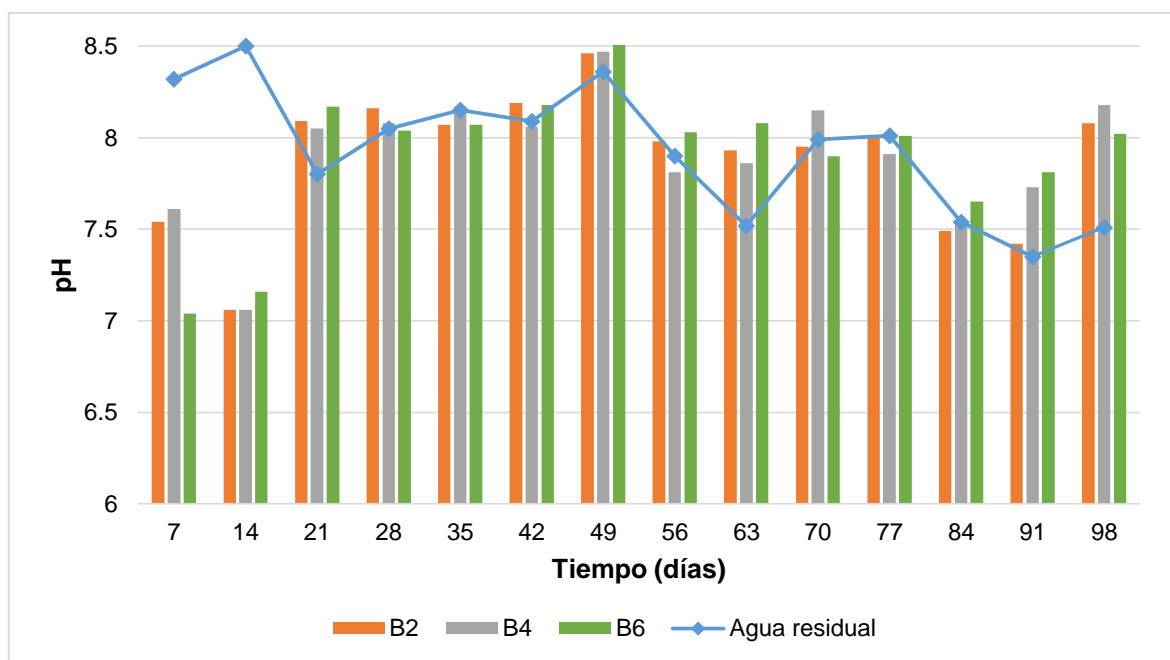


ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Los valores de pH obtenidos para los biofiltros con una altura de 0,60 m de material de soporte se muestran en el Gráfico 4.14. Los datos de pH para los seis biofiltros se mantuvieron dentro de un rango de 7,01 a 8,57 unidades en los seis sistemas, valores que se encuentran dentro del rango de 6,0 y 7,5, donde se produce la mayor actividad bacteriana (Fletcher y Floodgate, 1973), por lo tanto el pH de los efluentes de los biofiltros son adecuados para que se promueva el crecimiento y estabilización de la biopelícula en las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*), mejorando su capacidad microbiana de adsorción (Cohen, 2001).



**GRÁFICO 4.14** Medidas de pH en el período de experimentación con una altura del material filtrante de 0,60 m



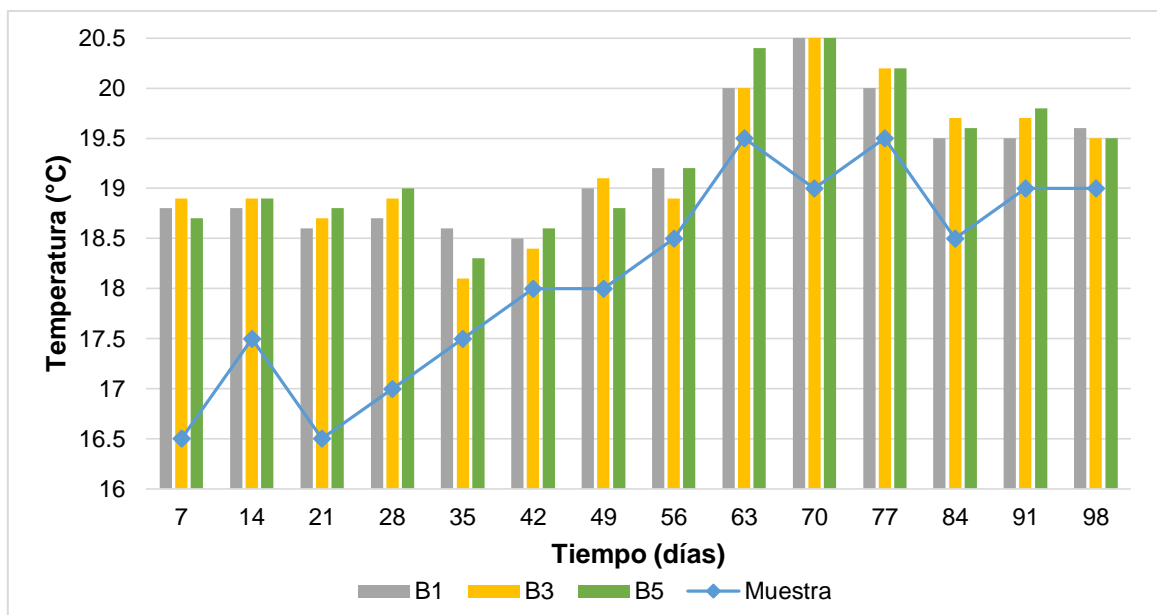
ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Los valores de pH de los seis sistemas de biofiltración durante el periodo de estabilización y monitoreo cumplen con el rango establecido en las guías de la EPA de 6,00 a 9,00 unidades.

#### 4.3.6 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA

En el Gráfico 4.15 se muestra el comportamiento de la temperatura de los sistemas de biofiltración para una altura de material filtrante de 0,45 m, mismos que se encuentran en un rango de 18,1 °C a 20,5 °C durante el periodo de acondicionamiento y monitoreo.

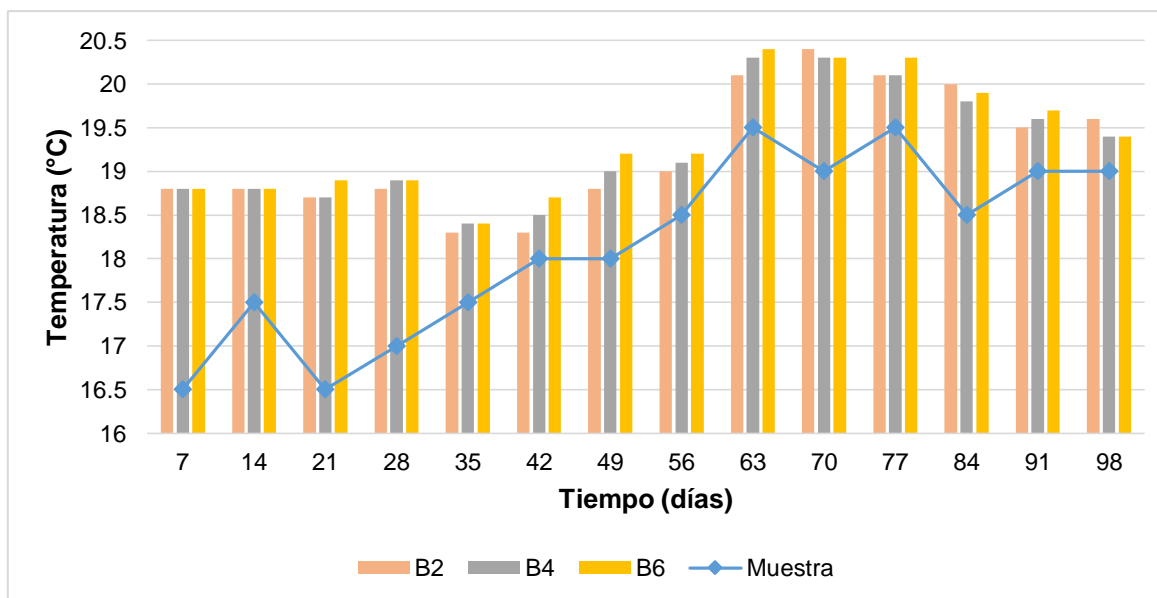
**GRÁFICO 4.15** Comportamiento de la temperatura durante el periodo experimental con una altura del material filtrante de 0,45 m



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

Los valores de temperatura de los biofiltros con una altura de material filtrante de 0,60 m fluctúan entre 18,3 y 20,4 °C como se observa en el Gráfico 4.16

**GRÁFICO 4.16** Comportamiento de la temperatura durante el periodo experimental con una altura del material filtrante de 0,60 m



ELABORACIÓN: Quijia, 2018

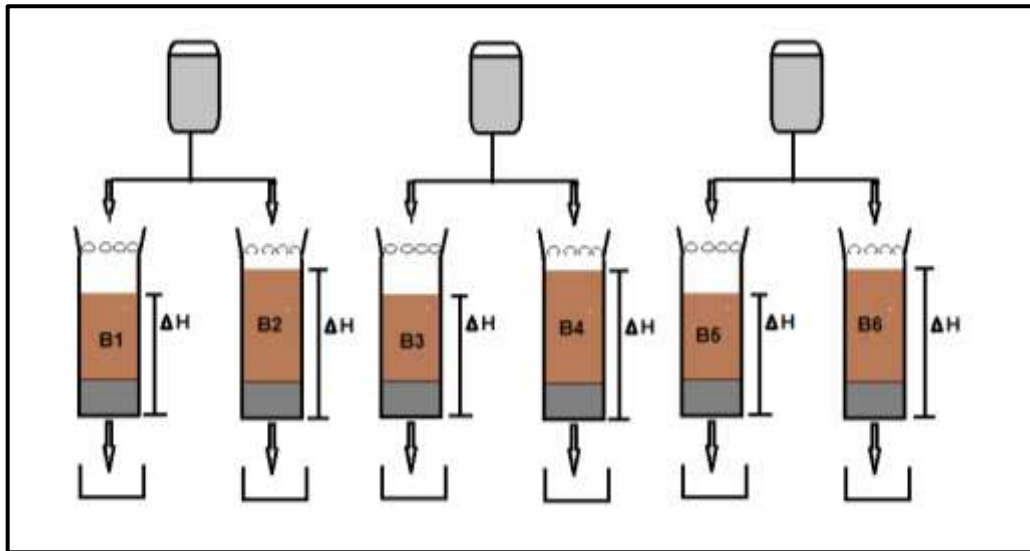
Los valores de temperatura de los seis sistemas de biofiltración se encuentran dentro del rango de 12°C a 36°C, considerado adecuado para procesos de depuración biológica, de acuerdo con Trapote (2016).

Los efluentes de los biofiltros aumentaron en relación a la temperatura de entrada en un rango de aproximadamente 0,50 a 2,30 °C, evidenciándose el mayor aumento en el día 7 y el menor el día 98.

La temperatura no influyó significativamente en la DQO, CF, DBO y SST, debido a que la mayor temperatura alcanzada en los sistemas de biofiltración es de 20,5°C y de acuerdo Vigueras-Cortés *et al.* (2013) la temperatura influye en las eficiencias de remoción cuando es mayor a 21°C.

#### **4.4 PÉRDIDA DE CARGA**

La pérdida de carga en un sistema a flujo libre es la diferencia de altura entre la entrada y la salida del agua en el lecho (Muñoz y Aldás, 2017). La pérdida de carga en los sistemas de biofiltración estudiados se mantuvo constante durante todo el periodo de experimentación como se observa en el Figura 4.2, debido a que los tamaños de partícula empleados le proporcionaron a los sistemas de biofiltración una porosidad superior al 50 %, la cual permitió una mayor cantidad de espacios vacíos por los que circuló el aire, (Sosa, 2015). La pérdida de carga para los biofiltros B1, B3, B5 fue de 0,53 m y de 0,68 m para B2, B4, B6.

**FIGURA 4.2 Pérdida de carga de los biofiltros al día 98 de operación**

ELABORACIÓN: Quijia, 2018

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización del efluente a tratar del Rio Machángara, mostró que es un agua residual altamente biodegradable, por lo que se pueden aplicar tratamientos biológicos para su depuración.
- La caracterización de las astillas de ciprés, evidenció que de acuerdo a su contenido de humedad, densidad y porosidad puede ser adecuado material filtrante (soporte para la biomasa) para ser empleado en proceso de biofiltración.
- La caracterización de los tres tamaños ( $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{8}$ ") de astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*), determinó que se tiene una porosidad superior en un tamaño de  $\frac{3}{8}$ ", lo que permitió a su vez una mayor retención de los sólidos suspendidos totales alcanzando una eficiencia de remoción promedio de  $75,96 \pm 4,19$  %.
- Al realizar los ensayos con tres diferentes tamaños de partículas ( $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{8}$ ") y dos diferentes alturas de material filtrante (0,45 y 0,60 m), se obtuvo el mayor porcentaje de remoción promedio de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF, en el biofiltro 6 empacado con una tamaño de partícula de  $\frac{3}{8}$ " y una altura de 0,60 m, dado que, este biofiltro tenía una mayor porosidad y altura de material filtrante, lo que favoreció la depuración del agua residual a tratar.
- El parámetro de temperatura durante la etapa de experimentación se mantuvo en un rango de 18,3 y 20,4 °C, debido a lo cual, no influyó en las eficiencias de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y CF.
- Los seis biofiltros operaron con un pH de rango 7,01 a 8,57 unidades, el cual fue adecuado para la formación y estabilización de la biopelícula sobre el ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y cumplen con los límites establecido en las guías de la EPA para uso en el riego agrícola en cultivos.

- Los seis biofiltros estudiados a partir del día 91 de operación presentaron valores de DBO<sub>5</sub> que cumplen con el límite establecido en las guías de USA-EPA para uso en el riego agrícola.
- A partir del día 84 de operación los seis sistemas de biofiltración presentaron concentraciones de SST que cumplen con el límite establecido en las guías de la EPA para uso en el riego agrícola.
- Las concentraciones de coliformes fecales en los efluentes de los biofiltros durante el período de estabilización y monitoreo presentaron valores por encima del límite permisible establecido en la normativa ecuatoriana y en las guías de la EPA para uso en riego agrícola, sin importar el tamaño de partícula y altura de material filtrante utilizado.
- Las astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) como material innovador para el proceso de biofiltración, no cumplieron con los límites de CF establecidos en la normativa nacional e internacional para el uso del agua residuales en el riego, por lo cual se considera a esta agua tratada no apta para esta actividad.
- Evitar la entrada de sólidos suspendidos sedimentables a los sistemas de biofiltración para evitar posibles taponamientos en los biofiltros.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el secado de las astillas de madera de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) en la estufa a 105°C, con el objetivo de obtener un material filtrante química y biológicamente inerte y de esta manera evitar reacciones entre el lecho y los microorganismos
- En posteriores estudios se sugiere hacer la identificación de la comunidad microbiana que componen la biopelícula que se estableció sobre las astillas de ciprés, con el objetivo de determinar que microorganismos son los encargados de la depuración y el tipo de sustrato que degradan (*Cupressus macrocarpa*).

- Se propone realizar análisis variando la carga hidráulica superficial para determinar cómo afecta este parámetro en la eficiencia de remoción de los biofiltros.
- Para cumplir con el límite máximo permisible para coliformes fecales establecido en la normativa nacional e internacional para el uso del agua en el riego agrícola se recomienda realizar un tratamiento posterior de desinfección para eliminar la concentración de coliformes en el agua residual.
- Para futuras investigaciones se recomienda hacer estudios con nuevos materiales filtrantes orgánicos propios o que se encuentren en el sector, para encontrar el material filtrante más eficiente para el tratamiento de esta agua residual, con la finalidad de que el efluente resultante cumpla con los parámetros establecidos en la normativa.
- Estudiar la colmatación del biofiltro generada por el crecimiento de la biomasa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango Ruiz, Á. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2).
- Arboleda Valencia, J., Soto, R., & Arnul, R. T. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua.
- Ardakanian, R. (2017). *Uso seguro de aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas*. H. Hettiarachchi (Ed.). United Nations University UNU-FLORES, Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Ressources.
- Ávila, L., Guerrón, M., Carolina, A., Flores, L., & Andrade, L. (2014). Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito, PDRQ.
- Batista, R. O., Soares, A. A., Santos, D. B. D., Bezerra, J. M., & Oliveira, A. D. F. M. (2013). Removal of suspended and total solids in biofilters operating with primary domestic sewage for reuse in agriculture. *Revista Ceres*, 60(1), 7-15.
- Buelna, G. (1994). La biofiltración en lecho orgánico: una novedosa alternativa para el tratamiento de efluentes industriales y de pequeños municipios". In *Congreso y exposición internacional de la industria del medio ambiente*.
- Buelna, G., Dubé, R., & Tremblay, M. L. (2001). Utilisation du BIOSORMD pour le traitement des effluents d'origine sanitaire: présentation de deux cas types. In *13e Colloque annuel sur l'environnement de l'ordre des ingénieurs du Québec*. Canadá.
- Buelna, G., Garzón-Zuñiga, M. A., & Moeller, G. (2011). Los biofiltros de empaque orgánicos: una alternativa simple, robusta y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Ide@s CONCYTEG*, 6(71), 540-555.
- Cabrera, J., Martínez, F., & Granada, L. (2007). Producción de Cedro Limón *Cupressus macrocarpa* Goldcrest en Morelos. Folleto Técnico 29. Secretaria de Agricultura, Ganadería. *Desarrollo rural, Pesca y Alimentación*. INIFAP. *Morelos-México*, 2-8.
- Chávez, C. H., Mora, Z. A., Cabra, J. A., Carmona, Y., Revah, S., & Gnecco, G. (2011). Biofiltración de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), utilizando bagazo de caña de



- azúcar y piedra pómez como material de soporte. *Ingeniería y Competitividad*, 5(2), 7-15.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Trussell, R. R. (1996). Standard methods for the examination of water and wastewater. *APHA, AWWA and WPCF, Washington DC*.
- Cohen, Y. (2001). Biofiltration-the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review. *Bioresource Technology*, 77(3), 257-274. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000742>
- Correa, M. A., & Sierra, J. H. (2004). Remoción integrada de materia orgánica, fósforo y nitrógeno en un sistema de filtros (biofiltros) en serie anaerobio/anóxico/aerobio en condiciones dinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (31).
- Couillard, D. (1994). The use of peat in wastewater treatment. (E.S. Ltd, Ed.) *Water Research*, 28(6), 1261-1274.
- Environmental Protection Agency/US Agency for International Development. Guidelines for water reuse. (1992). Office of Wastewater Enforcement and Compliance, Technical report No. EPA/625/R-92/004, Washington, DC.
- Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (1990). Aguas Residuales. Composición. *Universidad de Granada. Servicio de publicaciones, España*.
- FICHTNER-HIDROESTUDIOS, A. (2011). Estudios de Factibilidad del Plan de Descontaminación de los Ríos de Quito.
- Fletcher, M., & Floodgate, G. D. (1973). An electronmicroscopic demonstration of an acidic polysaccharide involved in the adhesion of a marine bacterium to solid surface. *Journal of General Microbiology*, 74(2), 325-334.
- Garzón-Zúñiga, M. A. (2004). La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de aguas residuales industriales. XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. San Juan, Puerto Rico. Agosto.
- Garzón-Zúñiga, M., & Buelna, G. (2011). Treatment of wastewater from a school in a decentralized filtration system by percolation over organic packing media. *Water Science & Technology*, 64(5), 1169-1177.

- Garzón-Zúñiga, M. A., Buelna, G., & Moeller-Chávez, G. E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 153-161.
- Garzón-Zúñiga, M. A., Tomasini-Ortiz, A. C., Moeller-Chávez, G., Hornelas-Uribe, Y., Buelna, G. & Mijaylova-Nacheva, P. (2008). Enhanced pathogen removal in on-site biofiltration systems over organic filtration materials. *Water Practice and Technology*, 3(2), 053.
- Hernández, Y. (2009). *Tratamiento de aguas residuales de la industria de síntesis de azocolorantes por medio de procesos biológicos combinados*, Universidad Autónoma de México.
- Hernández, J., Prado, Ó. J., Almarcha, M., Lafuente, J., & Gabriel, D. (2010). Development and application of a hybrid inert/organic packing material for the biofiltration of composting off-gases mimics. *Journal of hazardous materials*, 178(1-3), 665-672.
- Hernández-Muñoz, A. (1996). *Depuración de Aguas Residuales*. Servicios de publicaciones de la escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. 3ª Edición. Paraninfo. Madrid.
- Hora, D. (2016). *Ecuador: 88% de las aguas residuales llega a los ríos - La Hora*. [online] La Hora Noticias de Ecuador, sus provincias y el mundo. Recuperado de: <https://lahora.com.ec/noticia/1101997377/home>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN. (1998). Normas Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 2 169:1998. Agua, Calidad del Agua, Muestreo, Manejo y Conservación de Muestras. Quito-Ecuador. 2013. pp. 1-8.
- Kininmonth, J. A., & Whitehouse, L. J. (1991). Properties and uses of New Zealand radiata pine. (vol. I, Wood properties). New Zealand Ministry of Forestry, Forest Research Institute, Rotorua.
- Lens, P. N., Vochten, P. M., Speleers, L., & Verstraete, W. H. (1994). Direct treatment of domestic wastewater by percolation over peat, bark and woodchips. *Water Research*, 28(1), 17-26.
- Maldonado, J. M., Zuleta, C. M., Vizcaino, G. V., Yepes, S. V., Ramírez, C. J., & Rizzetto, M. S. Andrés Pastrana Arango. (2002). *Gestión para el manejo*,

- tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales: guía.* Ministerio del Medio Ambiente de Colombia. Colombia.
- Mamani Inca, W. (2016). *Estudio comparativo en el enraizado de pino limon (Cupressus macrocarpa var. Goldcrest) y chamaecyparis azul (Chamaecyparis lawsoniana var. Ellwoodii) con cuatro tipos de sustrato en camara de subirrigacion en el vivero Ekornat-Garden La Paz* (Doctoral dissertation)
- Merino, P. (2015). *Evaluación de una técnica de propagación asexual con esquejes apicales del ciprés limón (Cupressus macrocarpa) Var. Gold crest* (Doctoral dissertation, Tesis para obtener el título de Ingeniero. Universidad Técnica de Ambato. Ceballos-Ecuador. [Links]).
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de las aguas residuales Tratamiento, vertido y utilización* (Vol. I). (A. García, Ed.) Madrid, España: McGraw-Hill.
- Mihelcic, J.R. & Zimmeman, J.B. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. Primera edición. Alfaomega Grupo Editorial, S.A. de C.V. 720.
- Muñoz, M. y Aldás, M. (2017). *Sistemas de depuración de aguas residuales*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Nacheva, P. M., Chávez, G. M., Zúñiga, M. G., Bustos, C., & Orozco, Y. H. (2008). Comparison of bioreactors with different kinds of submerged packed beds for domestic wastewater treatment. *Water science and technology*, 58(1), 29-36.
- Niemi, R. M., & Niemi, J. S. (1991). Bacterial pollution of waters in pristine and agricultural lands. *Journal of Environmental Quality*, 20(3), 620-627.
- Nicolai, R. E. & Janni, K. A. (2001). Determining pressure drop through compost-woodchip biofilter media. ASAE Paper No. 014080. ASAE, St Joseph, MI, USA.
- Noyola, A., & Calderón Mólgora, C. (2000). Alternativas de tratamiento de aguas residuales.
- Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental–OEFA, F. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Perú.
- Paredes Paredes, D. A. (2016). *Biofiltración sobre cama de turba, para el tratamiento sobre agua residual proveniente del lavado de jeans* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).

- Pérez-Peña, N., Valenzuel, L., Diaz-vaz, J. E., & Ananías, R. A. (2011). Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(3), 253-266.
- Ramírez-López, E. M., Corona-Hernandez, J., Avelar-Gonzalez, F. J., Omil, F., & Thalasso, F. (2010). Biofiltration of methanol in an organic biofilter using peanut shells as medium. *Bioresource technology*, 101(1), 87-91.
- Reinoso Chisaguano, I. C. (2015). *Evaluación ambiental del río Machángara*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49.
- Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236-247.
- Rojas, R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente: Organización Mundial de la Salud*, 1-35.
- Salgot, M., & Huertas, E. (2006). Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater. *AQUARECeEVK1-CT-2002e00130*.
- SENPLADES, S. N. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017*. Quito. Recuperado de: <http://www.buenvivir.gob.ec/sistema-nacional-de-planificacion>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reusó de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2).
- Sekoulov, I., Rüdiger, A., Barz, M., & TerraVivaTec, S. L. (2009). Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales producidas por comunidades e industrias. *TerraVivaTec SL*, 1-14.
- SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental). (2007). Tecnología de biofiltros. Recuperado el 03 de marzo del 2018
- Sosa Hernández, D. B. (2015). *Uso de astillas de madera de mezquite (prosopis) en un sistema de biofiltros para tratar aguas residuales municipales* (Doctoral dissertation).

- Sosa, D., Viguera, J., & Holguín, E. (2014). La biofiltración: una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales. *Vid supra, Visión Científica*, 6(2), 56-60.
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, (64).
- Torres, P., Rodríguez, J. A., & Uribe, I. E. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*, 3(23).
- Trapote, A. (2016). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas* (Segunda ed.). Publicaciones Universitat D'Alacant.
- TULSMA. Acuerdo Ministerial No. 028 Sustitúyase El Libro VI Del Texto Unificado De Legislación Secundaria (2015). <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155123.pdf>
- Universidad Autónoma de la Ciudad México (UACM). Recuperado el 20 de mayo de 2016, de <http://desarrollo.uacm.edu.mx/sitios/pauacm/cedrolimon.html>
- US EPA (2004). Manual-Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-04/108. US Agency for International Development, Washington, DC.
- Valencia, S., & Vargas, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81-87
- Viguera Cortés, J. M. (2012). Innovación tecnológica para tratamiento de aguas residuales domésticas con biofiltros orgánicos, 146.
- Viguera-Cortés, J. M., Villanueva-Fierro, I., Garzón-Zúñiga, M. A., de Jesús Nívar-Cháidez, J., Chaires-Hernández, I., & Hernández-Rodríguez, C. (2013). Performance of a biofilter system with agave fiber filter media for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 68(3), 599-607.
- Veliz Lorenzo, E., Llanes Ocaña, J. G., Asela Fernández, L., & Bataller Venta, M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(1).
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernández, F., & Torricelli, R. (2013). Reutilización del agua en agricultura: beneficios para todos. *Informe sobre temas hidricos FAO*, 124.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FILTRANTE

En la Tabla A1-1, A1-2 y A1-3, se encuentran los valores obtenidos en laboratorio para determinar las características físicas de las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) de los diferentes tamaños de partículas empleados y un ejemplo de cálculo utilizando el caso de la astilla de ciprés de tamaño  $\frac{3}{8}$ ".

**Tabla A1.1 Características de las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) de tamaño  $\frac{3}{4}$ ".**

Características	Unidad	N° de muestra				
		1	2	3	4	5
Peso inicial (Po)	g	5,5339	6,2464	7,3238	7,6451	6,4606
Peso anhidro (Pa)	g	3,6282	4,7438	5,2140	5,1534	4,5136
Peso saturado (Ps)	g	8,0336	7,9603	8,7259	10,9643	8,1550
Contenido de Humedad (CH)	%	52,52	31,68	40,46	48,35	43,14
Densidad Aparente (Dm)	Kg/m <sup>3</sup>	535,39	751,00	753,50	561,43	684,76
Volumen de saturación (Vs)	cm <sup>3</sup>	6,78	6,32	6,92	9,18	6,59
Peso específico básico saturado (Gbs)		0,53	0,75	0,75	0,56	0,68
Peso específico de la pared celular (Gbpc)		1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Porosidad (V)	%	65,00	50,92	50,75	63,31	55,24

**Tabla A1.2 Características de las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) de tamaño  $\frac{1}{2}$ ".**

Características	Unidad	N° de muestra				
		1	2	3	4	5
Peso inicial (Po)	g	3,4674	3,0121	4,4698	3,8765	3,8785
Peso anhidro (Pa)	g	2,1938	2,1428	3,0830	2,7877	2,5659
Peso saturado (Ps)	g	4,8345	3,9838	5,8779	4,9692	4,9609

Contenido de Humedad (CH)	%	58,05	40,63	44,97	39,06	51,15
Densidad Aparente (Dm)	Kg/m <sup>3</sup>	538,41	680,67	641,04	696,31	630,12
Volumen de saturación (Vs)	cm <sup>3</sup>	4,07	3,24	4,81	4,00	4,07
Peso específico básico saturado (Gbs)		0,54	0,66	0,64	0,70	0,63
Peso específico de la pared celular (Gbpc)		1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Porosidad (V)	%	64,81	56,81	58,10	54,49	58,82

**Tabla A1.3 Características de las astillas de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) de tamaño 3/8".**

Características	Unidad	N° de muestra				
		1	2	3	4	5
Peso inicial (Po)	g	1,4235	1,6235	1,4721	1,3423	1,5895
Peso anhidro (Pa)	g	0,9803	1,0588	0,9908	0,8507	1,0559
Peso saturado (Ps)	g	1,9423	2,1970	1,9858	1,8850	2,1475
Contenido de Humedad (CH)	%	45,21	53,33	48,58	57,79	50,54
Densidad Aparente (Dm)	kg/m <sup>3</sup>	611,65	578,51	603,20	534,93	592,63
Volumen de saturación (Vs)	cm <sup>3</sup>	1,60	1,83	1,64	1,59	1,78
Peso específico básico saturado (Gbs)		0,62	0,58	0,60	0,54	0,59
Peso específico de la pared celular (Gbpc)		1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Porosidad (V)	%	60,02	62,19	60,57	65,04	61,27

Contenido de humedad

$$CH = \frac{Po - Pa}{Pa} * 100$$



$$CH_{max} = \frac{1,4235 - 0,9803}{0,9803} * 100 = 45,21 \%$$

Densidad aparente

$$Dm = \frac{1}{\frac{Ps - Pa}{Pa} + \frac{1}{Dp}}$$

Donde:

$Dp =$  constante de la densidad de la madera ( $1,53 \frac{g}{cm^3}$ )

$$Dm = \frac{1}{\frac{1,9423 - 0,9803}{0,9803} + \frac{1}{1,53}} = 611,65 \text{ kg/m}^3$$

Volumen de saturación

$$Vs = \frac{Pa}{Dp} + (Ps - Pa)$$

$$Vs = \frac{0,9803}{1,53} + (1,9423 - 0,9803) = 1,60 \text{ cm}^3$$

Peso específico básico saturado

$$Gbs = \frac{Pa}{Vs * \rho}$$

Donde:

$\rho =$  densidad del agua ( $\frac{1g}{cm^3}$ )

$$Gbs = \frac{0,9803}{1,60 * 1} = 0,61$$

Peso específico de la pared celular

$$Gbpc = \frac{Gbs}{1 - 0,01 * Gbs * CH_{max}}$$

$$Gbpc = \frac{0,61}{1 - 0,01 * 0,61 * 98,13} = 1,53$$

Porosidad

$$V = \left(1 - \frac{Gbs}{Gbp_c}\right) * 100$$

$$V = \left(1 - \frac{0,61}{1,53}\right) * 100 = 60,02 \%$$

## ANEXO 2 MEDICIONES DE DQO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	CONCENTRACIÓN DE DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>0</b>	80	-	-	-	-	-	-
<b>7</b>	88	198	121	117	177	240	201
<b>14</b>	123	170	163	159	152	170	165
<b>21</b>	86	105	103	98	101	99	103
<b>28</b>	91	108	117	111	148	104	109
<b>35</b>	137	106	93	80	93	98	82
<b>42</b>	108	66	66	61	72	60	64
<b>49</b>	146	88	86	79	82	78	80
<b>56</b>	134	79	77	68	74	70	65
<b>63</b>	243	111	130	95	104	95	92
<b>70</b>	234	102	108	88	100	93	87
<b>77</b>	254	101	99	97	94	90	89
<b>84</b>	234	93	90	85	88	81	82
<b>91</b>	192	74	72	69	65	63	64
<b>98</b>	252	105	99	100	97	91	89

### ANEXO 3 MEDICIONES DE DBO<sub>5</sub> EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	CONCENTRACIÓN DE DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	40	-	-	-	-	-	-
7	42	80	65	60	70	90	90
14	45	65	55	55	50	65	70
21	38	55	50	44	50	48	50
28	40	55	50	50	65	45	50
35	55	40	32	34	32	35	30
49	75	40	40	40	36	36	32
56	70	36	32	34	32	30	28
63	95	50	45	40	40	38	38
70	115	30	35	30	35	30	28
77	155	35	32	30	30	26	26
84	145	32	28	28	26	24	22
91	115	24	22	24	20	18	16
98	150	30	30	28	28	24	20

## ANEXO 4 MEDICIONES DE SST EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	CONCENTRACIÓN DE SST ( $mg.L^{-1}$ )						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
0	52	-	-	-	-	-	-
7	58	54	54	54	50	52	44
14	66	50	52	48	50	48	46
21	68	50	44	40	48	48	46
28	68	46	42	36	46	48	42
35	74	44	40	36	44	44	40
42	66	38	34	32	34	34	30
49	74	34	34	30	36	34	32
56	76	32	34	28	34	30	28
63	116	48	46	42	50	40	38
70	100	38	36	32	34	34	32
77	114	34	34	30	30	32	28
84	104	28	26	26	26	24	22
91	96	26	24	24	24	22	20
98	120	34	30	28	28	26	26

## ANEXO 5 MEDICIONES DE CF EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	<i>CONCENTRACIÓN DE CF (NMP.100mL<sup>-1</sup>)</i>						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>21</b>	2,90E+06	2,10E+06	1,50E+06	9,30E+05	9,30E+05	6,40E+05	4,40E+05
<b>28</b>	2,40E+06	1,60E+06	1,10E+06	2,10E+05	2,90E+05	2,10E+05	1,20E+05
<b>35</b>	4,60E+06	2,90E+06	1,50E+06	3,50E+05	4,60E+05	2,90E+05	2,10E+05
<b>42</b>	1,50E+06	9,10E+05	4,60E+05	1,10E+05	9,10E+04	9,30E+04	7,30E+04
<b>49</b>	1,50E+06	7,30E+05	3,50E+05	1,10E+05	9,30E+04	9,30E+04	4,30E+04
<b>56</b>	2,70E+06	1,10E+06	6,30E+05	2,10E+05	1,50E+05	1,10E+05	2,80E+04
<b>63</b>	4,30E+05	1,50E+05	7,30E+04	2,00E+04	1,60E+04	9,10E+03	7,20E+03
<b>70</b>	1,50E+06	4,60E+05	2,10E+05	2,70E+04	2,80E+04	2,80E+04	2,00E+04
<b>77</b>	1,10E+06	2,90E+05	1,10E+05	2,10E+04	1,10E+04	1,10E+04	3,50E+03
<b>84</b>	2,90E+06	7,30E+05	2,90E+05	4,60E+04	2,00E+04	2,00E+04	2,80E+03
<b>91</b>	9,30E+05	2,10E+05	9,30E+04	1,10E+04	2,30E+03	2,30E+03	1,60E+03
<b>98</b>	4,60E+06	7,30E+05	4,60E+05	2,90E+04	2,10E+04	1,10E+04	9,30E+03

## ANEXO 6 MEDICIONES DE pH EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	<i>pH</i>						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>0</b>	8,10	-	-	-	-	-	-
<b>7</b>	8,32	7,46	7,54	7,45	7,61	7,34	7,04
<b>14</b>	8,50	7,05	7,06	7,01	7,06	7,03	7,16
<b>21</b>	7,80	8,08	8,09	8,03	8,05	8,13	8,17
<b>28</b>	8,05	8,04	8,16	8,17	8,08	8,12	8,04
<b>35</b>	8,15	8,17	8,07	8,16	8,17	8,10	8,07
<b>42</b>	8,09	8,15	8,19	8,02	8,06	8,16	8,18
<b>49</b>	8,36	8,39	8,46	8,39	8,47	8,34	8,57
<b>56</b>	7,90	7,89	7,98	7,86	7,81	8,06	8,03
<b>63</b>	7,52	8,07	7,93	8,04	7,86	8,18	8,08
<b>70</b>	7,99	8,09	7,95	8,17	8,15	8,04	7,90
<b>77</b>	8,01	7,88	8,01	7,88	7,91	7,96	8,01
<b>84</b>	7,54	7,63	7,49	7,56	7,54	7,83	7,65
<b>91</b>	7,35	7,51	7,42	7,54	7,73	7,67	7,81
<b>98</b>	7,51	8,03	8,08	8,14	8,18	8,11	8,02

## ANEXO 7 MEDICIONES DE TEMPERATURA EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Día de operación	<i>TEMPERATURA (°C)</i>						
	Agua residual	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>0</b>	17,0	-	-	-	-	-	-
<b>7</b>	16,5	18,8	18,8	18,9	18,8	18,7	18,8
<b>14</b>	17,5	18,8	18,8	18,9	18,8	18,9	18,8
<b>21</b>	16,5	18,6	18,7	18,7	18,7	18,8	18,9
<b>28</b>	17,0	18,7	18,8	18,9	18,9	19,0	18,9
<b>35</b>	17,5	18,6	18,3	18,1	18,4	18,3	18,4
<b>42</b>	18,0	18,5	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7
<b>49</b>	18,0	19,0	18,8	19,1	19,0	18,8	19,2
<b>56</b>	18,5	19,2	19,0	18,9	19,1	19,2	19,2
<b>63</b>	19,5	20,0	20,1	20,0	20,3	20,4	20,4
<b>70</b>	19,0	20,5	20,4	20,5	20,3	20,5	20,3
<b>77</b>	19,5	20,0	20,1	20,2	20,1	20,2	20,3
<b>84</b>	18,5	19,5	20,0	19,7	19,8	19,6	19,9
<b>91</b>	19,0	19,5	19,5	19,7	19,6	19,8	19,7
<b>98</b>	19,0	19,6	19,6	19,5	19,4	19,5	19,4