



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN HIDRÁULICA Y LA REMOCIÓN DE  
CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA MEDIANTE UN LECHO  
FILTRANTE DE MUSA PARADISIACA”**

**Autor: Elvis Gribaldo Aucancela Rivera**

**TUTOR: Dr. Ana Mejía**

**Riobamba – Ecuador**

**AÑO**

**2018**

## CERIFICACIÓN DEL TRIBUNAL

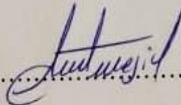
Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación título: **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN HIDRÁULICA Y LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA MEDIANTE UN LECHO FILTRANTE DE MUSA PARADISIACA”**. Presentado por: Elvis Gribaldo Aucancela Rivera y dirigida por: Dra. Anita Mejía.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, se constató el cumplimiento de las observaciones realizadas y se remite el presente para uso y custodia en la biblioteca de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firma:

Dra. Anita Mejía.

Tutora del Proyecto.

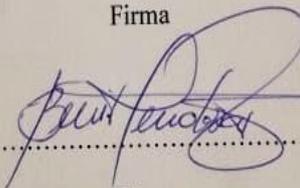


.....

Firma

Ing. Benito Mendoza PhD.

Miembro del Tribunal.

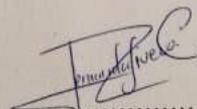


.....

Firma

Ing. María Fernanda Rivera

Miembro del Tribunal.

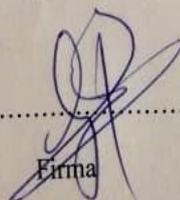


.....

Firma

Msc. Patricio Santillán.

Presidente del Tribunal.



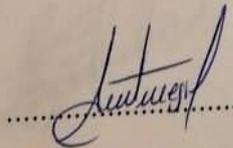
.....

Firma

### DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención de grado de Ingeniero Ambiental, elaborado por el señor Elvis Gribaldo Aucancela Rivera con el tema: **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN HIDRÁULICA Y LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA MEDIANTE UN LECHO FILTRANTE DE MUSA PARADISIACA”**, fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutor y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que puedo informar en honor a la verdad.



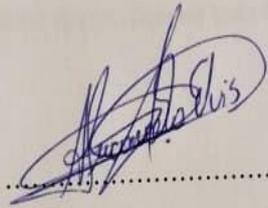
Dra. Anita Mejía

C.I. 0601948813

### AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

Yo, Elvis Gribaldo Aucancela Rivera con cédula de identidad N° 060394627-8; hago referencia como autores del presente trabajo de investigación, titulada: **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN HIDRÁULICA Y LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA MEDIANTE UN LECHO FILTRANTE DE MUSA PARADISIACA”**, dirigida por el tutor del proyecto, Dra. Anita Mejía.

En virtud de ello, manifestamos la originalidad de la conceptualización del trabajo, datos obtenidos, interpretación de resultados, y la elaboración de conclusiones, con el aporte de varios autores que se han referenciado apropiadamente en el contenido del documento.



Elvis Gribaldo Aucancela Rivera

C.I. 0603946278

## **AGRADECIMIENTO.**

Mi agradecimiento más profundo a la Facultad de Ingeniería, a la Carrera de Ingeniería Ambiental y a sus Docentes por formarme como profesional a lo largo de mi periodo como estudiante en esta querida alma mater.

A la Doctora Anita Mejía directora del proyecto de Investigación por brindarme sus conocimientos, confianza y sobre todo la oportunidad para la realización de este trabajo. Agradezco a los miembros del tribunal de tesis: al Ing. Benito Mendoza PhD y a la Ing. María Fernanda Rivera por brindarme su tan valioso tiempo, por su excelente orientación, dirección y todos los consejos que me permitieron alcanzar los objetivos de este trabajo.

Finalmente al personal del LSA (Laboratorio de Servicio Ambientales) de la Facultad de Ingeniería por el completo apoyo durante toda la fase de experimentación gracias totales.

*Elvis Aucancela Rivera*

## **DEDICATORIA.**

A Dios, por haberme dado la vida y por su fidelidad incondicional. A mis padres, Luis Aucancela y Alba Rivera por todo el esfuerzo realizado y valores brindados de responsabilidad, respeto, superación y humildad. A mi hermano, Jairo Aucancela por su ejemplo otorgado como humano y profesional. A mi sobrina, Noemí Aucancela, por convertirse en mi pequeña bendición y motor de vida.

Y especialmente a mi hermano Gustavo Aucancela que a pesar de su inesperada partida al más allá, siempre fue, es y será mi más grande inspiración, por ti, por nuestros sueños y tu legado hermano “*Caminante no hay camino, se hace camino al andar*”.

*Elvis Aucancela Rivera*

## **SIGLAS Y ABREVIACIONES.**

**pH.** Potencial de Hidrógeno.

**DQO.** Demanda química de oxígeno.

**DBO.** Demanda biológica de oxígeno.

**CaCl<sub>2</sub>.** Cloruro de calcio.

**Cr<sup>+6</sup>.** Cromo Hexavalente

**Cu.** Cobre

**%m/v.** Porcentaje masa volumen

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
SIGLAS Y ABREVIACIONES.....	vii
1. RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. Contaminación de ríos por aguas residuales de las industrias textiles.....	6
3.2. Características de las aguas residuales de las industrias textiles.....	6
3.3. Los Colorantes en la industria textil.....	7
3.4. Límites permisibles de descargas a un cuerpo de agua dulce.....	8
3.5. La Bioadsorción como una alternativa de solución.....	9
3.5.1. Fundamentos fisicoquímicos de la Bioadsorción.....	9
3.5.2. Variables que afectan al fenómeno de la bioadsorción.....	10
3.6. Tratamiento de aguas residuales con fibras vegetales (Bioadsorbentes).....	11
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1. Caracterización de la fibra natural <i>musa paradisiaca</i> .....	13
4.2. Elaboración del agua residual sintética.....	14
4.3. Caracterización del agua residual sintética.....	14
4.4. Aplicación de la fibra natural como lecho filtrante.....	15

4.5.	Caracterización del agua tratada.....	16
4.6.	Análisis Estadístico. ....	16
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....	18
5.1.	Caracterización de la fibra <i>musa paradisiaca</i> .....	18
5.2.	Elaboración y caracterización del agua residual sintética. ....	19
5.3.	Porcentaje de remoción de contaminantes por el lecho filtrante. ....	19
5.3.1.	Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración alta de color. ....	20
5.3.2.	Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración media de color. ....	21
5.3.3.	Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color.....	23
5.3.4.	Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color con prelavado de la fibra.....	24
5.4.	Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores.....	26
5.5.	Determinación de la correlación entre la remoción del contaminante vs las permeabilidad y velocidad de flujo. ....	28
5.6.	Determinación de los mejores tratamientos para la remoción de contaminantes. ....	31
6.	CONCLUSIONES. ....	36
7.	RECOMENDACIONES. ....	37
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	38
9.	ANEXOS.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.</b> Estructura generalizada de un colorante azoico. Fuente: (Kiran, 2011) .....	7
<b>Figura 2.</b> Diseño experimental y abreviaturas de cada una de la pruebas de tratabilidad. ....	16
<b>Figura 3.</b> Agua residual sintética. ....	19
<b>Figura 4.</b> Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración alta de color.....	21
<b>Figura 5.</b> Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración media de color.....	23
<b>Figura 6.</b> Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración baja de color.....	24
<b>Figura 7.</b> Muestra inicial y final del lavado de la fibra antes del tratamiento. ....	25
<b>Figura 8.</b> Muestra inicial y final del lavado de la fibra antes del tratamiento .....	26
<b>Figura 9.</b> Mejores tratamientos para la remoción de pH.....	31
<b>Figura 10.</b> Mejores tratamientos para la remoción de conductividad.....	32
<b>Figura 11.</b> Mejores tratamientos para la remoción de color. ....	32
<b>Figura 12.</b> Mejores tratamientos para la remoción de DQO.....	33
<b>Figura 13.</b> Mejores tratamientos para la remoción de Cr <sup>+6</sup> .....	34
<b>Figura 14.</b> Mejores tratamientos para la remoción de Cu.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Contribución de los principales sectores industriales a la contaminación del agua a nivel mundial. ....	6
<b>Tabla 2.</b> Características propiedades generales del colorante azul BRL. ....	8
<b>Tabla 3.</b> Límites permisibles de descargas a un cuerpo de agua dulce. ....	8
<b>Tabla 4.</b> Descripción de los procesos para la caracterización de la fibra <b>musa paradisiaca</b> . ....	13
<b>Tabla 5.</b> Preparación agua residual sintética. ....	14
<b>Tabla 6.</b> Procedimientos para el análisis de color, DQO, Cr <sup>+6</sup> y Cu en el espectrofotómetro HACH DR500 ....	15
<b>Tabla 7.</b> Caracterización Físico – Química de la fibra <b>musa paradisiaca</b> . ....	18
<b>Tabla 8.</b> Caracterización Hidráulica de la fibra <b>musa paradisiaca</b> . ....	18
<b>Tabla 9.</b> Caracterización agua residual sintética concentración alta, media y baja. ....	19
<b>Tabla 10.</b> Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración alta de color. ....	20
<b>Tabla 11.</b> Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración media de color. ....	22
<b>Tabla 12.</b> Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color. ....	23
<b>Tabla 13.</b> Valores conductividad, color y DQO con los que aporta la fibra. ....	24
<b>Tabla 14.</b> Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color con el prelavado de la fibra. ....	25
<b>Tabla 15.</b> Resumen prueba de ANOVA de dos factores. ....	27
<b>Tabla 16.</b> Resumen coeficientes de correlación obtenidos. ....	29

<b>Tabla 17.</b> Mejores tratamientos para la remoción de pH .....	31
<b>Tabla 18.</b> Mejores tratamientos para la remoción de conductividad. ....	31
<b>Tabla 19.</b> Mejores tratamientos para la remoción de color .....	32
<b>Tabla 20.</b> Mejores tratamientos para la remoción de DQO .....	33
<b>Tabla 21.</b> Mejores tratamientos para la remoción de Cr <sup>+6</sup> . ....	34
<b>Tabla 22.</b> Mejores tratamientos para la remoción de Cu. ....	35

## 1. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue tratar agua residual sintética utilizando el colorante azul BRL de concentraciones altas, medias y bajas de color con características similares a la de una industria textil, para determinar la correlación entre velocidad de flujo, permeabilidad y remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , Cu, DQO y color utilizando lecho filtrante de *musa paradisiaca*. Estableciendo pruebas de tratabilidad de 180 minutos para cada concentración utilizando 4 diferentes permeabilidades y aplicando a cada una de ellas 3 diferentes velocidades de flujo. De los resultados obtenidos se determinó que las variables velocidad de flujo y la permeabilidad sí están correlacionadas con la remoción del color, DQO y  $\text{Cr}^{+6}$ . Así para la variable permeabilidad la correlación es inversamente proporcional. Para velocidad el color y DQO la correlación es directamente proporcional e inversamente proporcional para el  $\text{Cr}^{+6}$ . El mejor tratamiento fue al utilizar fibra de 1 centímetro y velocidad de flujo alta en el cual se removió 77,92% y 70,01% para color y DQO respectivamente. Para el  $\text{Cr}^{+6}$  el mejor tratamiento fue fibra a 1 centímetro y velocidad de flujo baja removiendo hasta en un 80 % la concentración de este contaminante y para el Cu el mejor tratamiento fue el de fibra a tres centímetro y velocidad de flujo baja removiendo hasta un 88,69%. Comprobando así que el lecho filtrante de *musa paradisiaca* es eficaz para la remoción de estos contaminantes.

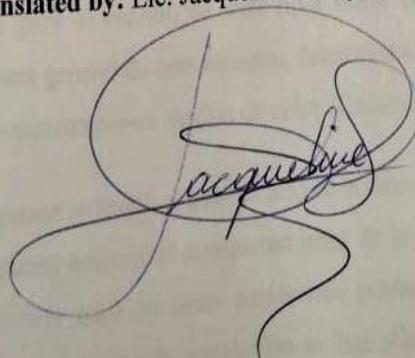
**Palabras claves:** Bioadsorción, lecho filtrante, *musa paradisiaca*

### Abstract

The objective of this work was to treat synthetic wastewater by using the BRL blue dye under high, medium and low color concentrations with similar characteristics of a textile industry for determining the correlation between flow velocity, permeability and removal of  $\text{Cr}^{+6}$ , Cu, COD, and color using filter bed of **musa paradisiaca**. Establishing treatability tests of 180 minutes for each concentration, using 4 different permeabilities and applying to each of them 3 different flow velocities. From the obtained results, it was determined that the variables of flow velocity and permeability are correlated with color removal, COD and  $\text{Cr}^{+6}$ . Thus for the variable permeability of correlation is inversely proportional. For speed the color and COD, the correlation is directly proportional and inversely proportional for the  $\text{Cr}^{+6}$ . The best treatment was by using fiber of 1 centimeter and high flow velocity in which 77.92%, and 70.01% were removed for color and COD respectively. For  $\text{Cr}^{+6}$  the best treatment was fiber at 1 centimeter and low flow velocity removing up to 80% the concentration of this pollutant and for Cu the best treatment was fiber at three centimeters and low flow rate stirred up to 88.69%. Proving that the filter bed of **musa paradisiaca** is effective for the removal of these pollutants.

**Keywords:** Bioadsorption, filter bed, **musa paradisiaca**

**Reviewed and translated by:** Lic. Jacqueline Armijos, MsC.



## 1. INTRODUCCIÓN.

Las aguas residuales provenientes de las industrias textiles son, desde hace muchos años, tema de estudio debido a la problemática ambiental, pues presentan un elevado valor de demanda biológica de oxígeno (DBO) y de demanda química de oxígeno (DQO) que son vertidas a temperaturas elevadas y pueden llegar a presentar metales pesados y otras sustancias químicas complejas amenazando el entorno en donde son descargadas (Yonni, Fasoli, Giaii, & Álvarez, 2008).

El impacto ambiental generado por estas sustancias toxicas ha llevado a la comunidad científica a desarrollar diferentes métodos para el tratamiento de los efluentes industriales como: precipitación, oxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana y recuperación por evaporación. Sin embargo, estos métodos han resultado bastante costosos, además de la formación, disposición y almacenamientos de lodos y desechos, originados durante los procesos, lo cual se convierte en un problema mayor a resolver (Sala, y otros, 2010).

Debido a esto los procesos de bioadsorción surgen como alternativa para el tratamiento de los efluentes producidos por la industria textil usando como sorbente diferentes materiales de origen biológico que son de bajo costo y se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación biosorbente no es un proceso costoso dando un tratamiento a los desechos agrícolas que antes no tenían ninguna utilidad.

El presente trabajo es una continuación a la investigación realizada anteriormente en la Universidad Nacional de Chimborazo con el nombre “Análisis de la fibra obtenida del raquis de la planta *musa paradisiaca*, utilizada como lecho filtrante en la adsorción del parámetro color presente en las aguas residuales de la hilandería Guijarro” en donde se sientan las bases para el estudio de esta fibra como contribución a solucionar el problema de manera general de este efluente, determinando una remoción de color de hasta el 67% en concentraciones medias de color (Cuadrado, 2017).

Pero esta investigación se limitó al análisis solo de la remoción del parámetro color por lo que fue importante analizar el comportamiento de la fibra utilizanda como lecho filtrante para remover también otros parámetros presentes en aguas residuales de industrias textiles, y determinar la correlación de flujo y la permeabilidad, sin embargo

para controlar estas velocidades se utilizó agua sintética que simule las condiciones de las aguas residuales provenientes de industrias textiles.

Dentro de esta línea de investigación, el trabajo tuvo como objetivo tratar una agua sintética preparada a partir del colorante azul BRL con características similares a la de una industria textil, para determinar la correlación entre la velocidad de flujo, la permeabilidad, la remoción de metales pesados (Cromo Hexavalente y Cobre), demanda química de oxígeno (DQO) y color utilizando un lecho filtrante con fibra de *musa paradisiaca*, para que en futuros estudios se pueda determinar la factibilidad de la implementación real de la fibra a nivel de las Industrias Textiles en base a los resultados obtenidos en esta investigación.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL.**

Obtener la correlación entre la velocidad de flujo, la permeabilidad, la remoción de metales pesados (Cromo Hexavalente y Cobre), demanda química de oxígeno (DQO) y el color en agua sintética, mediante un lecho filtrante con fibra de musa paradisiaca, como alternativa de tratamiento a las aguas residuales procedentes de este tipo de industrias.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Elaborar y caracterizar el agua sintética de producción textil.
- Determinar el porcentaje de remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ), cobre (Cu), demanda química de oxígeno (DQO) y Color en agua de producción textil sintética.
- Determinar la correlación que existe entre la velocidad de flujo y la permeabilidad con respecto a la remoción de contaminantes.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Contaminación de ríos por aguas residuales de las industrias textiles.

La industria textil a nivel mundial, es causante de la contaminación ambiental de cuencas y microcuencas mediante la producción de aguas residuales en gran volumen con colorantes procedentes de los procesos industriales. Los colorantes textiles tienen gran persistencia en el ambiente haciendo difícil su tratamiento y la auto regeneración de los cuerpos hídricos (Collaguazo., 2013). Las aguas residuales de la industria textil son consideradas una de las primeras industrias que produce contaminación a los medios acuáticos. Estas aguas son consideradas altamente tóxicas por la concentración de químicos se encuentran en los tintes y en los acabados de producto (Salazar, 2009).

Las industrias textiles, de alimentos, bebidas y papel son las que contribuyen en mayor porcentaje a la contaminación del recurso hídrico. En la Tabla 1 se presenta en forma comparativa el porcentaje de contaminación que aporta cada una de estos sectores productivos; el 14,6 % de la contaminación industrial de agua, a nivel mundial, se encuentra asociada con la industria textil. Estas cifras están referidas a países denominados de rentas bajas y medias, ubicados en Asia, América Latina, Medio Oriente, Norte de África y Caribe (ONUUDI, 2003).

**Tabla 1.** Contribución de los principales sectores industriales a la contaminación del agua a nivel mundial.

<b>Industria</b>	<b>Porcentaje de contaminación (%)</b>
<b>Alimentación</b>	54,0
<b>Textiles</b>	<b>14,6</b>
<b>Pulpa y papel</b>	10,1
<b>Productos químicos</b>	7,2
<b>Metales</b>	6,7
<b>Madera</b>	5,0

Fuente: (ONUUDI, 2003)

#### 3.2. Características de las aguas residuales de las industrias textiles.

La industria textil tiene un consumo masivo de agua en la realización de procesos del lavado de la materia prima y tinturado, en estos procesos originan grandes cantidades de agua residual vertida directamente a los ecosistemas hídricos. El efluente textil tiene alta concentración de color, DBO, DQO, pH, metales pesados, conductividad entre otros parámetros, que causan cambios en los cuerpos de agua y degradación en los

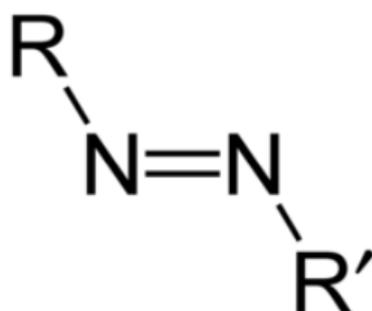
sistemas de drenajes de las ciudades el tratamiento del agua residual depende de las características físicas, químicas y microbiológicas que estén presentes en la misma. (Romero, 2015).

### 3.3. Los Colorantes en la industria textil.

Uno de los indicadores más relevantes de la contaminación del agua es el color, este parámetro se asocia principalmente con la industria textil que emplea diversidad de colorantes (CEPIS, 2004). Los colorantes son compuestos generalmente orgánicos que tienen la capacidad de impartir color a fibras de diversos orígenes, ya sea textil, como también cuero, papel, plástico e incluso alimentos (Yagub, Sen, Afroze, & Ang, 2014). Para que una sustancia funcione como colorante debe poseer un color adecuado, capacidad de fijación al tejido, resistencia a la acción del agua. Existe más de 100000 tipos de colorantes disponibles comercialmente, y se estima que anualmente se producen alrededor de 7000 tintes nuevos (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

- **Colorantes Azoicos.**

Los colorantes azoicos constituyen la clase de mayor importancia dentro del grupo de colorantes empleados en la industria textil. Sus propiedades físico químicas se encuentran íntimamente relacionadas con la tautomería que presentan. Esta propiedad confiere las características de resistencia a la luz, diferentes perfiles toxicológicos y diferentes capacidades de tinción (Hunger, 2003). Los colorantes azoicos son sustancias orgánicas coloreadas, que deben esta propiedad a la presencia de uno o más grupos azo. El grupo azo está constituido por dos átomos de nitrógeno, con hibridación  $sp^2$ , unidos mediante un doble enlace (Kiran, 2011) . Como se puede observar en la figura 1.



**Figura 1.** Estructura generalizada de un colorante azoico. Fuente: (Kiran, 2011)

Los colorantes azoicos para la industria textil, en función de la forma de aplicación, son en su mayoría colorantes directos, pero la clasificación general para los colorantes azoicos se realiza respecto al número de grupos azo. Estos colorantes en función del número de grupos funcionales son mono, di o tri-azoicos y los que contienen más de tres grupos azoicos se denominan poliazoicos (Sharma & Sanghi, 2012).

- **Colorante Azul Brl.**

El colorante azul brl es un colorante de tipo diazoico es decir que posee 2 grupos azo en su composición y cuyas características y propiedades generales se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características propiedades generales del colorante azul BRL.

<b>Nombre comercial del colorante.</b>	<b>Tipo de colorante</b>	<b>Fórmula Molecular</b>	<b>Peso molecular (g/mol)</b>
<b>Azul BRL (Azul Directo 1)</b>	Diazoico	$C_{34}H_{24}N_6Na_4O_{16}S_4$	992.82

Fuente: (Gordón, 2015)

### 3.4. Límites permisibles de descargas a un cuerpo de agua dulce

La legislación ecuatoriana estipula algunos de los límites permisibles para descargas de aguas residuales hacia cuerpos hidricos que deben ser tomados en cuenta al momento de establecer algún tipo de tratamiento para las mismas. A continuación, presentamos los límites permisibles para los metales pesados Cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ) y Cobre (Cu), la demanda química de Oxígeno y el color en la tabla 3.

**Tabla 3.** Límites permisibles de descargas a un cuerpo de agua dulce.

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades de medida</b>	<b>Valor</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	D.Q.O.	mg/l	250
<b>Cromo</b>	$Cr^{+6}$	mg/l	0,5
<b>Cobre</b>	Cu	mg/l	1,0
<b>Color real</b>	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20

Fuente: (MAE, 2015) Valores tomados del anexo N° 01, libro VI del TULSMA.

### **3.5. La Bioadsorción como una alternativa de solución**

La bioadsorción es un proceso físico - químico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones. Este método poco convencional busca principalmente la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como sorbente diferentes materiales de origen biológico (vivo o muerto), tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros. Estos materiales son de bajo costo y se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación biosorbente no es un proceso costoso (Tejada, Villabona, & Garcés, 2015).

El proceso de bioadsorción involucra una fase sólida (biomasa) y una fase líquida (agua) que contiene disueltos la sustancia de interés que será adsorbida (en este caso, los iones de los metales pesados). Para que el proceso de bioadsorción se pueda realizar con éxito, debe existir una gran afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y el contaminante, ya que el fenómeno de bioadsorción de iones metálicos, usando materiales biológicos como adsorbentes, se puede realizar mediante diversos mecanismos fisicoquímicos y metabólicos en los cuales, el proceso de captación de los metales pesados puede diferir (Gautam, Mudhoo, Lofrano, & Chattopadhyaya, 2014).

#### **3.5.1. Fundamentos fisicoquímicos de la Bioadsorción**

En general, la extracción de metales mediante biomasa residual se atribuye a sus proteínas, carbohidratos y componentes fenólicos que contienen grupos carboxilo, hidroxilo, sulfatos, fosfatos y amino, los cuales presentan gran afinidad por los iones metálicos, facilitando su captación (Tejada, Villabona, & Garcés, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

Cabe distinguir tres clases de adsorción según el tipo de atracción que se dé entre el soluto y el adsorbente. Si la adsorción se da por el intercambio iónico en el cual, los iones de una sustancia de interés se concentran en una superficie del material adsorbente como resultado de la atracción electrostática entre ambos, se dice que la adsorción es de tipo eléctrico. Sin embargo, si la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase, se dice que la adsorción es debido a las fuerzas de Van der Waals o también llamada fisisorción. Dicho sea de paso, si el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en

los centros activos del adsorbente, se puede decir que la adsorción tiene naturaleza química. Cabe resaltar que en la fisisorción, la especie adsorbida conserva su naturaleza química, mientras que durante la quimisorción, la especie adsorbida sufre una transformación dando lugar a una especie distinta (Appelo & Postma, 2005).

### **3.5.2. Variables que afectan al fenómeno de la bioadsorción.**

- **Efecto de la temperatura**

Un aumento elevado de la temperatura puede causar un cambio en la textura del sorbente y un deterioro del material que desembocan en una pérdida de capacidad de sorción (Tejada, Villabona, & Garcés, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

- **Efecto del pH**

El pH de la solución acuosa es un importante parámetro que controla los procesos de adsorción de metales en diferentes adsorbentes, debido al hecho, de que los iones hidrógeno se constituyen en un adsorbato fuertemente competitivo. La adsorción de iones metálicos depende tanto de la naturaleza de la superficie adsorbente como de la distribución de las especies químicas del metal en la solución acuosa. El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1,5 y 4 (Tapia, y otros, 2011).

- **Efecto del tamaño de partícula**

La adsorción tiene lugar fundamentalmente en el interior de las partículas, sobre las paredes de los poros en puntos específicos. La cantidad de adsorbato (solute) que se puede adsorber es directamente proporcional al volumen, y es bien conocido que este volumen es directamente proporcional al área externa y también que una partícula pequeña tiene mayor área superficial, o sea mayor área de la superficie interna por su cantidad de poros por unidad de masa (Tejada, Villabona, & Garcés, 2015).

- **Presencia de otros iones**

La presencia de iones en la disolución hace que estos puedan competir con el metal en el interés de las zonas de sorción (Tejada, Villabona, & Garcés, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

### **3.6. Tratamiento de aguas residuales con fibras vegetales (Bioadsorbentes).**

Las aguas residuales derivadas de la industria textil son estudiadas hace mucho tiempo por el problema ambiental que causa a los cuerpos hídricos, para ello se han desarrollado bio procesos como una alternativa económica para este tipo de agua residuales. Entre las investigaciones a resaltar están:

- **Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II).**

En el presente trabajo se investigó la biosorción de Pb (II) y Zn (II) por biomasa de cáscara de naranjas secas, trituradas, con y sin tratamiento de reticulación (con CaCl<sub>2</sub>). De los 8 experimentos, se encontró que para el Pb (II) mostró porcentaje de remoción de 99.5 % con capacidad de remoción de 9.39 mg de Pb (II) / g de cáscara de naranja. El mejor porcentaje de remoción de Zn (II) fue 99.5%, cuya capacidad de remoción fue de 9.95 mg de Zn (II)/ g de cáscara de naranja (Cardona, Cabañas, & Zepeda, 2013).

- **Utilización de biosorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios.**

La adsorción de Pb(II) y Ni(II) sobre cáscaras de ñame y bagazo de palma fue sistemáticamente estudiada en sistema individual y binario, alcanzando para las cáscaras de ñame una capacidad máxima de adsorción de 362,45 para el níquel y 68,14 mg/g para el plomo. En el caso del bagazo de palma, se estimó una capacidad de adsorción de 162,64 mg/g para el níquel y 90,28 mg/g para el plomo. En sistema binario, se observó un efecto antagónico para la acción combinada de los metales, aunque la remoción de plomo se vio significativamente incrementada en las cáscaras de ñame cuando se encontraba en solución acusa con el níquel (Tejada, Herrera, & Ruiz, 2016).

- **Adsorción de Cr(VI) por Cocos nucífera L. en residuales de Fibrocemento en Santiago de Cuba**

Este trabajo estudió la adsorción de Cr(VI) utilizando la cáscara del fruto de la planta *Cocos nucífera L.* como biomasa orgánica. Los valores óptimos de adsorción de Cr(VI) son: pH de 3 unidades; tamaño de partícula menor que 0,074 mm; dosis de adsorbente de 5 g.dm<sup>-3</sup> y tiempo contacto de 1 hora. A valores bajos de concentración del metal (1,0; 1,5 y 1,84 mg.dm<sup>-3</sup>) se obtuvo porcentaje de remoción superiores a 90, sin embargo a altos valores de concentración (2,5 y 3 mg.dm<sup>-3</sup>), se obtienen valores inferiores al 90 % (Pérez, Calzado, Cascaret, & Tur, 2008).

## 4. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación es experimental y el procedimiento se dividió en 5 partes: la caracterización de la fibra *musa paradisiaca*, elaboración y caracterización del agua sintética, aplicación de la fibra natural como lecho filtrante y la caracterización del agua tratada. Para el tratamiento de los resultados se realizó un análisis ANOVA de dos factores.

Cada uno de los procedimientos se describen a continuación:

### 4.1. Caracterización de la fibra natural *musa paradisiaca*.

Se realizaron 5 repeticiones para las siguientes pruebas: pH, porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, determinación de carbono orgánico, porcentaje de lignina, densidad, porosidad y permeabilidad de la fibra. En la tabla 4 se muestran los métodos utilizados para el análisis de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

**Tabla 4.** Descripción de los procesos para la caracterización de la fibra *musa paradisiaca*.

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
<b>Potencial de Hidrógeno (pH).</b>	MÉTODO 4500 H+ (STANDARD METHODS, 2005).
<b>Porcentaje de humedad</b>	Método gravimétrico.
<b>Porcentaje de cenizas.</b>	Método 2540.E (STANDARD METHODS, 2005).
<b>Densidad de la fibra:</b>	Método relación masa volumen.
<b>Determinación porcentaje de lignina</b>	Método de Hidrolisis Acida Cuantitativa (norma TAPPI 222)
<b>Porcentaje de Carbono orgánico.</b>	Método gravimétrico.
<b>Porosidad de la fibra:</b>	Relación gravimétrica y volumétrica.
<b>Permeabilidad de la fibra:</b>	Se determinó mediante la ley de Darcy.

Elaborado por: Autor

Los procedimientos de cada uno de los métodos para la caracterización de la *musa paradisiaca* se hallan descritos en el anexo 1.

#### 4.2. Elaboración del agua residual sintética.

Para la elaboración del agua residual sintética se tomó como base el parámetro color, considerando un valor de 4540 U PtCo como concentraciones altas debido a que en el estudio “Análisis de la fibra obtenida del raquis de la planta *musa paradisiaca*, utilizada como lecho filtrante en la adsorción del parámetro color” se observó que para concentraciones altas de color (41305 U Pt-Co) la fibra no es eficaz en la adsorción del color (Cuadrado, 2017). Se realizaron 3 tipos de aguas residuales usando el colorante azul BRL en concentraciones según se indica en la tabla 5.

**Tabla 5.** Preparación agua residual sintética.

<b>Concentración</b>	<b>Solución (%m/v)</b>	<b>Unidades de color (U Pt-Co)</b>
<b>Alta</b>	$25 \times 10^{-2}$	5000,00
<b>Media</b>	$8,3 \times 10^{-3}$	1083,33
<b>Baja</b>	$8,3 \times 10^{-4}$	105,00

Elaborado por: Autor

En este caso se utilizó agua potable de la Universidad Nacional de Chimborazo que posee valores de 7,24, 593 $\mu$ s/cm y 0,002 mg/l para el pH, conductividad y Cr<sup>+6</sup> respectivamente. No se encontraron valores de DQO ni de cobre.

#### 4.3. Caracterización del agua residual sintética.

En el análisis del pH y la conductividad se utilizó el equipo multipárametros HACH HQ40d, para lo cual se colocó la muestra de agua en un vaso de precipitación y se procedió a hacer la lectura con el equipo.

Los análisis de color, DQO, cromo hexavalente (Cr<sup>+6</sup>) y cobre (Cu) se realizaron utilizando el espectrofotómetro HACH DR500 siguiendo los diferentes procesos estipulados en el manual de análisis de agua (HACH Company, 2000) descritos en la tabla 6.

**Tabla 6.** Procedimientos para el análisis de color, DQO, Cr<sup>+6</sup> y Cu en el espectrofotómetro HACH DR500

Parámetro	Proceso
<b>Color:</b>	Ingresar el programa 120 correspondiente al color. Llenar una celda de muestra (el blanco) con 25 ml de agua desionizada. Llenar una segunda celda con 25 ml de la muestra. Ubicar el blanco en el soporte de la celda. Cerrar el escudo para la Luz. Presiona ZERO. La pantalla mostrara puesta en cero. Ubicar la muestra en el soporte de la celda. Cerrar el escudo para la luz. Presionar Read. Visualizar y anotar el resultado ( HACH Company, 2000).
<b>DQO:</b>	Colocar en un tubo con reactivo para digestión de DQO 2ml de la muestra y mezaclar. Calentar el tubo en un reactor por 120 min y dejar enfriar el tubo aproximadamente por 20 min. Ingresar el número de programa 435 almacenado para demanda química de oxígeno (DQO). Colocar el blanco en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento Presiona ZERO. La pantalla mostrara puesta en cero Colocar el tubo con la muestra en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento. Presionar Read. Visualizar y anotar el resultado ( HACH Company, 2000).
<b>Cromo hexavalente Cr<sup>+6</sup> y cobre Cu:</b>	Seleccionar en la pantalla: Programa almacenados: Cromo programa 90 y cobre 135. Llenar la celda de 10ml con muestra. Añadir el contenido de un sobre de reactivo de cobre Chroma Ver 3 en polvo para el caso del cromo hexavalente Cr+6 y de reactivo Cu Ver 1 en polvo para el caso del cobre. Agitar, para mezclar y disolver. En presencia de cromo hexavalente, aparecerá un color violeta. Dejar reposar por 5 minutos. Llenar una celda de 10 ml con la muestra, encerar el equipo. Colocar la muestra y leer los resultados. Cabe señalar que el caso de las aguas sintética se necesitará una previa digestión de la muestra ( HACH Company, 2000).

Elaborado por: Autor

#### 4.4. Aplicación de la fibra natural como lecho filtrante.

Se realizaron pruebas de tratabilidad mediante el siguiente diseño experimental: las tres concentraciones de agua por 4 permeabilidades y por tres velocidades. Para lo cual se utilizó un lecho filtrante de diámetro interno  $D = 6.4$  cm, altura  $L = 15.3$  cm.

La velocidad de flujo fue controlada mediante una bomba peristáltica obteniendo velocidad alta ( $V_3 = 0,86$  ml/s), velocidad media ( $V_2 = 0,45$  ml/s), velocidad baja ( $V_1 = 0,22$  ml/s). La permeabilidad fue controlada por el corte de la longitud de la fibra, así el tratamiento será con fibra normal (Fn), fibra cortada a 1cm (F1), a 2cm (F2) y a 3cm

(F<sub>3</sub>). En la figura 2 se muestra el diseño experimental utilizado y las abreviaturas que se dieron para cada una de la pruebas de tratabilidad.

Fibra normal (Fn)	Concentración alta (Ca)	Velocidad Alta (V3)	<b>FnCaV3</b>
		Velocidad Media (V2)	<b>FnCaV2</b>
		Velocidad Baja (V1)	<b>FnCaV1</b>
Fibra 3 cm (F3)		Velocidad Alta	<b>F3CaV3</b>
		Velocidad Media	<b>F3CaV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F3CaV1</b>
Fibra 2 cm (F2)		Velocidad Alta	<b>F2CaV3</b>
		Velocidad Media	<b>F2CaV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F2CaV1</b>
Fibra 1 cm (F1)		Velocidad Alta	<b>F1CaV3</b>
		Velocidad Media	<b>F1CaV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F1CaV1</b>
Fibra normal	Concentración media (Cm)	Velocidad Alta	<b>FnCmV3</b>
		Velocidad Media	<b>FnCmV2</b>
		Velocidad Baja	<b>FnCmV1</b>
Fibra 3 cm		Velocidad Alta	<b>F3CmV3</b>
		Velocidad Media	<b>F3CmV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F3CmV1</b>
Fibra 2 cm		Velocidad Alta	<b>F2CmV3</b>
		Velocidad Media	<b>F2CmV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F2CmV1</b>
Fibra 1 cm		Velocidad Alta	<b>F1CmV3</b>
		Velocidad Media	<b>F1CmV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F1CmV1</b>
Fibra normal	Concentración baja (Cb)	Velocidad Alta	<b>FnCbV3</b>
		Velocidad Media	<b>FnCbV2</b>
		Velocidad Baja	<b>FnCbV1</b>
Fibra 3 cm		Velocidad Alta	<b>F3CbV3</b>
		Velocidad Media	<b>F3CbV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F3CbV1</b>
Fibra 2 cm		Velocidad Alta	<b>F2CbV3</b>
		Velocidad Media	<b>F2CbV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F2CbV1</b>
Fibra 1 cm		Velocidad Alta	<b>F1CbV3</b>
		Velocidad Media	<b>F1CbV2</b>
		Velocidad Baja	<b>F1CbV1</b>

**Figura 2.** Diseño experimental y abreviaturas de cada una de la pruebas de tratabilidad.

Cada prueba comprendió un tratamiento cuya duración fue de 180 minutos a flujo continuo, se tomaron valores de pH, conductividad y color cada 5 minutos dando un total de 36 muestras, de DQO, Cr<sup>+6</sup> y Cu se analizaron al inicio del tratamiento y en los minutos 1, 5, 30, 60, 90, 120 y 180 dando un total de 8 muestras.

#### 4.5. Caracterización del agua tratada.

Para la caracterización del agua tratada se realizó los mismos procedimientos y parámetros descritos anteriormente en la caracterización del agua residual sintética.

#### 4.6. Análisis Estadístico.

Se obtuvo la media de los 3 valores obtenidos en el laboratorio a lo largo de los 180 minutos de tratamiento, se aplicó una suavización de datos, esto con el objetivo de

corregir valores erróneos. El método que se utilizó es el de Suavización Exponencial simple, este método contiene un mecanismo de autocorrección que ajusta los pronósticos en dirección opuesta a los errores pasados. Es un caso particular de promedios móviles ponderados de los valores actuales y anteriores en el cual las ponderaciones disminuyen. Se utiliza tanto para suavizar como para realizar pronósticos (Vélez, 2004). La ecuación empleada es:

$$\hat{X}_t = \hat{X}_{t-1} + \alpha * (X_{t-1} - \hat{X}_{t-1})$$

Donde:

- $\hat{X}_t$  = Promedio de ventas en unidades en el período
- $t, \alpha$  = constante de suavización
- $\hat{X}_{t-1}$  = pronóstico de ventas en unidades del período t-1
- $X_{t-1}$  = Ventas reales en unidades del período t-1

Los datos obtenidos en la experimentación fueron valorados mediante el análisis estadístico de la varianza ANOVA de 2 factores con un nivel de significancia del 95%. El porcentaje de remoción o adsorción de cada uno de los parámetros analizados se obtuvo con el valor inicial y el valor obtenido al finalizar el tratamiento. Finalmente se calculó el coeficiente de correlación entre la velocidad de flujo vs el porcentaje de remoción de contaminantes y la permeabilidad vs el porcentaje de remoción de contaminantes para encontrar si existe o no correlación entre las mismas.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 5.1. Caracterización de la fibra *musa paradisiaca*.

En la tabla 7 y 8 se reportan los resultados de la caracterización físico química e hidráulica de la fibra *musa paradisiaca*.

**Tabla 7.** Caracterización Físico – Química de la fibra *musa paradisiaca*.

<b>Parámetro</b>	<b>Datos Obtenidos</b>
<b>Potencial de Hidrógeno (pH)</b>	7,26
<b>Porcentaje de humedad (%)</b>	8,24
<b>Porcentaje de carbónico orgánico (%)</b>	44,02
<b>Porcentaje de cenizas (%)</b>	24,49
<b>Porcentaje de lignina (%)</b>	11,73
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,085

Elaborado por: Autor

La fibra presenta un pH neutro. En el porcentaje de humedad la fibra presenta un valor del 8,24% que representa un contenido bajo contenido de agua. El porcentaje de carbono orgánico (CO) se encuentra en el 44,02% significando que casi la mitad de la composición de la fibra está representada por el contenido de carbono orgánico, concordando con la literatura que indica que la materia vegetal seca contiene en promedio un 50 % de CO (Schlegel, Gayoso, & Guerra, 2001). Los valores referentes al porcentaje de lignina, porcentaje de cenizas y densidad obtenidos en esta investigación son similares a los reportados por (Cuadrado, 2017).

**Tabla 8.** Caracterización Hidráulica de la fibra *musa paradisiaca*.

<b>Corte de la fibra</b>	<b>Permeabilidad m/s</b>	<b>Porosidad</b>
<b>Fibra normal (Fn)</b>	0,000376	76,87%
<b>Fibra cortada a 3 cm (F3)</b>	0,000348	75,23%
<b>Fibra cortada a 2 cm (F2)</b>	0,000292	73,61%
<b>Fibra cortada a 1 cm (F1)</b>	0,000252	72,94%

Elaborado por: Autor

Los datos de permeabilidad nos permiten observar la relación directamente proporcional entre el corte de la fibra y la permeabilidad, es decir a mayor longitud de la fibra mayor es el valor de la permeabilidad, ocurriendo lo mismo con la porosidad cuyos datos se encuentran cercanos a los valores reportados en un estudio de caracterización hidráulica de la fibra de coco (similar a la *musa paradisiaca*) con una porosidad del 81% (Ritter, Machín, & Regalado, 2005)

## 5.2. Elaboración y caracterización del agua residual sintética.

En la Tabla 9 se expresa los resultados de la caracterización de los tres tipos de agua sintética.

**Tabla 9.** Caracterización agua residual sintética concentración alta, media y baja.

Parámetro	Agua residual sintética		
	Agua residual sintética concentración alta	Agua residual sintética concentración media	Agua residual sintética concentración baja
Color (U Pt- Co)	5000,00	1083,33	105,00
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	965,00	688,67	643,67
pH	8,16	7,81	7,48
DQO (mg/l)	98,33	38,67	16,67
Cr <sup>+6</sup> (mg/l)	2,81	0,61	0,38
Cu (mg/l)	28,08	8,18	3,82

Elaborado por: Autor

Como se puede observar en el agua residual sintética de concentración alta, media y baja se encontró presencia de color, Cr<sup>+6</sup> y Cu asemejándose a las características que presentan los efluentes de industrias textiles. Estos valores se encuentran sobre el límite permisible estipulados por la legislación ecuatoriana. Referente a la conductividad, pH y DQO los valores obtenidos se encuentran bajos debido a que estos parámetros se encuentran influenciados en la industria textil principalmente por los procesos de teñido y acabado tomando contacto con otros productos químicos. En la figura 3 se muestran las diferentes tonalidades de las aguas residuales sintéticas.



Concentración Alta.

Concentración Media.

Concentración Baja.

**Figura 3.** Agua residual sintética.

## 5.3. Porcentaje de remoción de contaminantes por el lecho filtrante.

Debido a la gran cantidad de muestras analizadas en cada prueba de tratabilidad los resultados se representan en los gráficos del anexos 2. A continuación se muestran los

resultados de los porcentajes de remoción de contaminantes para cada concentración de agua sintética.

### 5.3.1. Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración alta de color.

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para cada prueba de tratabilidad de concentración alta después de 3 horas de filtrar el agua.

**Tabla 10.** Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración alta de color

Tratamiento	pH		Conductividad		Color		DQO		CR <sup>+6</sup>		Cu	
	Vf	%R	Vf (µs/cm)	%R	Vf (UPtCo)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R
<b>FnCaV1</b>	8,12	0,53%	1027,2	-6,46%	2134,09	57,32%	142,3	-44,7%	0,99	64,60%	11,80	57,99%
<b>F3CaV1</b>	7,62	6,63%	963,99	0,11%	2521,86	49,56%	91,00	7,45%	0,96	65,80%	4,62	83,54%
<b>F2CaV1</b>	7,60	6,86%	953,89	1,15%	2044,37	59,11%	81,33	17,29%	0,63	77,64%	7,88	71,93%
<b>F1CaV1</b>	7,80	4,47%	935,66	3,04%	2353,59	52,93%	65,67	33,22%	0,54	80,82%	10,70	61,88%
<b>FnCaV2</b>	7,67	6,02%	842,92	12,65%	1742,34	65,15%	71,00	27,79%	1,04	62,99%	22,18	21,02%
<b>F3CaV2</b>	7,75	4,99%	814,06	15,64%	1824,42	63,51%	68,33	30,51%	0,99	64,68%	23,02	18,03%
<b>F2CaV2</b>	7,61	6,71%	861,87	10,69%	2482,41	50,35%	62,67	36,27%	0,92	67,15%	17,61	37,28%
<b>F1CaV2</b>	7,73	5,24%	849,74	11,94%	1761,48	64,77%	59,67	39,32%	0,85	69,80%	14,41	48,67%
<b>FnCaV3</b>	7,86	3,70%	761,68	21,07%	2392,58	52,15%	79,00	19,66%	1,19	57,59%	13,21	52,96%
<b>F3CaV3</b>	7,92	2,90%	801,88	16,90%	2448,46	51,03%	73,00	25,76%	1,13	59,74%	13,91	50,45%
<b>F2CaV3</b>	7,95	2,52%	795,81	17,53%	2436,00	51,28%	41,67	57,63%	0,96	65,66%	18,22	35,10%
<b>F1CaV3</b>	7,85	3,76%	750,45	22,23%	2586,52	48,27%	36,00	63,39%	0,93	67,05%	17,48	37,75%

Elaborado por: Autor

El comportamiento para cada parámetro fue diferente:

Así para el pH se muestran valores entre 7,61 y 8,12 observando que el valor inicial de 8,16 no se ve alterado manteniéndose dentro del rango (5,5 – 9,5) para descargas a cuerpos hídricos de agua dulce.

La conductividad presenta en su mayoría valores positivos cuyos resultados son mejores mientras se aumenta la velocidad de flujo llegando a reducir hasta en un 22,33 % en el tratamiento F1CaV3.

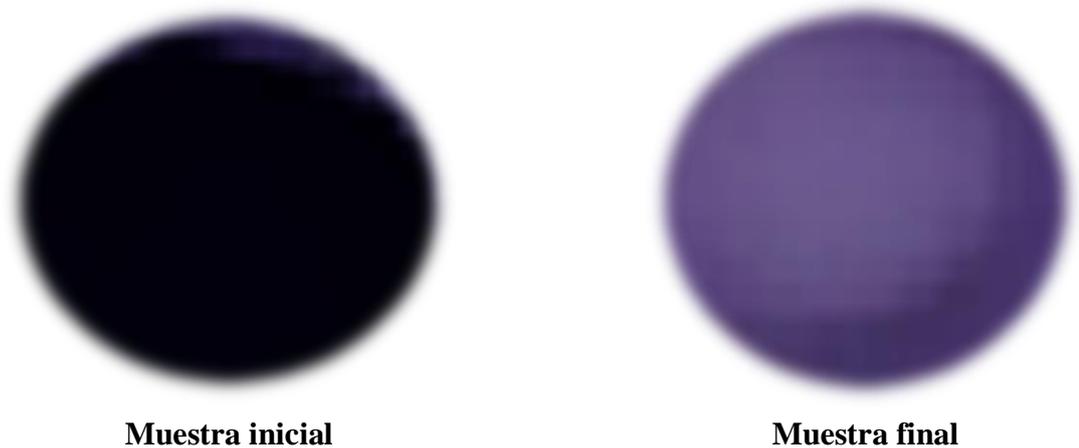
El color presenta valores de reducción que se encuentran entre el 48,27 y 65,15 % para cada tratamiento.

En el DQO se obtuvieron mejores resultados mientras se aumentaba la velocidad de flujo llegando a reducir hasta en un 63,39% en el tratamiento F1CaV3.

Los porcentajes de reducción del  $\text{Cr}^{+6}$  son favorables para cada tratamiento cuyos valores se encuentran entre el 59,74 y 80,82% de remoción.

Finalmente para el Cu los porcentajes de reducción presentan fluctuaciones que por ejemplo en el tratamiento F3CaV2 es del 18,03%, un valor pequeño referente al obtenido en el tratamiento F3CaV1 que fue del 83,54%.

En la figura 4 se muestra el color del agua sintética al inicio y al final del tratamiento.



**Figura 4.** Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración alta de color.

### **5.3.2. Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración media de color.**

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos para cada prueba de tratabilidad de concentración media después de 3 horas de filtrar el agua.

**Tabla 11.** *Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración media de color*

Trata- miento	pH		Conductividad		Color		DQO		CR <sup>+6</sup>		Cu	
	Vf	%R	Vf ( $\mu\text{s/cm}$ )	%R	Vf (UPtCo)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R
<b>FnCmV1</b>	7,76	0,68%	912,29	-32,47%	328,54	69,67%	122,33	-216,34%	0,30	50,37%	2,35	71,27%
<b>F3CmV1</b>	7,26	7,05%	848,99	-23,28%	504,37	53,44%	71,00	-83,60%	0,29	51,69%	0,92	88,69%
<b>F2CmV1</b>	7,24	7,29%	838,89	-21,81%	410,54	62,10%	61,33	-58,60%	0,24	60,69%	1,57	80,79%
<b>F1CmV1</b>	7,44	4,79%	820,66	-19,17%	470,72	56,55%	45,66	-18,08%	0,22	64,74%	2,14	73,87%
<b>FnCmV2</b>	7,31	6,42%	727,92	-5,70%	350,53	67,64%	51,00	-31,89%	0,33	46,27%	4,42	45,92%
<b>F3CmV2</b>	7,39	5,34%	699,06	-1,51%	367,38	66,09%	48,33	-24,98%	0,30	50,73%	4,61	43,70%
<b>F2CmV2</b>	7,38	5,56%	746,87	-8,45%	483,30	55,39%	42,66	-10,32%	0,27	56,22%	3,52	56,96%
<b>F1CmV2</b>	7,37	5,60%	734,74	-6,69%	353,30	67,39%	39,66	-2,56%	0,27	55,10%	2,88	64,76%
<b>FnCmV3</b>	7,50	3,99%	646,68	6,10%	482,46	55,47%	59,00	-52,57%	0,35	43,29%	3,00	63,32%
<b>F3CmV3</b>	7,51	3,81%	686,88	0,26%	491,29	54,65%	53,00	-37,06%	0,34	44,49%	2,78	66,00%
<b>F2CmV3</b>	7,59	2,78%	680,81	1,14%	512,32	52,71%	21,66	43,99%	0,32	47,86%	3,64	55,45%
<b>F1CmV3</b>	7,49	4,06%	635,45	7,73%	517,28	52,25%	16,00	58,62%	0,31	48,79%	3,49	57,31%

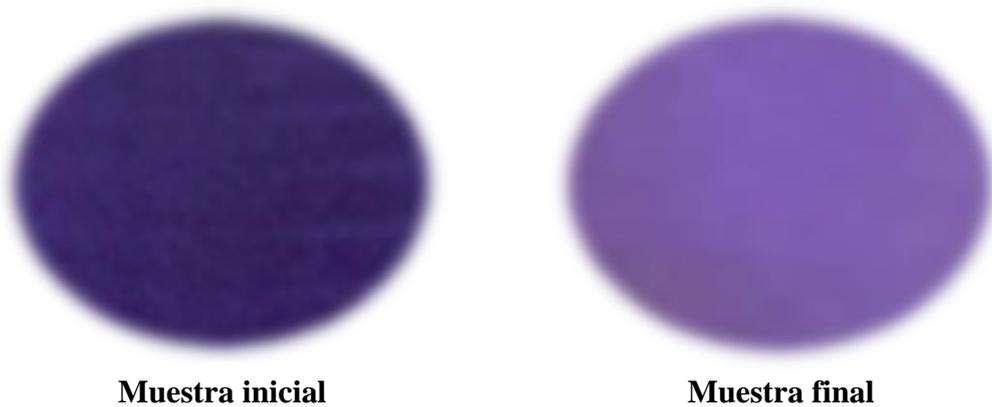
Elaborado por: Autor

El pH se mantiene bajo normativa. La conductividad presenta valores de remoción positivos solo para velocidades altas de flujo removiendo hasta en un 7,73% en el tratamiento F1CmV3. En el color se observan valores de reducción que se encuentran entre el 52,71% y 69,67%.

El DQO presenta casi en su mayoría valores negativos eso quiere decir que no se logró bajar la concentración de este parámetro sino más bien aumentarla por factores como la madures y descomposición, la presencia de partículas finas e incluso la presencia de sales hidrosolubles que se presume posee la fibra.

Los porcentajes de reducción del Cr<sup>+6</sup> se encuentran entre el 43,29 y 64,74% de remoción y los del cobre fluctúan entre el 45,92% y 88,69%.

En la figura 5 se muestra el color del agua sintética al inicio y al final del tratamiento



**Figura 5.** Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración media de color..

### 5.3.3. Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color.

En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para cada prueba de tratabilidad de concentración baja después de 3 horas de filtrar el agua.

**Tabla 12.** Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color.

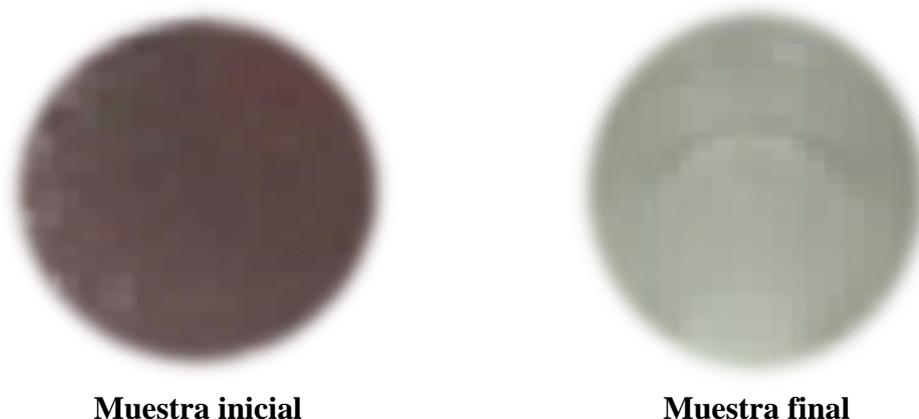
Tratamiento	pH		conductividad		color		DQO		CR <sup>+6</sup>		Cu	
	Vf	%R	Vf (µs/cm)	%R	Vf(UPt-Co)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R
<b>FnCvV1</b>	7,43	0,67%	881,63	-36,97%	33,67	67,93%	99,00	-493,88%	0,22	42,06%	1,15	69,94%
<b>F3CbV1</b>	6,93	7,41%	818,32	-27,13%	49,43	52,93%	49,00	-193,94%	0,21	43,61%	0,48	87,31%
<b>F2CbV1</b>	6,92	7,52%	808,56	-25,62%	40,94	61,01%	40,00	-139,95%	0,19	50,60%	0,83	78,37%
<b>F1CbV1</b>	7,11	4,92%	790,33	-22,78%	46,92	55,32%	22,66	-35,93%	0,17	53,95%	1,07	71,99%
<b>FnCvV2</b>	6,97	6,84%	697,92	-8,43%	34,72	66,93%	29,66	-77,92%	0,25	34,77%	2,22	42,00%
<b>F3CbV2</b>	7,06	5,62%	668,39	-3,84%	36,26	65,47%	26,66	-59,93%	0,22	43,41%	2,28	40,21%
<b>F2CbV2</b>	7,06	5,68%	716,87	-11,37%	49,34	53,01%	20,66	-23,94%	0,21	44,80%	1,75	54,11%
<b>F1CbV2</b>	7,05	5,71%	704,07	-9,38%	35,16	66,51%	17,00	-1,98%	0,21	45,64%	1,44	62,18%
<b>FnCvV3</b>	7,17	4,12%	616,68	4,19%	47,98	54,31%	37,00	-121,96%	0,27	30,18%	1,49	60,91%
<b>F3CbV3</b>	7,18	3,98%	660,21	-2,57%	48,80	53,52%	30,33	-81,94%	0,26	31,98%	1,40	63,25%
<b>F2CbV3</b>	7,24	3,17%	650,81	-1,11%	50,95	51,47%	15,00	10,02%	0,24	35,84%	1,81	52,49%
<b>F1CbV3</b>	7,14	4,50%	605,45	5,94%	51,30	51,14%	11,33	32,03%	0,24	36,04%	1,75	54,19%

Elaborado por: Autor

Para el caso del agua residual sintéticas de concentración El pH se mantiene bajo normativa. La conductividad y el DQO presenta casi en su mayoría valores negativos eso quiere decir que no se logró bajar este parámetro sino más bien aumentó por lo

explicado anteriormente. El color se encuentra un porcentaje de remoción entre el 51,14% y 67,93 %, el  $Cr^{+6}$  entre el 30,18% y 53,95 % y de Cu entre el 40,21 y 87,31%.

En la figura 6 se muestra el color del agua sintética al inicio y al final del tratamiento



**Figura 6.** Muestra inicial y final en el tratamiento con agua residual sintética de concentración baja de color.

#### 5.3.4. Remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color con prelavado de la fibra.

Debido a que se observó comportamientos inusuales al inicio del tratamiento en las pruebas de tratabilidad con las tres concentraciones de agua sintética referentes a los parámetros conductividad, color y DQO, fue necesario la aplicación de más pruebas de tratabilidad con el pre lavado de la fibra, ya que la misma aporta con valores a estos parámetros. A continuación en la tabla 13 se presentan los valores conductividad, color y DQO con los que aporta la fibra.

**Tabla 13.** Valores conductividad, color y DQO con los que aporta la fibra.

Parámetro	FnCbV1	F3CbV1	F2CbV1	F1CbV1	FnCbV2	F3CbV2	F2CbV2	F1CbV2	FnCbV3	F3CbV3	F2CbV3	FCb1V3	Media
Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	37300	37347	37430	37476	43400	43270	43460	43310	36800	36760	36860	36840	39187,75
Color (UPtCo)	480	509	499	495	461	459	468	463	381	369	392	387	446,92
DQO (mg/l)	5490	5463	5458	5429	8040	5515	5510	5481	4080	4053	4048	4023	5215,83

Elaborado por: Autor

Obteniendo una media de 39187,75  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 446,92 UPtCo, 5215,83 mg/l, para la conductividad, color y DQO respectivamente. Entre los factores que influye al aporte de conductividad, color y DQO por parte de la fibra es su estado de madures y descomposición, la presencia de partículas finas e incluso la presencia de sales

hidrosolubles que se presume posee la fibra. En la figura 7 se observa el color con el que aporta la fibra al inicio y final del lavado.



**Muestra inicial** **Muestra final**  
**Figura 7.** Muestra inicial y final del lavado de la fibra antes del tratamiento.

Cabe señalar que si bien la fibra aporta con valores de concentración para la conductividad, color y DQO este problema se solucionó mediante el lavado de la fibra favoreciendo el tratamiento ya que la fibra después del lavado no perdió sus características de adsorción. En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos para cada prueba de tratabilidad después de un tratamiento de 3 horas por el lecho filtrante para agua sintética de concentraciones bajas con prelavado de la fibra.

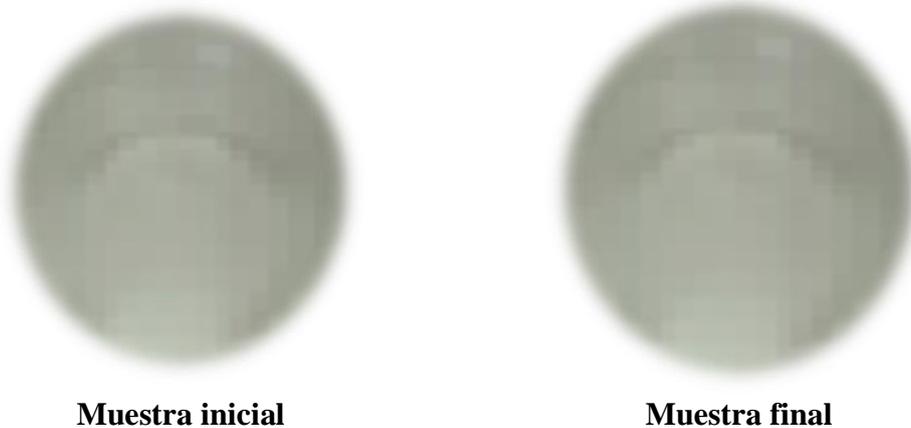
**Tabla 14.** Porcentajes de remoción de contaminantes en agua sintética de concentración baja de color con el prelavado de la fibra.

Tratamiento	pH		Conductividad		Color		DQO		CR <sup>16</sup>		Cu	
	Vf	%R	Vf (µs/cm)	%R	Vf(UPT-Co)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R	Vf (mg/l)	%R
<b>FnCbV1</b>	7,38	1,34%	766,98	-19,16%	31,65	69,86%	45,00	-169,95%	0,25	34,97%	1,45	61,96%
<b>F3CbV1</b>	7,32	2,08%	758,72	-17,87%	28,84	72,53%	34,00	-103,96%	0,24	35,91%	0,78	79,60%
<b>F2CbV1</b>	7,31	2,26%	752,70	-16,94%	28,71	72,65%	20,00	-19,98%	0,21	44,98%	1,16	69,76%
<b>F1CbV1</b>	7,06	5,59%	746,20	-15,93%	26,68	74,59%	11,00	34,01%	0,20	46,95%	1,38	63,81%
<b>FnCbV2</b>	6,93	7,35%	674,13	-4,73%	28,43	72,93%	32,00	-91,96%	0,25	33,03%	2,52	34,10%
<b>F3CbV2</b>	7,02	6,13%	667,33	-3,68%	26,50	74,76%	27,00	-61,97%	0,24	35,71%	2,58	32,35%
<b>F2CbV2</b>	7,02	6,18%	669,73	-4,05%	25,60	75,62%	19,00	-13,98%	0,22	42,72%	1,98	48,14%
<b>F1CbV2</b>	7,01	6,22%	665,84	-3,44%	24,71	76,47%	9,00	46,01%	0,22	42,84%	1,75	54,26%
<b>FnCbV3</b>	7,13	4,63%	661,07	-2,70%	29,04	72,34%	31,00	-85,96%	0,26	32,78%	1,79	53,13%
<b>F3CbV3</b>	7,13	4,65%	658,25	-2,26%	26,35	74,90%	24,00	-43,97%	0,25	33,68%	1,70	55,40%
<b>F2CbV3</b>	7,19	3,83%	648,08	-0,69%	24,84	76,35%	9,00	46,01%	0,24	36,26%	2,10	45,06%
<b>F1CbV3</b>	7,09	5,17%	603,25	6,28%	23,19	77,92%	5,00	70,01%	0,23	39,75%	2,01	47,45%

Elaborado por: Autor

La conductividad pesa al lavado de la fibra presenta casi en su mayoría valores negativos eso quiere decir que no se logró bajar este parámetro pero si se redujo en comparación con los valores obtenidos en la tabla 12. En color, el porcentaje de remoción se encuentra entre el 69,86% y 77,92% y en el caso del DQO se obtuvo mejores resultados mientras se aumenta la velocidad de flujo y el corte de la fibra es menor. El pH presento porcentajes entre el 1,34 % y 6,18%, el  $\text{Cr}^{+6}$  porcentajes de remoción entre el 32,78% y 46,95%. El cobre reporto porcentajes entre el 32,35% y el 79,60%.

En la figura En la figura 8 se muestra el color del agua sintética al inicio y al final del tratamiento.



**Figura 8.** Muestra inicial y final del lavado de la fibra antes del tratamiento

#### **5.4. Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores.**

El ANOVA de dos factores se basa en dos pruebas de hipótesis una nula  $H_0$  y una alternativa  $H_1$  que evalúan las dos variables categóricas.  $H_0$  dictamina que todos los tratamientos son iguales es decir en este caso que no hay variación entre los resultados en las pruebas de tratabilidad.  $H_1$  dictamina que no todos los tratamientos son iguales es decir que si existe variabilidad entre los resultados de un tratamiento y el otro.

El análisis de varianza ANOVA de dos factores se lo realizó a cada parámetro para todos los tratamientos según el tipo de agua residual sintética de la siguiente manera con un nivel de confianza del 95 %:

- Con fibra sin prelavado a concentraciones altas (Fsinlav.Ca.).
- Con fibra sin prelavado a concentraciones medias (Fsinlav.Cm.).
- Con fibra sin prelavado a concentraciones bajas (Fsinlav.Cb.).

- Con fibra con prelavado a concentraciones bajas (Flav.Cb.).

En la tabal 15 se muestran los resultados del análisis ANOVA de dos factores tanto para la variable velocidad como para la variable permeabilidad respecto a la remoción de contaminantes las aguas residuales sintéticas de concentraciones altas, medias y bajas.

**Tabla 15.** Resumen prueba de ANOVA de dos factores.

Tratamiento	Velocidad			pH	Permeabilidad		
	Simbología	Valores	Hipótesis		Simbología	Valores	Hipótesis
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal < Ftab	1,69 < 5,14	acepta H <sub>0</sub>	<b>Conductividad</b>	Fcal < Ftab	0,54 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal < Ftab	1,06 < 5,14	acepta H <sub>0</sub>		Fcal < Ftab	0,42 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	5,16 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	3,70 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	9,85 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	1,11 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal > Ftab	37,53 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>	<b>Color</b>	Fcal < Ftab	0,57 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal > Ftab	37,53 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,57 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	36,11 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,55 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	81,89 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	2,72 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal < Ftab	3,55 < 5,14	acepta H <sub>0</sub>	<b>Demanda química de oxígeno DQO</b>	Fcal < Ftab	3,38 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal < Ftab	4,04 < 5,14	acepta H <sub>0</sub>		Fcal < Ftab	1,21 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal < Ftab	3,83 < 5,14	acepta H <sub>0</sub>		Fcal < Ftab	1,17 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	41, 28 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	44, 82 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal > Ftab	6,42 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>	<b>Cromo Hexavalente Cr+6</b>	Fcal < Ftab	4,52 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal > Ftab	6,42 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	4,53 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal < Ftab	5,16 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	3,70 > 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	11,27 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	49, 00 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal > Ftab	12,25 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>	<b>Cobre Cu</b>	Fcal > Ftab	10,39 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal > Ftab	18,85 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	10,33 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	35,66 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	10,04 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	7,53 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal > Ftab	18,86 > 4, 75	acepta H <sub>1</sub>
<b>Fsinlav. Ca.</b>	Fcal > Ftab	7,45 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,12 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cm.</b>	Fcal > Ftab	8,72 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,85 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Fsinlav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	8,97 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,24 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>
<b>Flav. Cb.</b>	Fcal > Ftab	8,34 > 5,14	acepta H <sub>1</sub>		Fcal < Ftab	0,25 < 4, 75	acepta H <sub>0</sub>

Elaborado por: Autor

Los valores obtenidos dictaminan que en el caso del pH la hipótesis  $H_0$  fue aceptada para todas las concentraciones en la variable permeabilidad y en la variable velocidad  $H_0$  fue aceptada para concentraciones altas y medias es decir que se obtienen resultados similares en estos tratamientos, sin embargo para los tratamientos Fsinlav.Cb y Flav.Cb se aceptó  $H_1$  lo que significa que en estos tratamientos se obtuvieron resultados diferentes.

En la conductividad  $H_0$  fue aceptada para todas las concentraciones en la variable permeabilidad determinando que todos los tratamientos son iguales y  $H_1$  fue aceptada para todas las concentraciones en la variable velocidad determinando que no todos los tratamientos son iguales.

Las pruebas de hipótesis en el color determinaron que en los tratamientos en donde no se realizó el prelavado de la fibra todos los tratamientos son iguales en las dos variables aceptando  $H_0$ , esto debido a que como ya se observó en los experimentos en el laboratorio los tratamientos con la fibra sin prelavado alteran los mismos, sin embargo cuando se realiza el prelavado las condiciones mejoran lo cual nos permite observar que sí existe variación en cada tratamiento aceptando  $H_1$  en la variable permeabilidad y velocidad.

En el DQO  $H_1$  se aceptó para todas las concentraciones en la variable velocidad. En la variable permeabilidad solo para concentraciones bajas con prelavado de la fibra se aceptó  $H_1$ , mientras  $H_0$  fue aceptada para los tratamientos de las diferentes concentraciones sin pre lavado.

En el  $Cr^{+6}$  se aceptó  $H_1$  para cada una de los tratamientos en las dos variables lo que significa que se obtuvieron resultados diferentes de remoción en cada una de las pruebas de taratbilidad que se realizaron para este parámetro. Finalmente para Cu la variable en cuyos tratamientos los resultados no son similares es la velocidad donde en todas las concentraciones se aceptó  $H_1$  mientras que en la permeabilidad se aceptó  $H_0$  en cada una de las pruebas a diferente concentración.

#### **5.5. Determinación de la correlación entre la remoción del contaminante vs las permeabilidad y velocidad de flujo.**

Para obtener el coeficiente de correlación, se correlacionó el porcentaje de remoción con las diferentes velocidades a una misma permeabilidad y las diferentes

permeabilidades a una misma velocidad para cada parámetro en todas las concentraciones. El coeficiente de correlación nos permitirá conocer si es que la velocidad de flujo o la permeabilidad están relacionadas con la remoción de contaminantes donde si el valor se acerca a 1 la correlación será fuerte o perfecta y si se acerca a 0 la correlación será débil o nula. El signo determina si es directamente proporcional (signo positivo) o si es inversamente proporcional (signo negativo). A continuación en la tabla 16 se muestran los coeficientes de correlación obtenidos entre las diferentes permeabilidades y velocidades para cada tratamiento según su concentración.

**Tabla 16.** Resumen coeficientes de correlación obtenidos.

Tratamiento	Permeabilidad vs Porcentaje de retención			Velocidades vs Porcentaje de retención			
	P vs V1	P vs V2	P vs V3	V vs Fn	V vs F1	V vs F2	V vs 1
<b>pH</b>							
Fsinlav. Ca.	-0,851	0,210	0,397	0,435	-0,996	-0,945	-0,612
Fsinlav. Cm.	-0,851	0,905	0,329	0,435	-0,981	-1,000	-0,612
Fsinlav. Cb.	-0,845	0,964	0,132	<b>0,418</b>	<b>-0,983</b>	<b>-0,997</b>	<b>-0,483</b>
Flav. Cb.	-0,663	0,964	-0,008	<b>0,405</b>	<b>0,494</b>	<b>0,246</b>	<b>-0,535</b>
<b>Conductividad</b>							
Fsinlav. Ca.	-0,994	0,119	0,242	<b>0,928</b>	<b>0,816</b>	<b>0,968</b>	<b>0,993</b>
Fsinlav. Cm.	-0,994	0,119	0,242	<b>0,928</b>	<b>0,816</b>	<b>0,968</b>	<b>0,993</b>
Fsinlav. Cb.	-0,995	0,107	0,242	<b>0,928</b>	<b>0,803</b>	<b>0,968</b>	<b>0,993</b>
Flav. Cb.	-0,915	-0,912	-0,615	<b>0,841</b>	<b>0,824</b>	<b>0,884</b>	<b>0,973</b>
<b>Color</b>							
Fsinlav. Ca.	0,328	0,373	0,705	-0,537	-0,065	-0,710	-0,424
Fsinlav. Cm.	0,811	0,374	0,849	-0,974	-0,074	-0,919	-0,426
Fsinlav. Cb.	0,815	0,374	0,843	-0,956	-0,119	-0,861	-0,414
Flav. Cb.	<b>-0,944</b>	<b>-0,962</b>	<b>-0,941</b>	<b>0,784</b>	<b>0,808</b>	<b>0,879</b>	<b>0,972</b>
<b>Demanda química de oxígeno</b>							
Fsinlav. Ca.	-0,992	-0,842	-0,788	<b>0,706</b>	<b>0,637</b>	<b>0,992</b>	<b>0,986</b>
Fsinlav. Cm.	-0,992	-0,842	-0,788	<b>0,706</b>	<b>0,636</b>	<b>0,992</b>	<b>0,986</b>
Fsinlav. Cb.	-0,989	-0,842	-0,852	<b>0,710</b>	<b>0,669</b>	<b>0,893</b>	<b>0,987</b>
Flav. Cb.	<b>-0,886</b>	<b>-0,813</b>	<b>-0,857</b>	<b>0,814</b>	<b>0,926</b>	<b>0,961</b>	<b>1,000</b>
<b>Cromo Hexavalente Cr+6</b>							
Fsinlav. Ca.	<b>-0,754</b>	<b>-0,837</b>	<b>-0,836</b>	<b>-0,990</b>	<b>-0,982</b>	<b>-0,842</b>	<b>-0,880</b>
Fsinlav. Cm.	<b>-0,763</b>	<b>-0,914</b>	<b>-0,832</b>	<b>-0,968</b>	<b>-0,972</b>	<b>-1,000</b>	<b>-0,961</b>
Fsinlav. Cb.	<b>-0,769</b>	<b>-0,999</b>	<b>-0,864</b>	<b>-0,958</b>	<b>-0,935</b>	<b>-0,999</b>	<b>-0,990</b>
Flav. Cb.	<b>-0,757</b>	<b>-0,881</b>	<b>-0,752</b>	<b>-0,836</b>	<b>-0,961</b>	<b>-0,994</b>	<b>-0,971</b>
<b>Cobre Cu</b>							
Fsinlav. Ca.	-0,465	-0,639	0,765	<b>0,035</b>	<b>-0,360</b>	<b>-0,807</b>	<b>-0,977</b>
Fsinlav. Cm.	-0,463	-0,634	0,512	<b>-0,150</b>	<b>-0,360</b>	<b>-0,807</b>	<b>-0,976</b>
Fsinlav. Cb.	-0,422	-0,651	0,546	<b>-0,160</b>	<b>-0,366</b>	<b>-0,809</b>	<b>-0,976</b>
Flav. Cb.	-0,399	-0,663	0,524	<b>-0,154</b>	<b>-0,368</b>	<b>-0,842</b>	<b>-0,967</b>

Elaborado por: Autor

Si bien se obtuvo el coeficiente de correlación para todos los tratamientos se realizará el análisis de aquellas pruebas en donde se aceptó  $H_1$  en el análisis ANOVA de dos factores y que se encuentran resaltadas con negrilla en la tabla 20.

Así en el pH los resultados indican la velocidad ni la permeabilidad no influyen en la remoción de este parámetro.

En la conductividad se obtuvo una correlación significativa y perfecta es decir que la velocidad de flujo si influye de forma directamente proporcional ya que a mayor velocidad, mayor porcentaje de remoción de conductividad.

En el color la correlación de la permeabilidad es inversamente proporcional fuerte ya que los valores del coeficiente se encuentran entre -0,85 y - 0,95 y en el caso de la velocidad la correlación es directamente proporcional significativa y fuerte ya que los valores del coeficiente se encuentran entre 0,70 y 0,95. Lo que significa que la remoción de color en el tratamiento con el prelavado de la fibra es más efectiva a menor permeabilidad y a mayor velocidad de flujo.

En el DQO la variable velocidad la correlación se encuentran entre 6 y 1 es decir entre moderada y perfecta lo que significa que a mayor velocidad mayor es la disminución de DQO, mientras que para la variable permeabilidad coeficientes de correlación están entre -8,13 a -8,88 es decir la correlación es significativa y fuerte lo que significa que a menor permeabilidad la remoción de DQO es mayor.

En el  $Cr^{+6}$  el comportamiento se obtuvo coeficientes de correlación entre significativos y perfectos es decir mayores a -0,70 así entonces mientras menor sea la permeabilidad y la velocidad de flujo la remoción de Cromo hexavalente será más eficaz.

Finalmente en caso del cobre se determinó que no existe una correlación idónea entre la velocidad de flujo y la remoción de contaminantes.

Cabe señalar que en aquellos tratamientos donde la correlación no es buena se presume que hay otros factores o variables que influyen en la remoción de contaminantes que no ha sido motivo de estudio en esta investigación.

## 5.6. Determinación de los mejores tratamientos para la remoción de contaminantes.

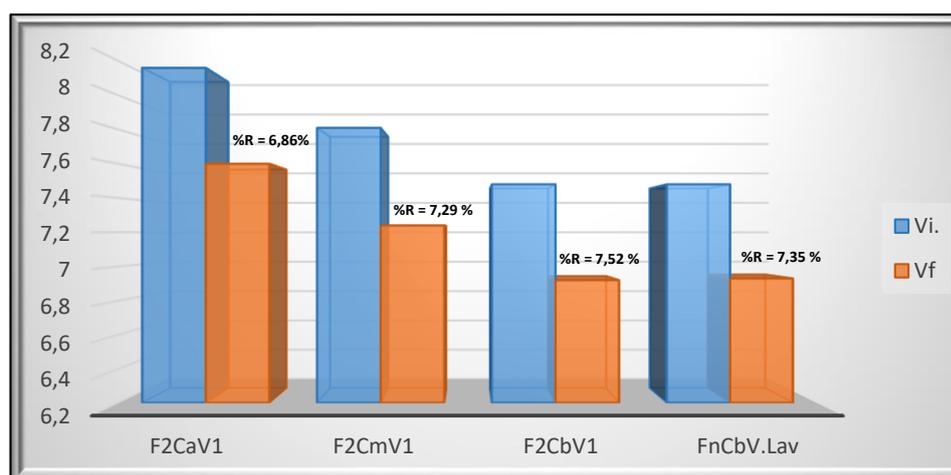
Para determinar el mejor tratamiento se escogió aquellos que obtuvieron el mejor resultado a lo largo de la experimentación por lo cual a continuación se explica los mejores tratamientos para cada parámetro en las diferentes concentraciones.

- **Potencial de hidrogeno**

**Tabla 17.** Mejores tratamientos para la remoción de pH

Concentración	Tratamiento	Vi	Vf	%R
Fsinlav. Ca.	F2CaV1	8,16	7,6	6,86
Fsinlav. Cm.	F2CmV1	7,81	7,24	7,29
Fsinlav. Cb.	F2CbV1	7,48	6,92	7,52
Flav. Cb.	FnCbV.Lav	7,48	6,93	7,35

Elaborado por: Autor



**Figura 9.** Mejores tratamientos para la remoción de pH.

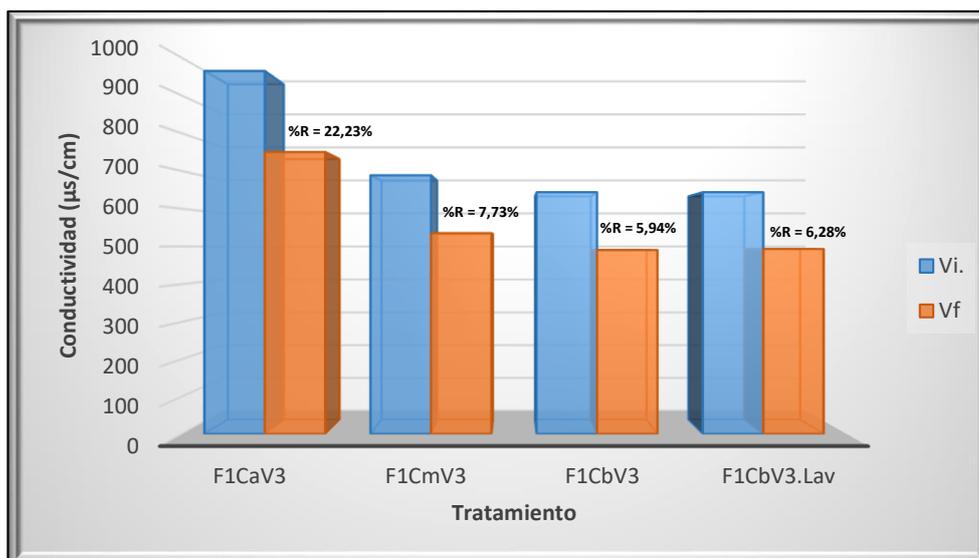
Lo valores de pH obtenidos se encuentran cercanos a 7 por tal motivo se considera que el pH no se ve afectado, por lo cual no se puede determinar el mejor o el peor tratamiento.

- **Conductividad**

**Tabla 18.** Mejores tratamientos para la remoción de conductividad.

Concentración	Tratamiento	Vi (us/cm)	Vf (us/cm)	%R
Fsinlav. Ca.	F1CaV3	965,00	750,45	22,23
Fsinlav. Cm.	F1CmV3	688,67	535,45	7,73
Fsinlav. Cb.	F1CbV3	643,67	490,45	5,94
Flav. Cb.	F1CbV3.Lav	643,67	493,25	6,28

Elaborado por: Autor



**Figura 10.** Mejores tratamientos para la remoción de conductividad.

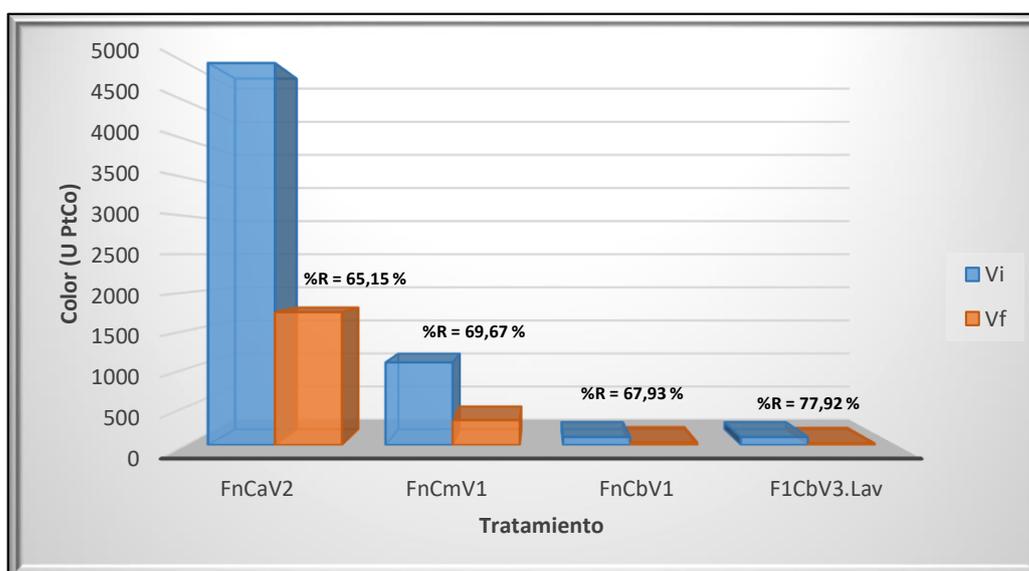
En la conductividad se observa que el mejor tratamiento fue con la fibra a un centímetro y velocidad de flujo alta.

- **Color.**

**Tabla 19.** Mejores tratamientos para la remoción de color

Concentración	Tratamiento	Vi(Upt-Co)	Vf (Upt-Co)	%R
<b>Fsinlav. Ca.</b>	FnCaV2	5000,00	1742,34	65,15
<b>Fsinlav. Cm.</b>	FnCmV1	1083,33	328,54	69,67
<b>Fsinlav. Cb.</b>	FnCbV1	105,00	33,67	67,93
<b>Flav. Cb.</b>	F1CbV3.Lav	105,00	23,19	77,92

Elaborado por: Autor



**Figura 11.** Mejores tratamientos para la remoción de color.

En el color las pruebas en las que no se realizó el prelavado de la fibra, la fibra normal presento mejores resultados con valores de entre el 65,15 % y 67,93% valores similares a los de Cuadrado (2017) que reporta una remoción del 67% lo cual significa que la capacidad de adsorción de la fibra es casi constante para el color. Mientras que al hacer el lavado se obtuvo un mejor resultado con la fibra de un centímetro a velocidad de flujo alta llegando a obtener el 77,92%

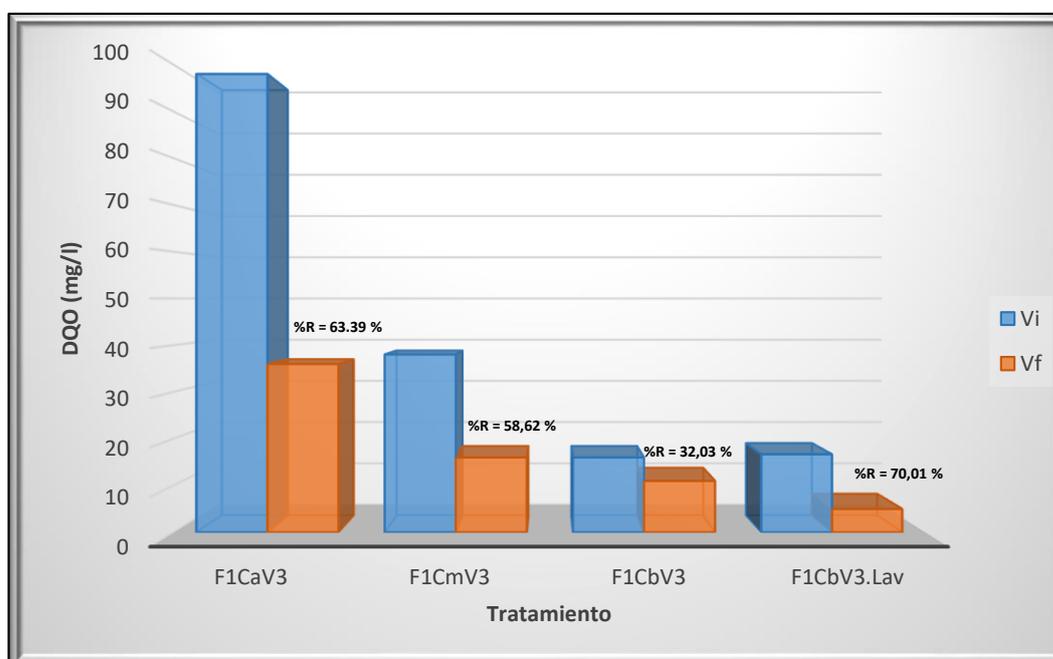
En esta investigación solo los resultados obtenidos en las concentraciones bajas cumple con el límite permisible es decir las muestras obtenidas fueron imperceptibles en disolución 1/20.

- **Demanda Química de Oxígeno.**

**Tabla 20.** Mejores tratamientos para la remoción de DQO

Concentración	Tratamiento	Vi (mg/l)	Vf (mg/l)	%R
Fsinlav. Ca.	F1CaV3	98,33	36,00	63,39
Fsinlav. Cm.	F1CmV3	38,67	16,00	58,62
Fsinlav. Cb.	F1CbV3	16,67	11,33	32,03
Flav. Cb.	F1CbV3.Lav.	16,67	5,00	70,01

Elaborado por: Autor



**Figura 12.** Mejores tratamientos para la remoción de DQO.

Los mejores resultados para el DQO se obtuvieron mientras se aumentaba la velocidad de flujo así el tratamiento con fibra de un centímetro a velocidad de flujo alta, fue

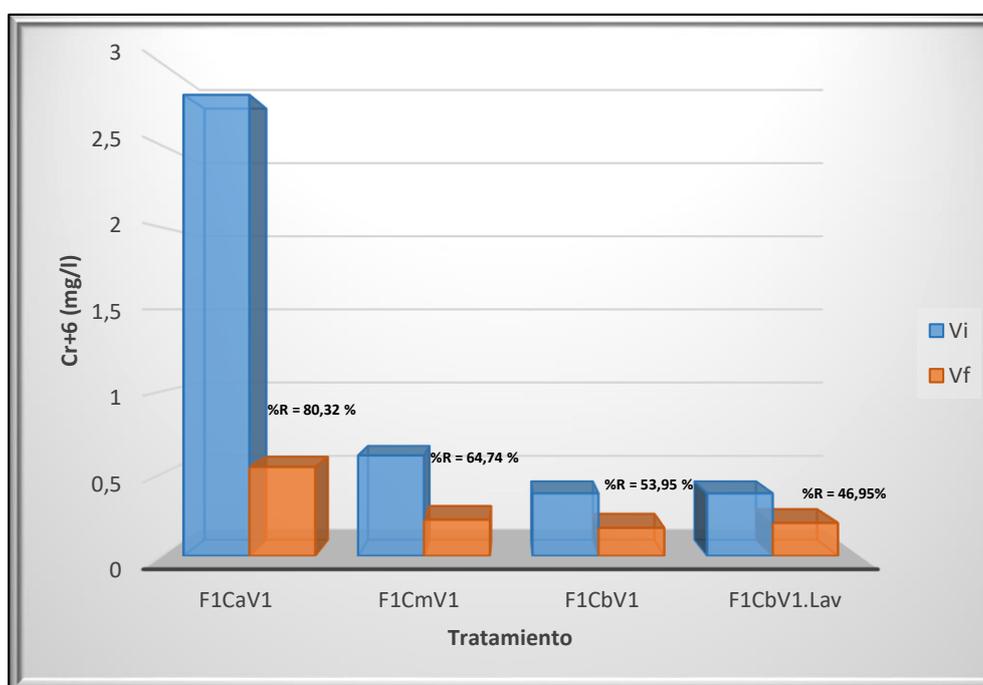
constante para cada concentración como el mejor tratamiento para este parámetro. La manipulación de la fibra también influyo debido a que en la fibra de 1 cm no hay muchos finos.

- **Cromo Hexavalente.**

**Tabla 21.** Mejores tratamientos para la remoción de Cr<sup>+6</sup>.

Concentración	Tratamiento	Vi (mg/l)	Vf (mg/l)	%R
Fsinlav. Ca.	F1CaV1	2,81	0,54	80,82
Fsinlav. Cm.	F1CmV1	0,61	0,22	64,74
Fsinlav. Cb.	F1CbV1	0,38	0,17	53,95
Flav. Cb.	F1CbV1. Lav	0,38	0,2	46,95

Elaborado por: Autor



**Figura 13.** Mejores tratamientos para la remoción de Cr<sup>+6</sup>.

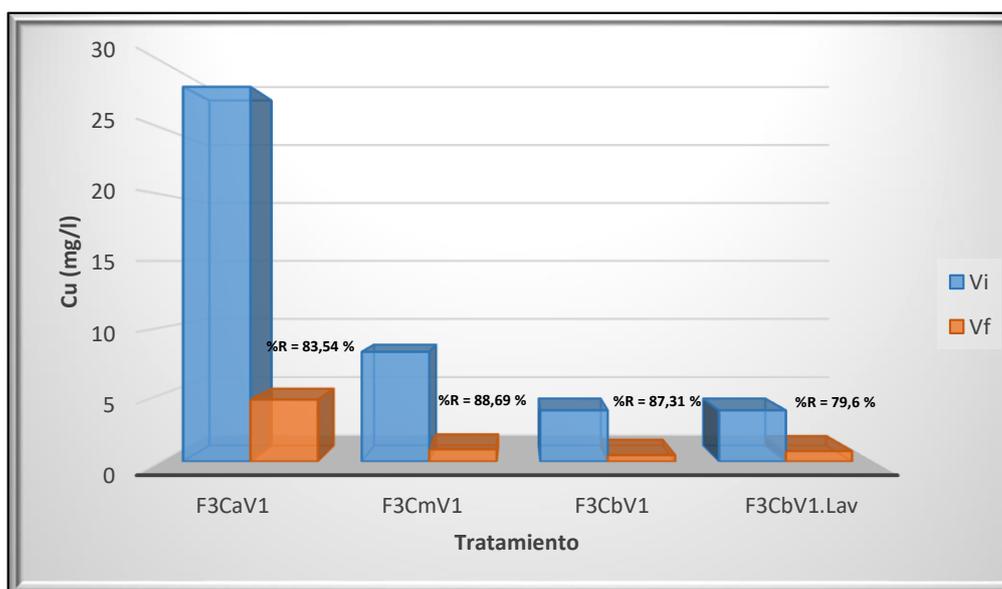
En el cromo hexavalente los mejores tratamientos son aquellos en los que la velocidad y la permeabilidad eran menores, así el más eficaz fue con fibra a un centímetro y velocidad de flujo baja. Para concentraciones medias y bajas los porcentajes de remoción se encuentran entre el 46,95% y 64,74% mientras que en concentraciones altas llega hasta un 80,82% de remoción esto debido a que en concentraciones altas hay mayor cantidad de Cr<sup>+6</sup> que remover.

- **Cobre**

**Tabla 22.** Mejores tratamientos para la remoción de Cu.

Concentración	Tratamiento	Vi (mg/l)	Vf (mg/l)	%R
Fsinlav. Ca.	F3CaV1	28,08	4,62	83,54
Fsinlav. Cm.	F3CmV1	8,18	0,92	88,69
Fsinlav. Cb.	F3CbV1	3,82	0,48	87,31
Flav. Cb.	F3CbV1.Lav	3,82	0,78	79,6

Elaborado por: Autor



**Figura 14.** Mejores tratamientos para la remoción de Cu.

En el cobre se observó que para la variable velocidad se encontraron resultados diferentes para cada tratamiento, aun así la correlación no fue fuerte, es decir que ni la permeabilidad ni la velocidad influenciaron en la remoción de este contaminante. Sin embargo en las tres concentraciones el tratamiento con fibra a 3 centímetros y velocidad de flujo baja posee los mejores resultados con porcentajes de remoción de entre el 79% y 89%. En este caso no se puede explicar de forma segura, por qué este tratamiento fue el mejor, ya que ni la velocidad ni la permeabilidad se encuentran correlacionadas con la remoción del contaminante, por tal razón se asume que otros factores o variables que afectan al fenómeno de la bioadsorción influyen en este proceso, como ya se mencionó en la teoría estas variables pueden ser el efecto de la temperatura, el efecto del pH, efecto del tamaño de la partícula o la presencia de otros iones (Tejada, Villabona, & Garcés, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015) variables que no han sido motivo de análisis en este estudio.

## 6. CONCLUSIONES.

El análisis estadístico determinó que las variables velocidad de flujo y la permeabilidad sí están correlacionadas con la remoción de conductividad, color, DQO y  $\text{Cr}^{+6}$  mientras que el pH y Cu no está correlacionada.

Para la variable permeabilidad la correlación es inversamente proporcional mientras que para la variable velocidad en el caso de la conductividad, color y DQO la correlación es directamente proporcional y para el caso del  $\text{Cr}^{+6}$  la correlación es inversamente proporcional.

El mejor tratamiento fue al utilizar fibra de 1 centímetro y velocidad de flujo alta en el cual se removió 23,37%; 77,92% y 70,01% para conductividad color y DQO respectivamente. Para el  $\text{Cr}^{+6}$  el mejor tratamiento fue con fibra a 1 centímetro y velocidad de flujo baja removiendo hasta en un 80 % la concentración de este contaminante. Mientras que para el Cu el mejor tratamiento fue el de fibra a 3 centímetros y velocidad de flujo baja removiendo entre un 79% y 89%. Comprobando así que el lecho filtrante de *musa paradisiaca* es eficaz para la remoción de estos contaminantes.

A pesar de obtener buenos porcentajes de remoción de Cu,  $\text{Cr}^{+6}$  y color, en el agua sintética de concentración alta no cumplen con los límites permisibles establecidos por la legislación ecuatoriana por lo cual se recomienda la utilización del lecho filtrante especialmente para aguas residuales de concentraciones bajas o que hayan sido tratadas en operaciones físico – químicas.

## **7. RECOMENDACIONES.**

Para obtener mejores resultados se debe realizar un prelavado de la fibra.

Realizar el análisis de más características físico químicas de la fibra que permitan tener mayor conocimiento de las mismas y sus posibles relaciones con el proceso de bioadsorción.

Ya que se comprobó que el lecho filtrante fue eficaz con el agua residual sintética, es necesario realizar el análisis económico, puesta en marcha y operación de un sistema que permita la implementación real de este biotratamiento a nivel de las industrias textiles como una técnica alternativa para tratar sus efluentes.

Para la disposición final de la fibra utilizada en el lecho filtrante, esta debería ser encapsulada debido principalmente a la presencia de metales pesados adsorbidos durante el tratamiento.

Realizar el estudio de la Cinética de adsorción en batch para conocer la velocidad con la que transcurre la adsorción del adsorbato por parte del adsorbente.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- Álvarez, J., Escobar, G., Fernández, M., Lavorante, M., & Spitale, M. (2005). *Tratamiento de efluentes de la industria textil*. Obtenido de <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc30/inti7.php>
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauchapé, M. (2006). *Geología y geotécnica. Permeabilidad de suelos*. Rosario.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution, Second Edi*.
- Baldeón, J. (2013). *STUDIO DE RETENCION DE METALES PESADOS EN AGUAS SINTÉTICAS (PREPARADAS EN EL LABORATORIO) UTILIZANDO COMO LECHO FILTRANTE LA FIBRA DE CABUYA FURCRAEA ANDINA COMO ALTERNATIVA DE BIORREMEDIACIÓN*. Riobamba.
- Blanco, A., Gutiérrez, D., & de Blas, O. (2008). *ESTUDIO DE LOS NIVELES DE PLOMO, CADMIO, ZINC Y ARSÉNICO, EN AGUAS DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA*. Salamanca.
- Cardona, A., Cabañas, D., & Zepeda, A. (2013). *Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II)*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/467/46729718001/>
- Castells, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*.
- CEPIS, C. P. (2004). *Informe Técnico sobre la minimización de Residuos Textiles*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/029704.pdf>.
- Collaguazo. (2013). *World Water Assessment Programme (WWAP)*. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/>
- Cuadrado, C. (2017). *ANÁLISIS DE LA FIBRA OBTENIDA DEL RAQUIS DE LA PLANTA MUSA PARADISIACA, UTILIZADA COMO LECHO FILTRANTE EN LA ADSORCIÓN DEL PARÁMETRO COLOR PRESENTE EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL CETITEX AL RÍO GUANO*. Riobamba.
- Cuberos, E., Rodríguez, A., & Prieto, E. (2009). *Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia*. Bogotá.

- Di Luca, G. (2013). *Influencia de Typha domingensis en la acumulación y distribución de contaminantes (Cr, Ni, Zn y P) en el sedimento de humedales naturales y construidos*. Santa Fe, Argentina.
- FAO, O. d. (2016). *Salinización y Sodificación del suelo*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i6471s.pdf>
- Fiorentin, L., Trigueros, D., Módenes, A., Espinoza, F., Pereira, C., Barros, S., & Santos, O. (2010). *Biosorption of reactive blue 5G dye onto drying orange bagasse in batch system: Kinetic and equilibrium modeling*.
- Flores, L. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. México.
- FQPIA, G. d. (2007). *liminación de la demanda química de oxígeno (DQO) refractaria conforme a los documentos de referencia de la IPPC*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2007/12/26/81333>
- García, E., & Fernández, I. (2011). *Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación*. Valencia.
- Gautam, R., Mudhoo, A., Lofrano, G., & Chattopadhyaya, M. (2014). *Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent*.
- Giraldo. (2012). el desarrollo una industria, una necesidad que.sistemaregional. Vo.7- No 2.
- Gordón, M. (2015). *TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE UNA INDUSTRIA TEXTIL DEL CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, CONTAMINADOS CON COLORANTES AZOICOS MEDIANTE EL USO DE UN PROCESO FOTO - FENTON*. Quito.
- Guilar, M., Llorens, M., Meseguer, V., Pérez, A., & Saez, J. (2007). *Tratamiento de Aguas Residuales. Aplicación de la Biosorción para la eliminación de Metales Pesados y Colorantes. En Importancia del Binomio "Suelo Materia Orgánica" en el desarrollo Sostenible*. Merida Yucatán.
- HACH Company. (2000). *Manual de análisis de agua, segunda edición en español*. Colorado.
- Hunger, K. (2003). *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Application*. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=uAzS4Hk2TgwC&pg=%20PR21&lpg=PR21&dq=Industrial+Dyes:+Chemistry,+Properties,+Application,+hunger&source=bl&ots=e4vpHQQ6M1&sig=P8R1EdZXrtahzLmLtCdMfIe-YI8&hl%20=es&sa=X&ei=zno4VKP8GtaOsQSeqoG4Dw&ved=0CEwQ6AEwBg#v=onepage>
- Kiran, N. (2011). *Chemistry of Food Colors*. Obtenido de <http://www.feingold.org/Research/PDFstudies/colors.pdf>.

- MAE, M. d. (2015). *Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental*.
- Olías, M., Cerón, J., & Fernández, I. (2005). *Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS)*. Huelva.
- ONUWI, O. d. (2003). *Cómo favorecer una industria más limpia en beneficio de todos*. Obtenido de <http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/pdf/chapes.pdf>.
- Otiniano, M. (2008). *Biorremediación de cromo VI de aguas residuales de curtiembres por Pseudomonas sp y su efecto sobre el ciclo celular de Allium cepa*. Lima.
- Pérez, R., Calzado, O., Cascaret, D., & Tur, E. (2008). *Adsorción de Cr(VI) por Cocos nucífera L. en residuales de Fibrocemento en Santiago de Cuba*. Cuba.
- Rahman, A., Urabe, T., & Kishimoto, N. (2013). *Color Removal of Reactive Procion Dyes by Clay Adsorbents*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.038>
- Reyes, P. (2007). *ANOVA DE DOS VIAS (Un factor y una variable de bloqueo)*.
- Rico, G. (2013). Tratamiento para la eliminación del color en aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería Ambiental* , 5.
- Ritter, A., Machín, N., & Regalado, C. (2005). *Caracterización hidrológica y curvas de calibración específica del sensor de humedad EC-5 en sustratos de lana de roca y fibra de coco* .
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). *Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative*.
- Rodier, J. (2010). *Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona.
- Romero, J. (2015). *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Sala, L., García, S., González, J., Frascaroli, M., Bellú, S., Mangiameli, F., . . . Salas, J. (2010). *Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho*.
- Salazar, L. (2009). *Tratamiento de aguas residuales*. *INGENIERÍA Y DESARROLLO* , 17.
- Sancha, A. (2002). *Presencia de Cobre en Aguas de Consumo Humano*:. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/sancha.pdf>

- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2001). *Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales*. Valdivia.
- Sharma, S., & Sanghi, R. (2012). *Advances in Water Treatment and Pollution*.  
Obtenido de  
<http://books.google.com.ec/booksid=thEigV6yl64C&pg=PA1&dq=Advances+in+Water+Treatment+ad+Pollution+Prevention,+sharma+y+sanghi+2012&hl=es&sa=X&ei=ioc4VOCVJ8risAT4v4E4&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=Advances%20in%20Water%20Treatment%20and%20Pollution%20Prevention>
- Tapia, P., Santander, M., Pávez, O., Valderrama, L., Guzmán, D., & Romero, L. (2011). *Biosorción de iones cobre con biomasa de algas y orujos deshidratados*.
- Tejada, C., Herrera, A., & Ruiz, E. (2016). *Utilización de biosorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios*. Obtenido de  
[https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia\\_en\\_desarrollo/article/view/4228](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_en_desarrollo/article/view/4228)
- Tejada, C., Villabona, A., & Garcés, L. (2015). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*.
- Torres, N., & Gaibor, K. (2015). *ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL OLOTE O TUSA DE MAÍZ PARA LA REDUCCIÓN DEL COLOR EN AGUAS RESIDUALES DE LA HILANDERÍA GUIJARRO CANTÓN GUANO*.  
Riobamba.
- Vélez, I. (2004). *Decisiones empresariales bajo riesgo he incertidumbres*.
- Yagub, M., Sen, T., Afroze, S., & Ang, H. (2014). *Dye and its removal from aqueous solution by adsorption*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yonni, F., Fasoli, H., Giaii, M., & Á. H. (2008). *Estudio de la biodegradabilidad y ecotoxicidad sobre colorantes textiles*. Buenor Aires.

## 9. ANEXOS.

### Anexo 1. Descripción de los procedimientos para la caracterización de la fibra *musa paradisiaca*.

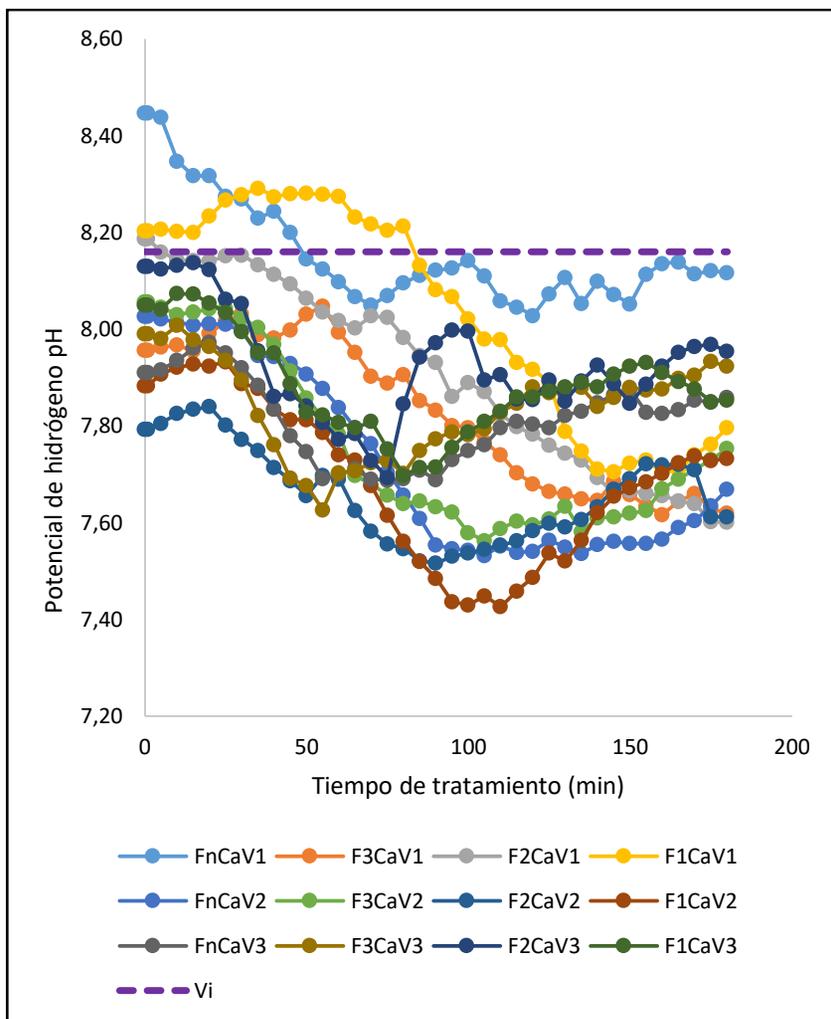
Parámetro	Procedimientos
<b>Potencial de Hidrógeno (pH).</b>	Se utilizó el método - MÉTODO 4500 H+ (STANDARD METHODS, 2005), para lo cual se cortó en trozos pequeños la fibra y se preparó una solución al 1.5% de agua destilada, dejando reposar por 24 horas para su lectura en el multiparametros HACH HQ40d.
<b>Porcentaje de humedad</b>	Se realizó por el método gravimétrico. Primero se tara el crisol, luego se pesa 1.50g de fibra, colocar la muestra en la estufa a 105 °C y esperar un lapso de 4 horas. Enfriar la cápsula en el desecador unos 20 minutos y pesa. De nuevo introducir la muestra en la estufa durante 1 hora y dejar enfriar la cápsula en el desecador unos 20 minutos y pesar hasta peso constante. Para calcular se utiliza la ecuación (1) (García & Fernández, 2011) $\% \text{ H} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \quad (1)$ Dónde: $m_1$ es la masa del crisol (gramos), $m_2$ es la masa del crisol con la muestra antes del secado (gramos), $m_3$ es la masa del crisol más la muestra desecada (gramos).
<b>Porcentaje de cenizas.</b>	Se determinó según el Método 2540.E (STANDARD METHODS, 2005). Colocar en el horno de mufla a 550 °C un crisol durante 15 minutos o más, sacar el crisol enfriarlo en un desecador durante al menos 1 hora y una vez enfriado a temperatura ambiente pesar hasta obtener peso constante, pesar 1.5 g de fibra en el crisol tarado, se ubica sobre la placa de calentamiento y se incrementa lentamente la temperatura hasta que cese el desprendimiento de humo y las muestras aparezcan totalmente carbonizadas, de inmediato colocar el crisol en el interior de horno de mufla lo más cerca posible al centro e incinerar durante un lapso de 3 horas a 550° C. Sacar el crisol de la mufla y colocarlo en un desecador durante 1 hora y dejarlos enfriar. Una vez enfriado se pesa hasta llegar a peso constante, se registra los datos y se utiliza la siguiente ecuación (2) para obtener el % de ceniza: $\% \text{ Cenizas} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} * 100 \quad (2)$ Dónde: $m_2$ : masa en gramos de la cápsula con las cenizas, $m_1$ : masa en gramos de la cápsula con la muestra, $m_0$ : masa en gramos de la cápsula vacía.
<b>Densidad de la fibra:</b>	se realizó mediante la cantidad de fibra seca en un cilindro de diámetro interno $D = 6.4$ cm, altura $L = 15.3$ cm, utilizando la siguiente ecuación (3) (Flores, 2010): $D = \frac{m}{V} \quad (3)$ Dónde: $D$ : es la densidad, $m$ : es la masa de la fibra seca y $V$ : es el volumen del cilindro utilizado.

Elaborado por: Autor

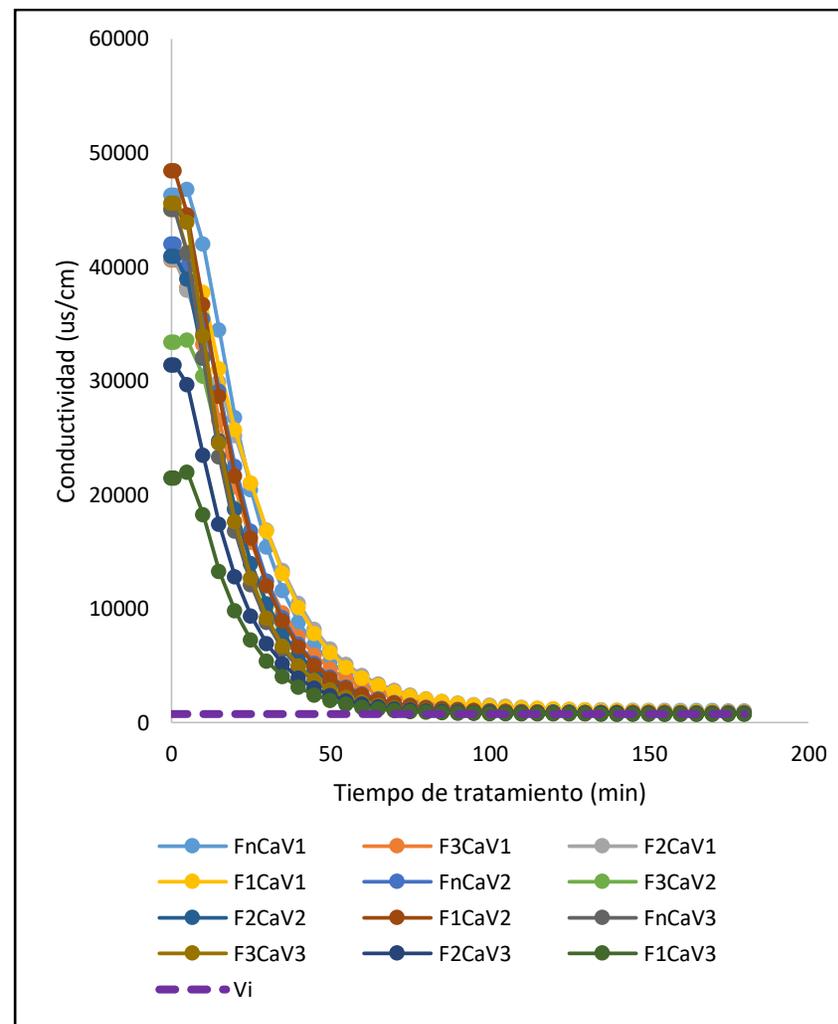
Parámetro	Proceso
<b>Determinación porcentaje de lignina</b>	<p>El método que se usó corresponde con la norma TAPPI 222. El método de Hidrolisis Ácida Cuantitativa practica una hidrolisis de dos etapas: la primera con ácido sulfúrico al 72% que hidroliza los polisacáridos en oligosacáridos y una segunda al 4% que rompe los oligómeros en monosacáridos. Se tomó la cantidad próxima a 1 gramo libre de extraíbles la muestra se colocó en un vaso de precipitado de 50 ml a la cual se agregaron 15 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 72%, y se mantiene dos horas en agitación, al poco tiempo de adherir el ácido sulfúrico se notará que la muestra se torna oscura, una vez pasado el tiempo, se vació a un vaso de precipitado de 1L y se realizó una disolución al 4% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> agregando agua destilada y se dejó en ebullición suave por 4 horas. Se esperó hasta que la muestra se asentara para decantar y filtrar. Una vez filtrada la muestra se llevó a estufa a 105 ±3°C durante 24 horas y se procedió a pesar. Luego se aplica la siguiente ecuación (4):</p> $\% \text{ Lignina} = \frac{W_0}{W_1} * 100(4)$ <p>Dónde: W<sub>0</sub>: es el peso residuo y W<sub>1</sub>: es el peso seco.</p> <p>Se siguió el método propuesto por (Schulte &amp; Hopkins,1996). Se pesaron 1.5 g de muestra en crisoles de 15 mL, posteriormente fueron colocados en estufa durante 24 h a 105 °C. Las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas. Luego se colocaron durante 2 h en una mufla a 360 °C, posteriormente se transfirieron a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente. El cálculo de CO se realizó, según:</p> $\% \text{ CO} = \frac{P_{105^{\circ}\text{C}} - \text{peso } 360^{\circ}}{\text{peso } 105^{\circ}\text{C}} * 100 (5)$ <p>Donde: %CO= porcentaje de carbono orgánico, P<sub>105°C</sub>= peso de la muestra a 105°C y P<sub>360°C</sub>= peso de la muestra a 360°C</p>
<b>Porcentaje de Carbono orgánico.</b>	<p>Se calculó el volumen de agua en una muestra de sustrato saturada de dimensiones conocidas. La diferencia de peso de la muestra saturada y una vez secada en estufa a 105°C, permite calcular la porosidad con la siguiente ecuación (6), asumiendo una densidad del agua de 1 g/cm<sup>3</sup> (Ritter, Machín, &amp; Regalado, 2005).</p> $n = \frac{P_s - P_{105}}{V} * 100 (6)$ <p>Donde P<sub>s</sub> y P<sub>105</sub> son pesos obtenidos con la balanza de laboratorio para la muestra saturada y seca, respectivamente; V es el volumen de la muestra. Las pruebas de porosidad se las realizara con la fibra normar, la fibra cortada a 1cm, a 2 cm y a 3 cm.</p>
<b>Porosidad de la fibra:</b>	<p>Se determinó mediante la ley de Darcy, la utilización de un permeámetro de sección continua con una celda de diámetro interno D = 6.4 cm, altura L = 15.3 cm. En el otro extremo se regula el caudal de salida que también es constante y se encuentra conectada a la celda. Se puede determinar la permeabilidad a diferentes cargas hidráulicas. La ley de Dary se expresa de la siguiente manera ecuación (7) (Angelone, Garibay, &amp; Cauchapé, 2006):</p> $Q = \frac{h_3 - h_4}{L} A = k * i * A (7)$ <p>Dónde: Q = caudal en m<sup>3</sup>/s. L = longitud en metros de la muestra. k = una constante, actualmente conocida como coeficiente de permeabilidad de Darcy, variable en función del material de la muestra, en m/s. A = área de la sección transversal de la muestra, en m<sup>2</sup>. H<sub>3</sub>= altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante. H<sub>4</sub>= altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la salida de la capa filtrante. Las pruebas de permeabilidad se las realizará con la fibra normar, la fibra cortada a 1cm, a 2 cm y a 3 cm.</p>
<b>Permeabilidad de la fibra:</b>	

Elaborado por: Autor

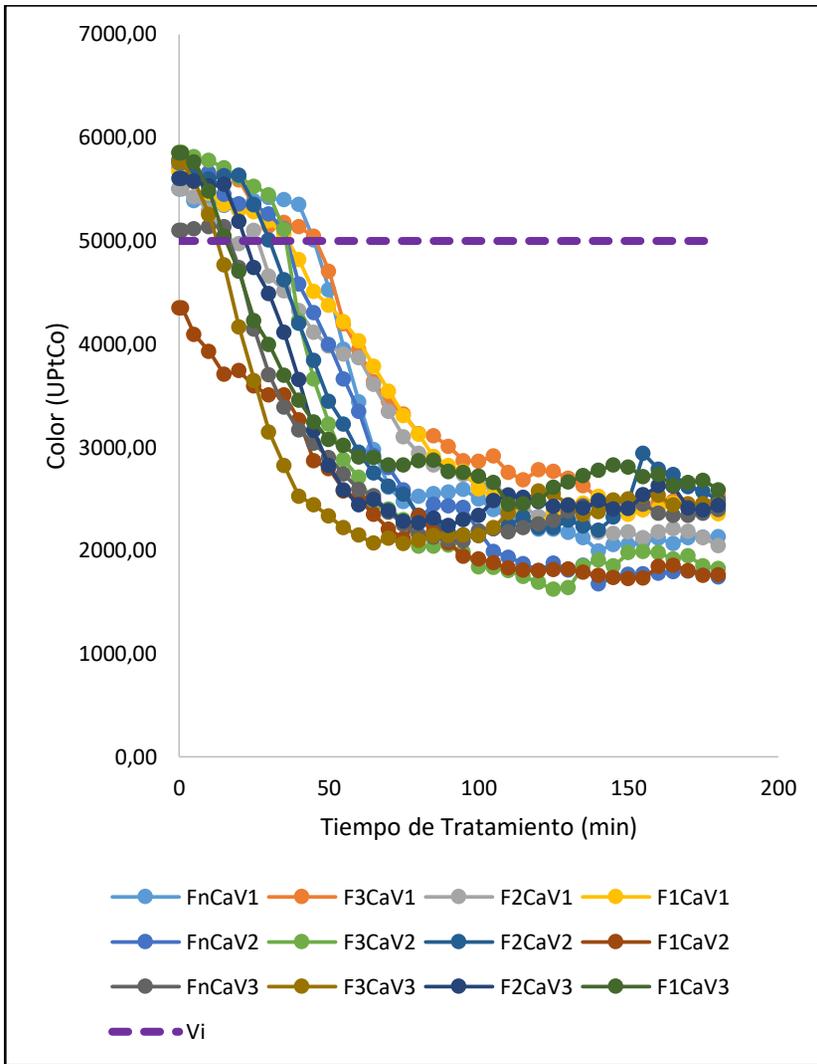
## Anexo 2. Resultados de la tratabilidad.



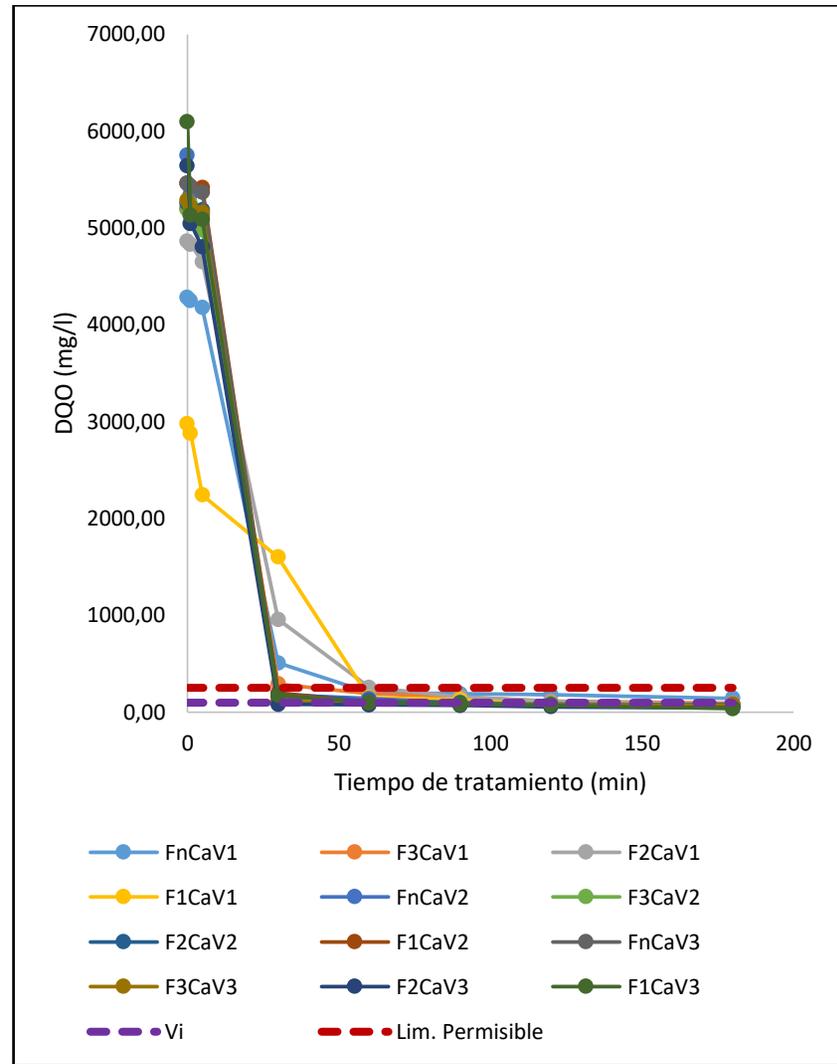
**Figura 15.** Remoción de pH a concentraciones altas.



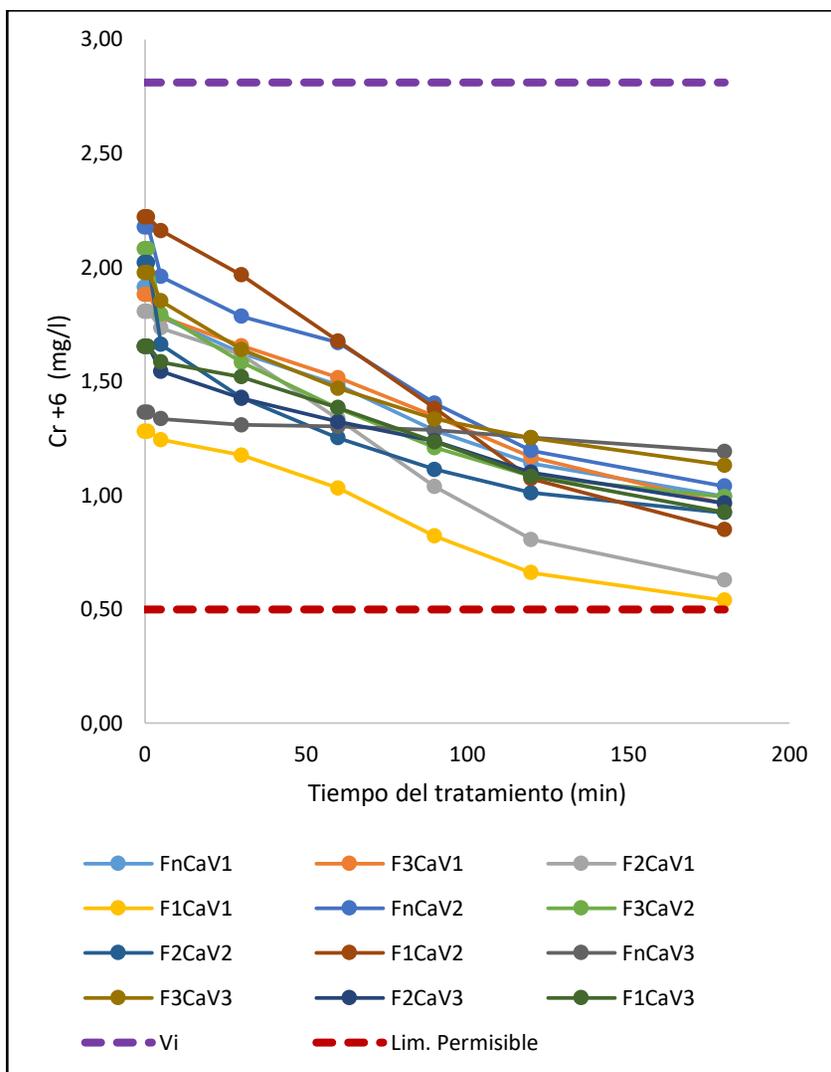
**Figura 16.** Remoción de conductividad a concentraciones altas.



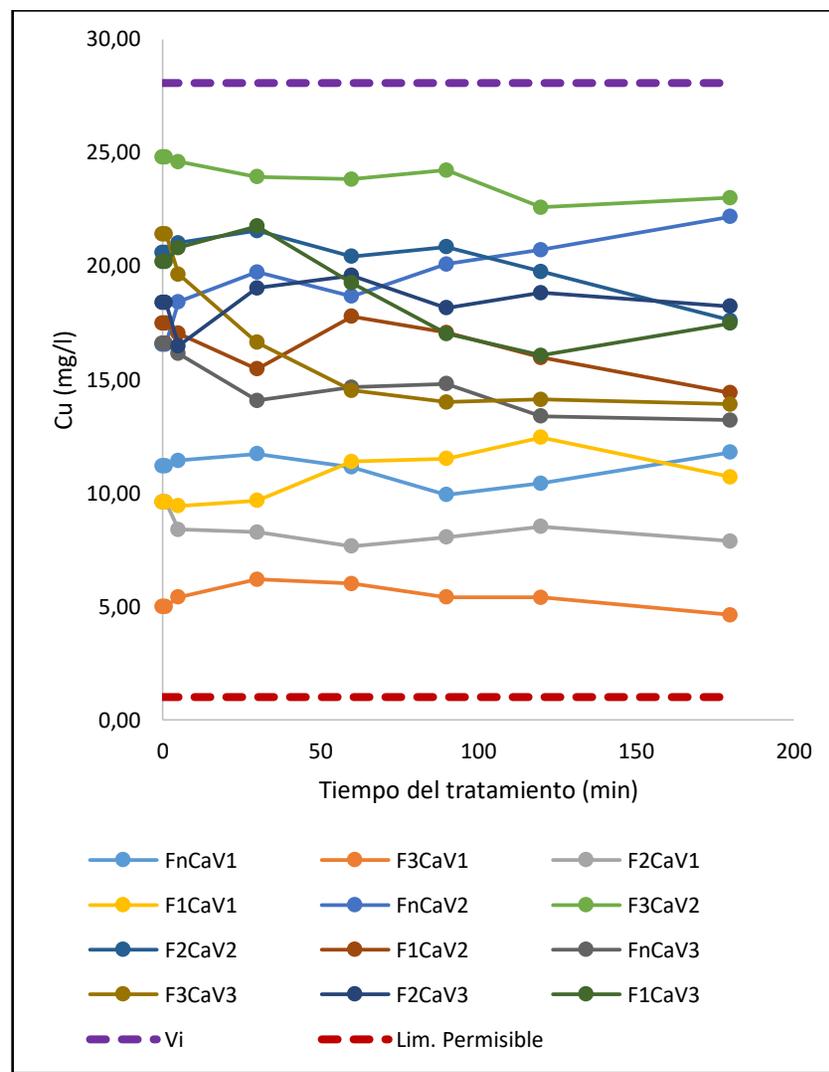
**Figura 17.** Remoción de color a concentraciones altas



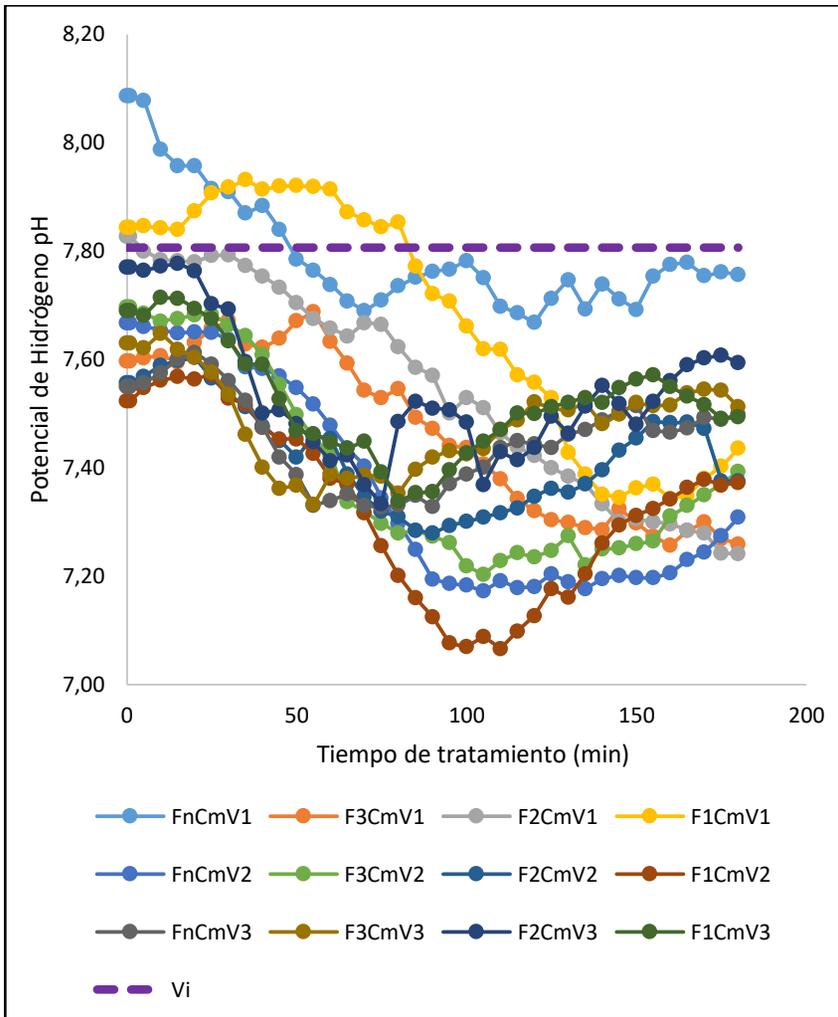
**Figura 18.** Remoción de DQO a concentraciones altas



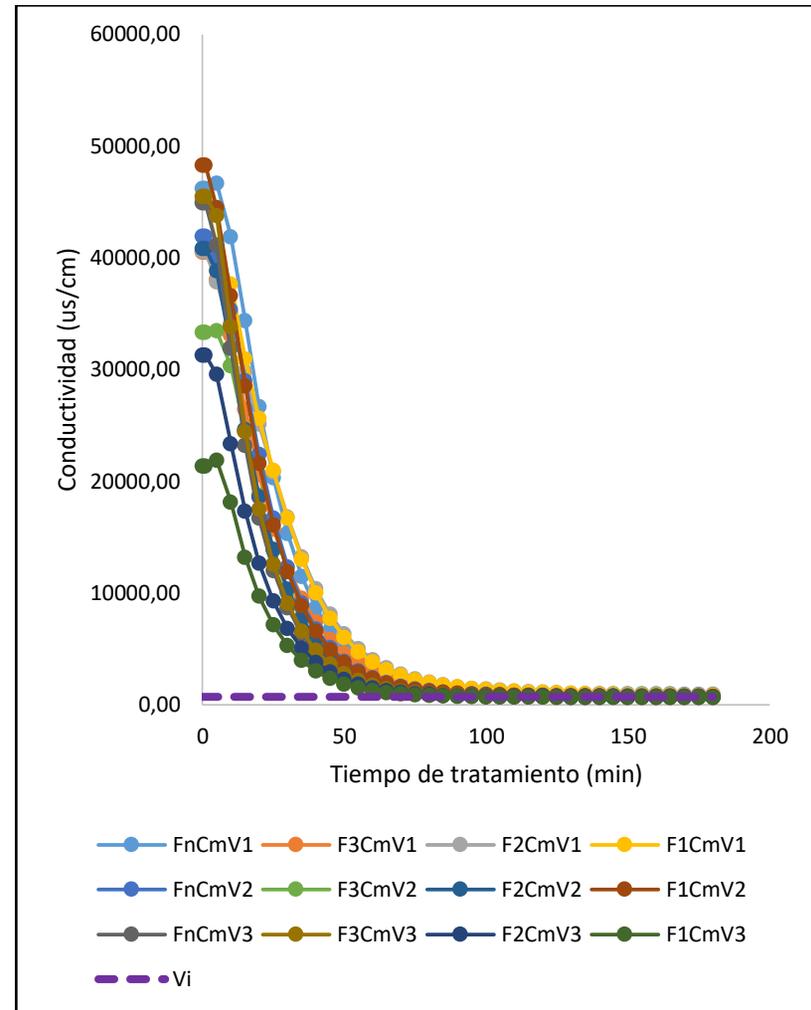
**Figura 19.** Remoción de Cr<sup>+6</sup> a concentraciones altas



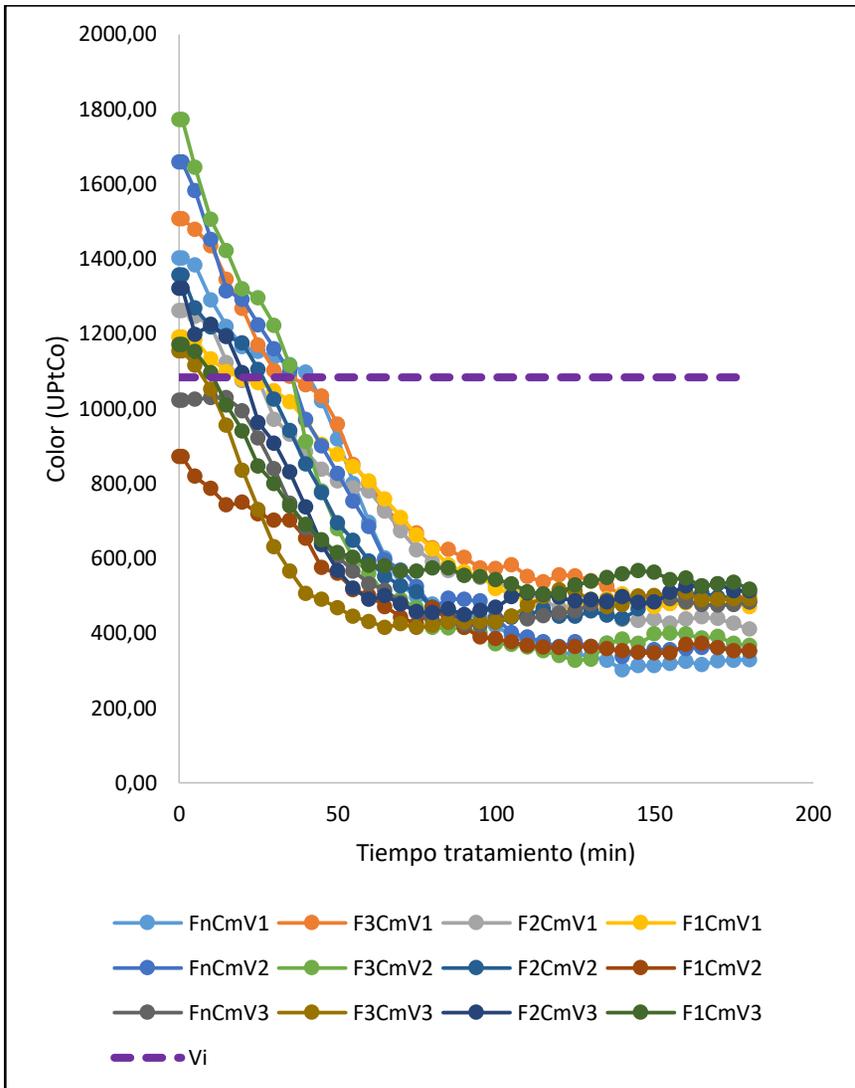
**Figura 20.** Remoción de Cu a concentraciones altas.



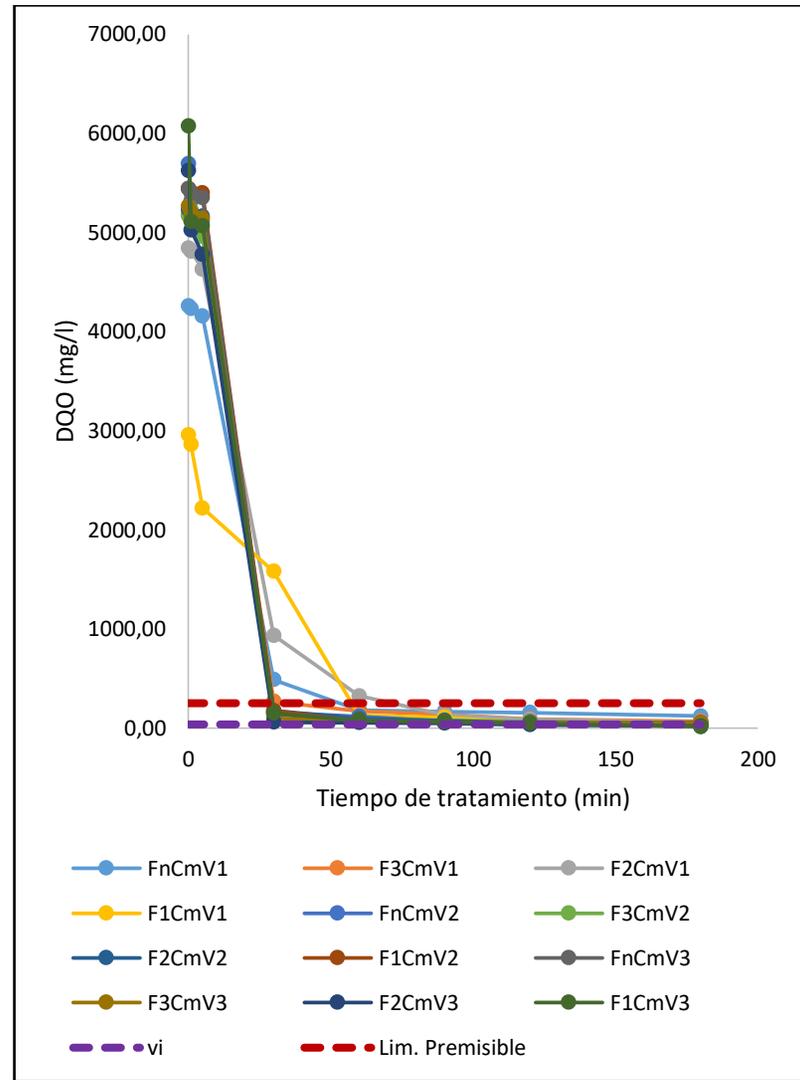
**Figura 21.** Remoción de pH a concentraciones medias.



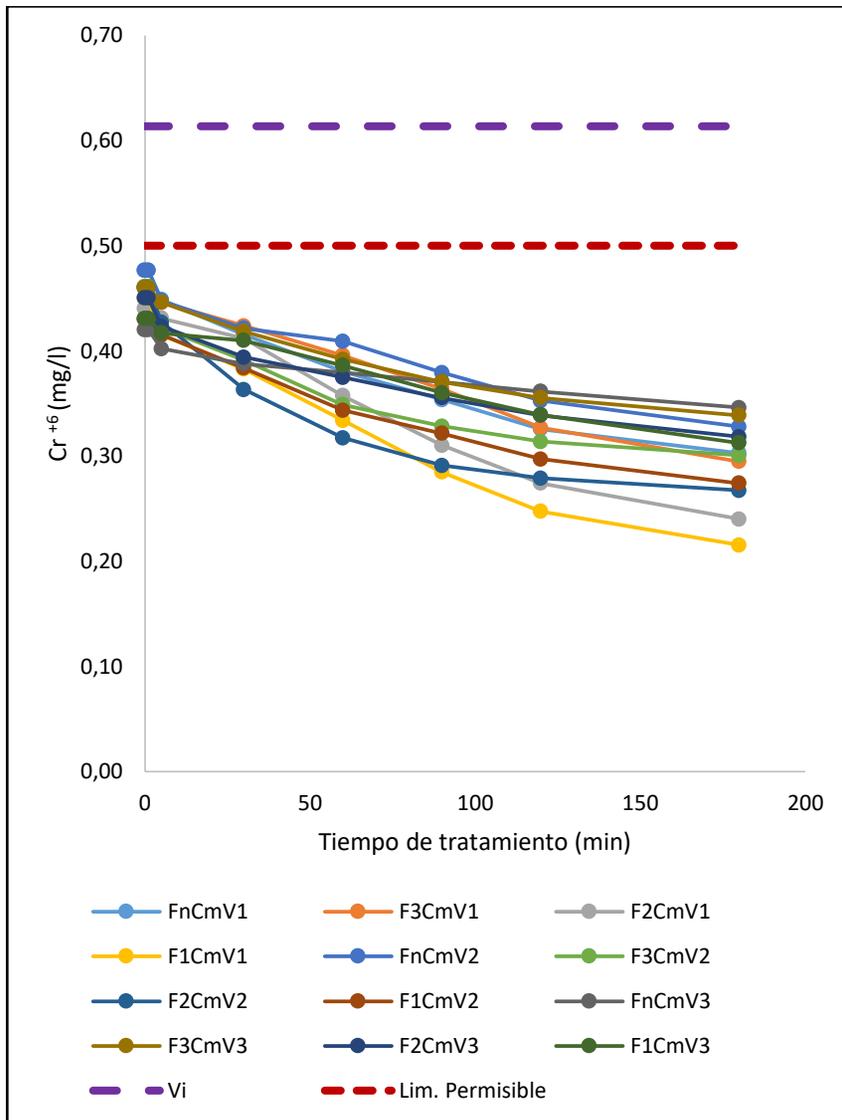
**Figura 22.** Remoción de conductividad a concentraciones medias.



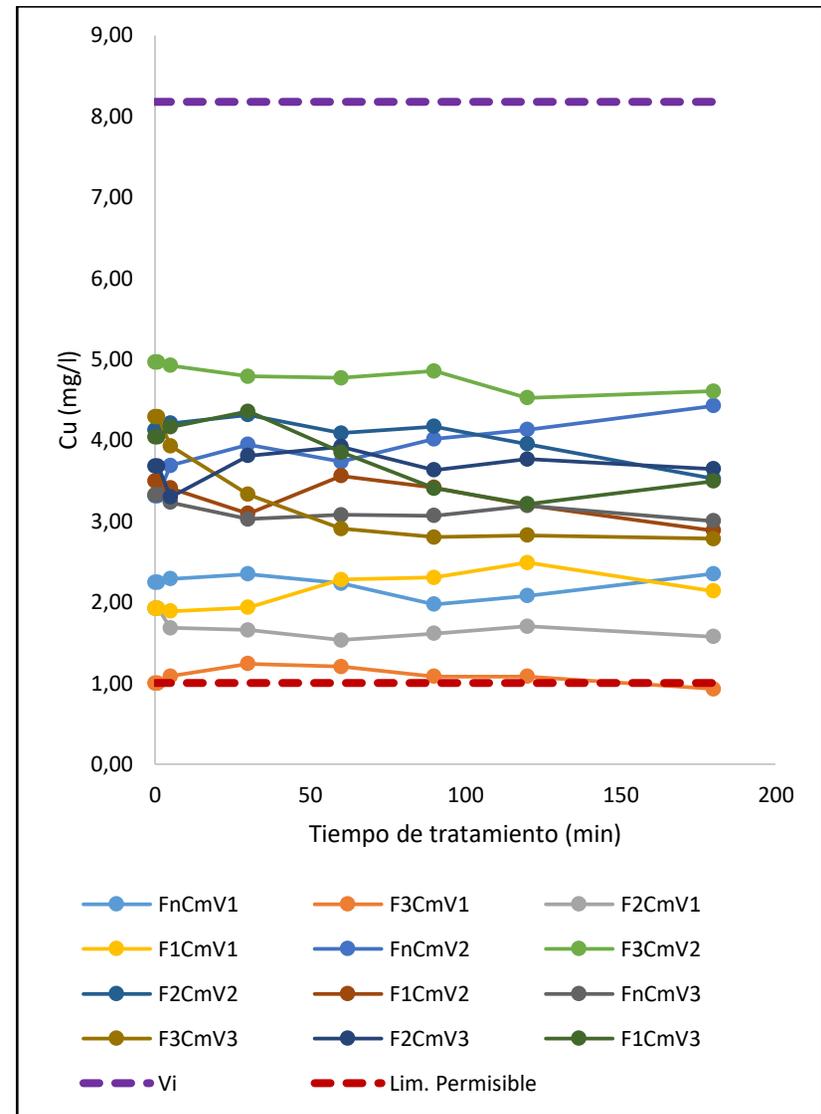
**Figura 23.** Remoción de color a concentraciones medias.



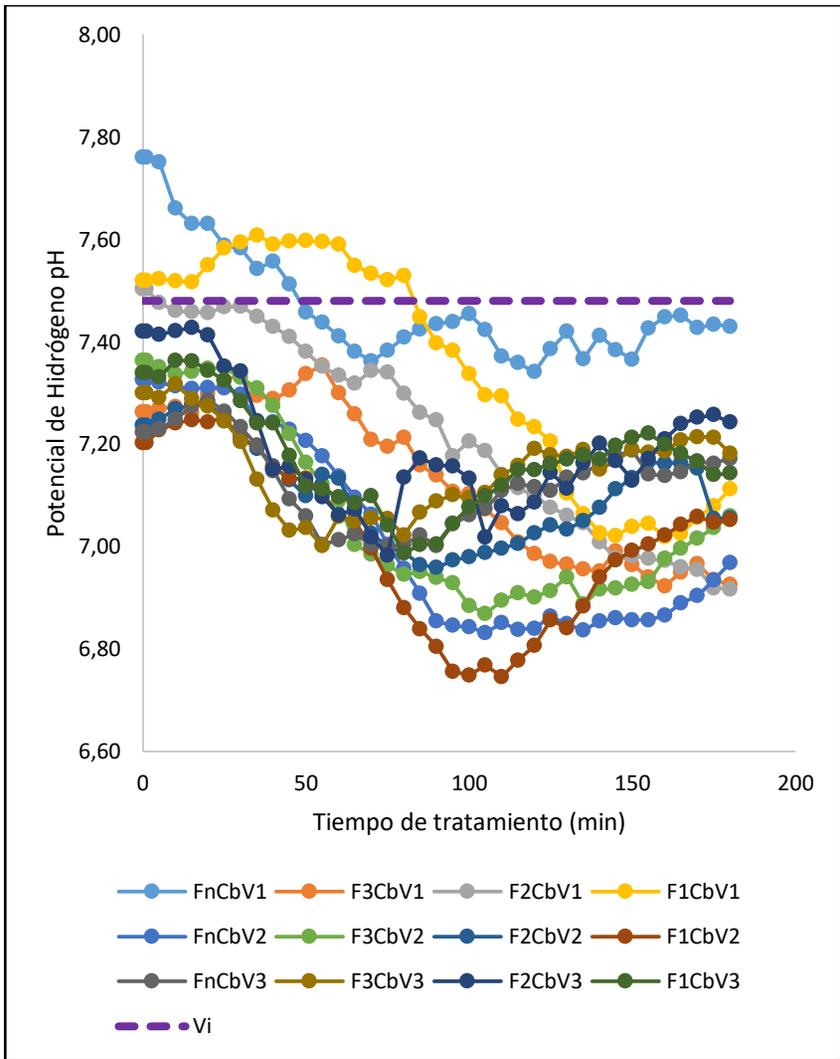
**Figura 24.** Remoción de DQO a concentraciones medias.



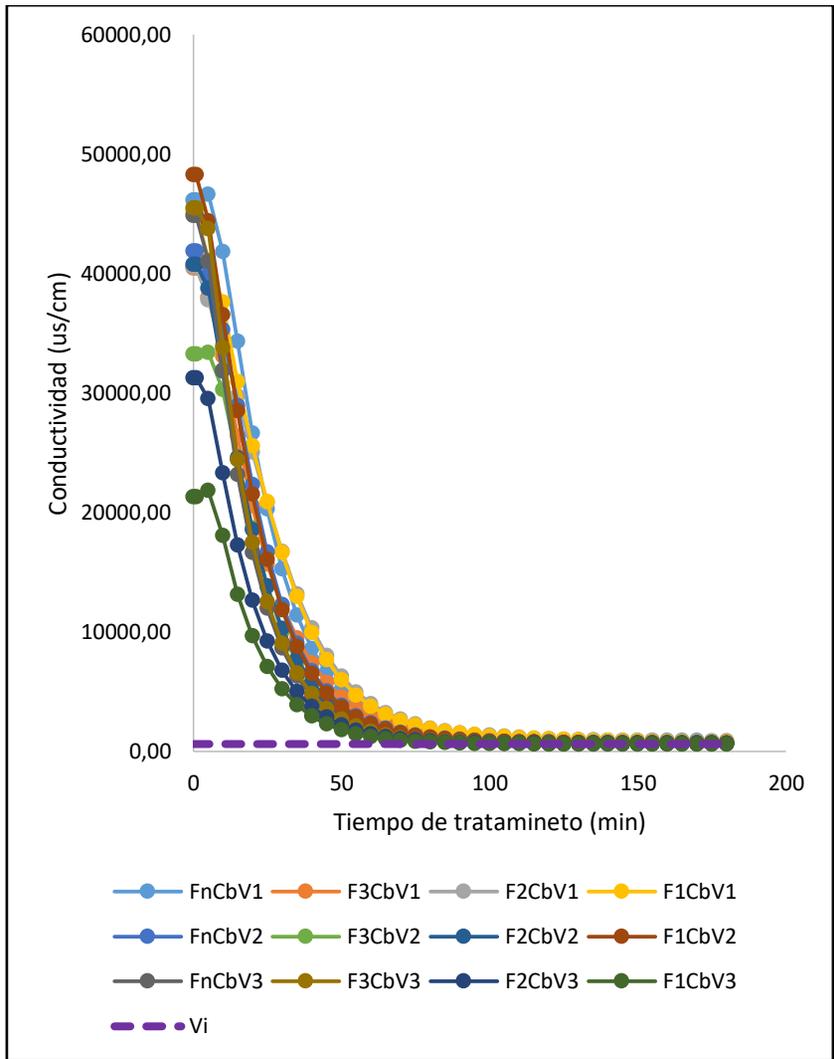
**Figura 25.** Remoción de Cr<sup>+6</sup> a concentraciones medias.



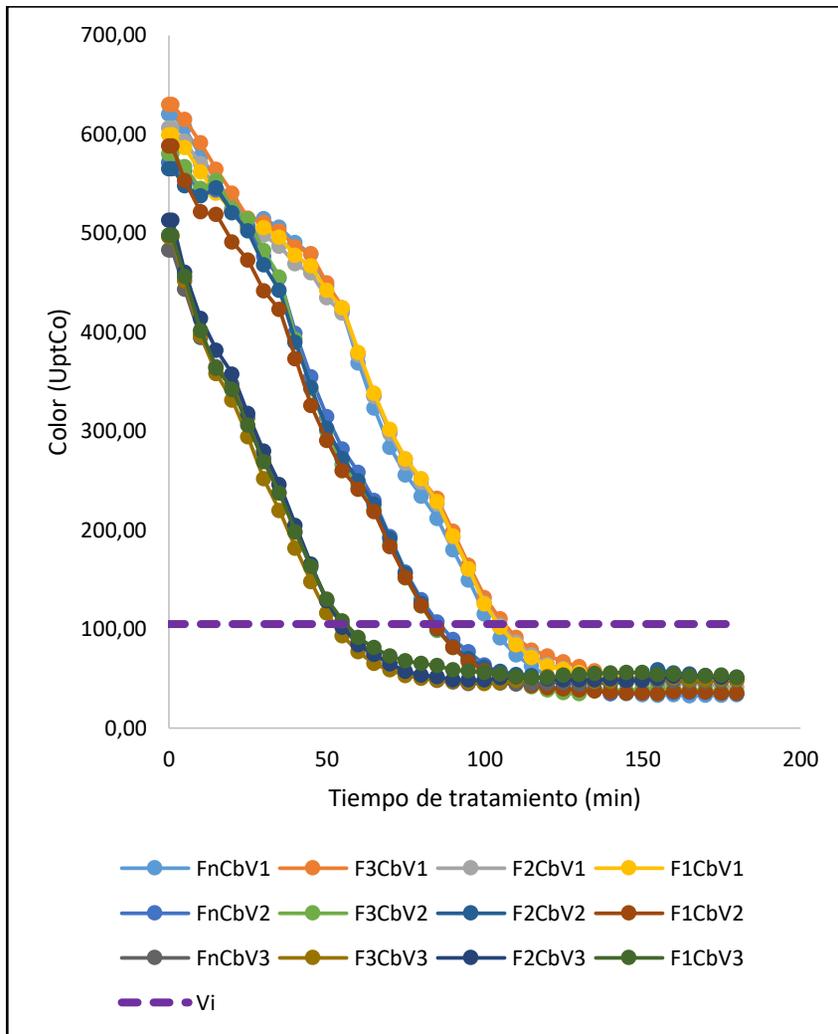
**Figura 26.** Remoción de Cu a concentraciones medias.



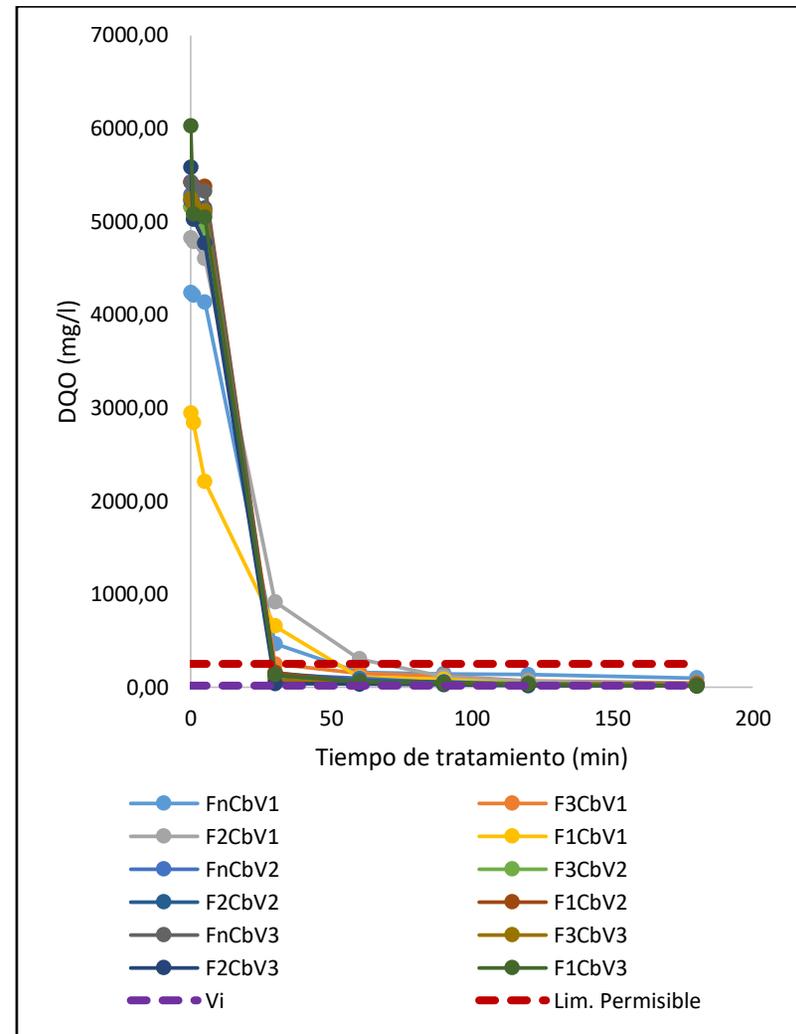
**Figura 27.** Remoción de pH a concentraciones bajas.



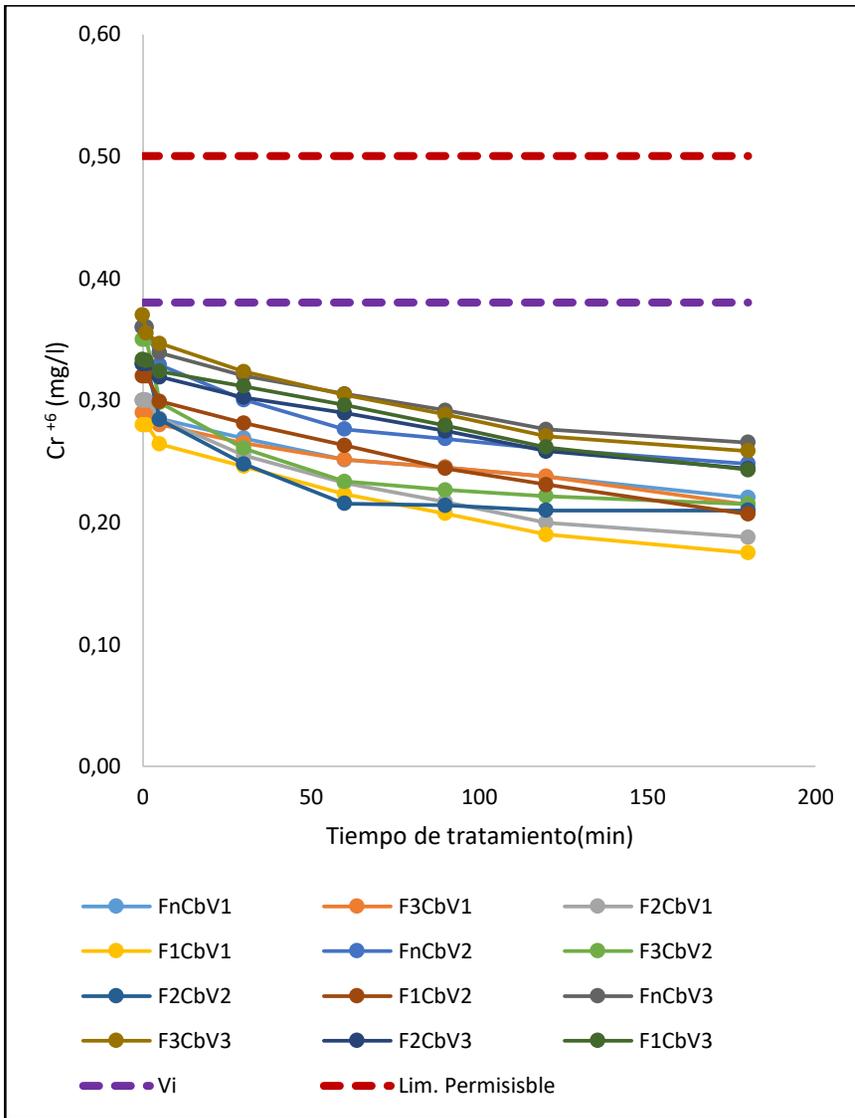
**Figura 28.** Remoción de conductividad a concentraciones bajas.



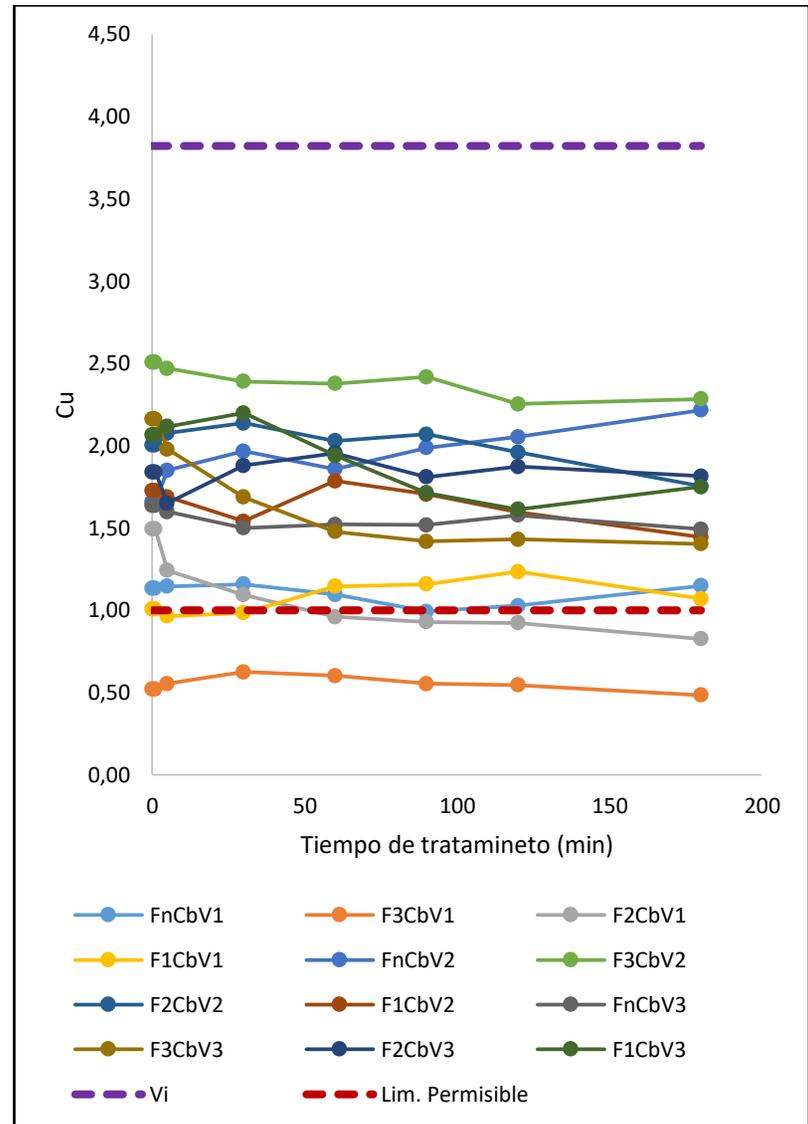
**Figura 29.** Remoción de color a concentraciones bajas..



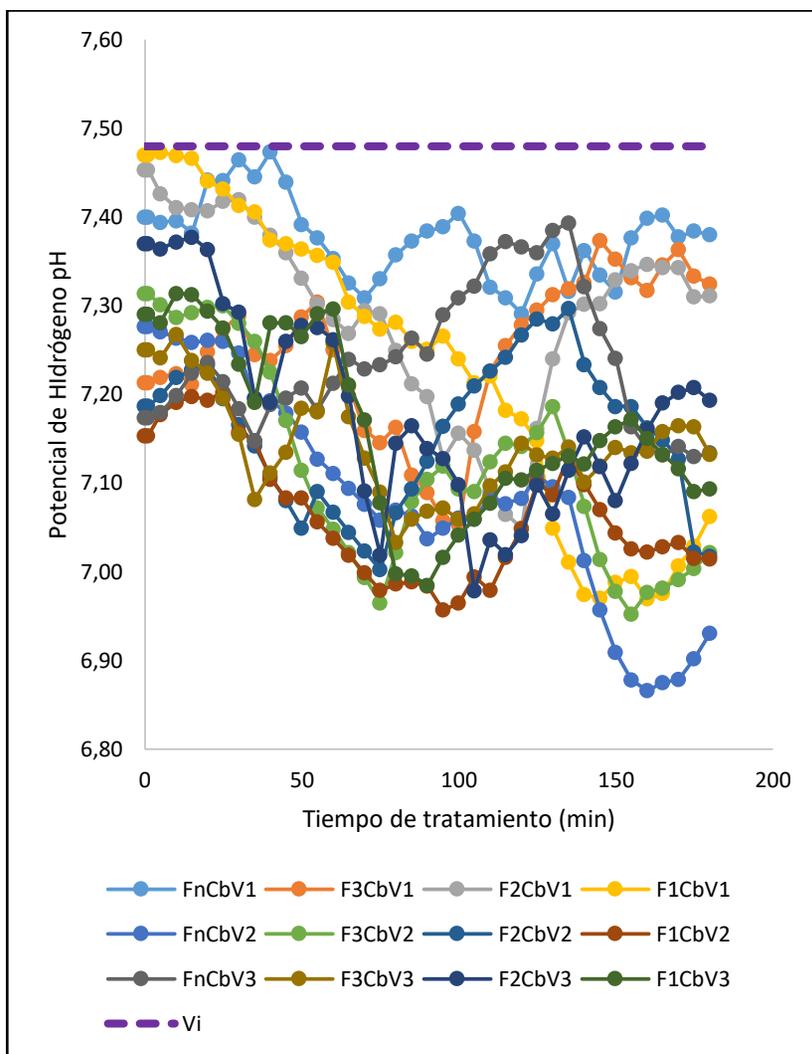
**Figura 30.** Remoción de DQO a concentraciones bajas.



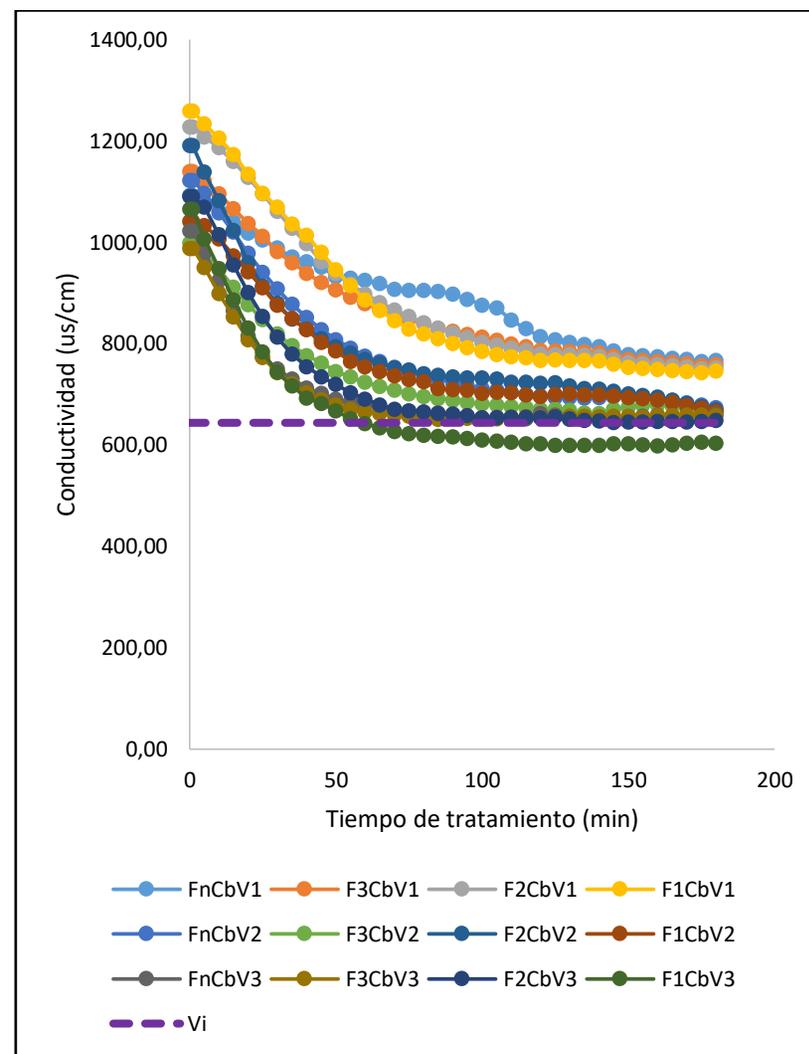
**Figura 31.** Remoción de Cr<sup>+6</sup> a concentraciones bajas.



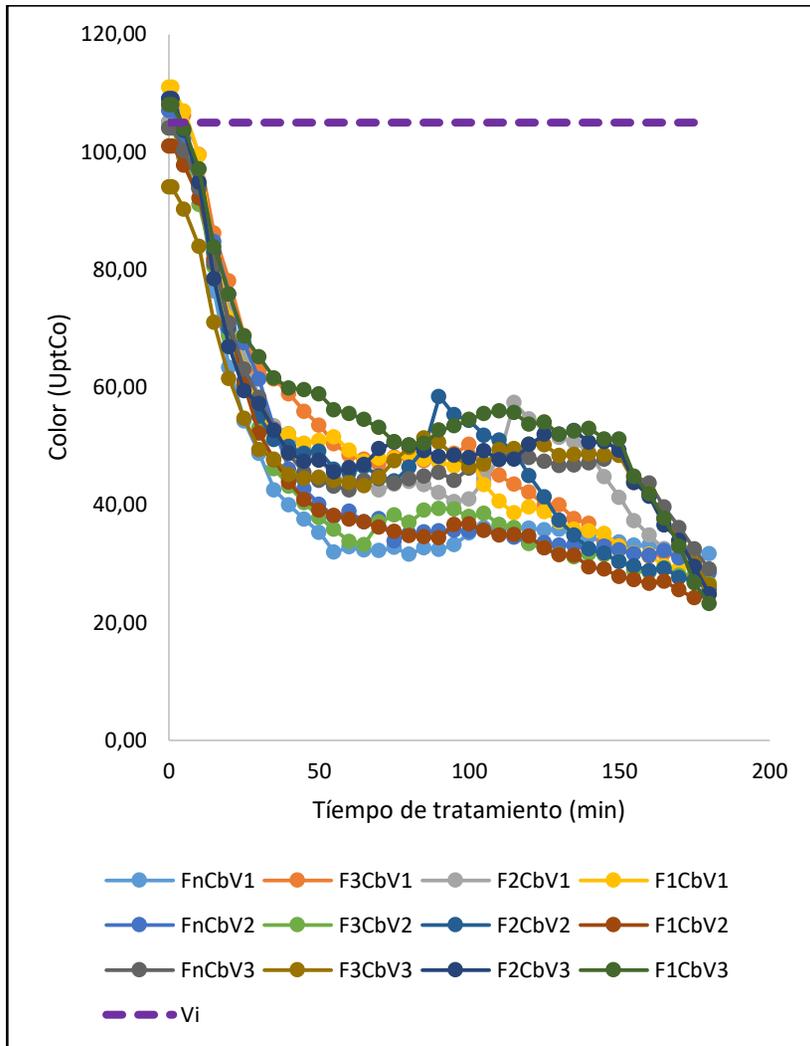
**Figura 32.** Remoción de Cu a concentraciones bajas.



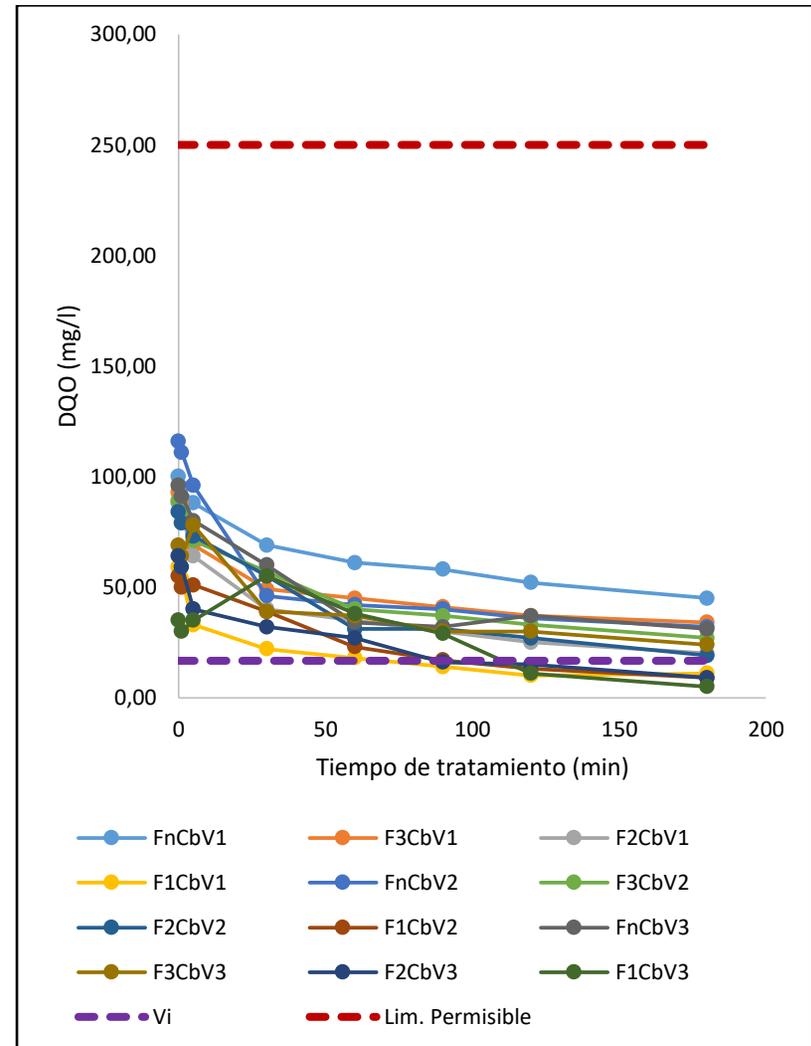
**Figura 33.** Remoción de pH a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.



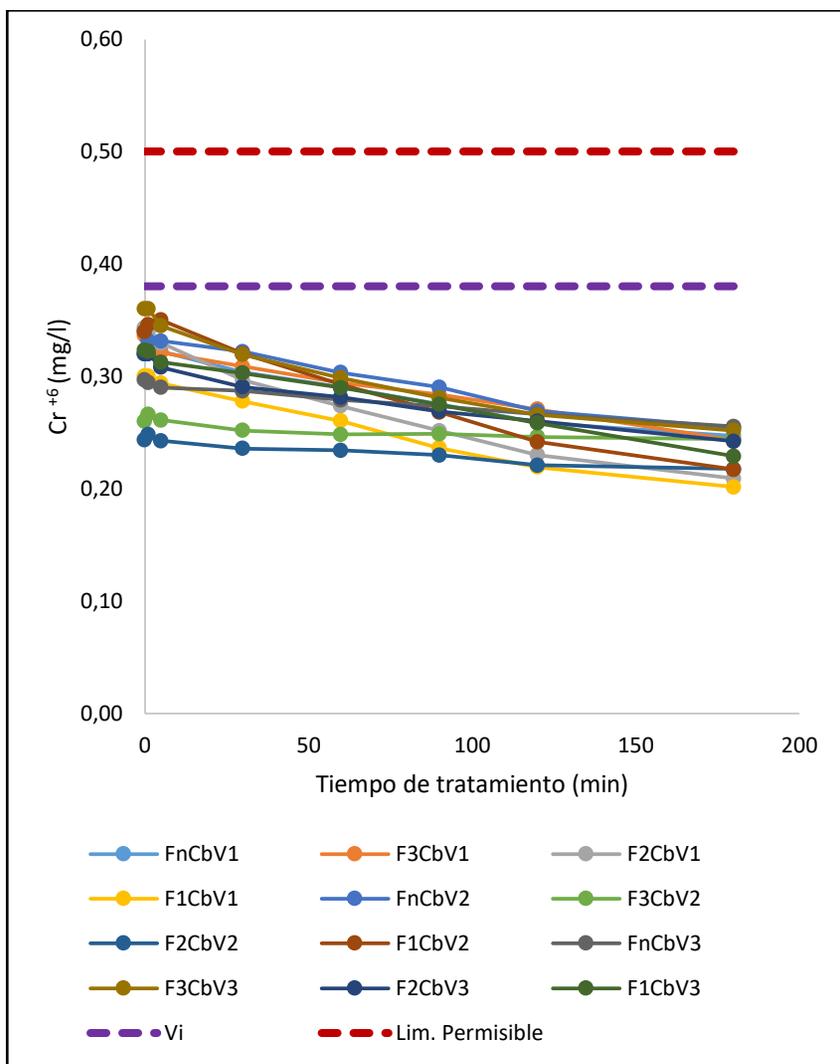
**Figura 34.** Remoción de conductividad a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.



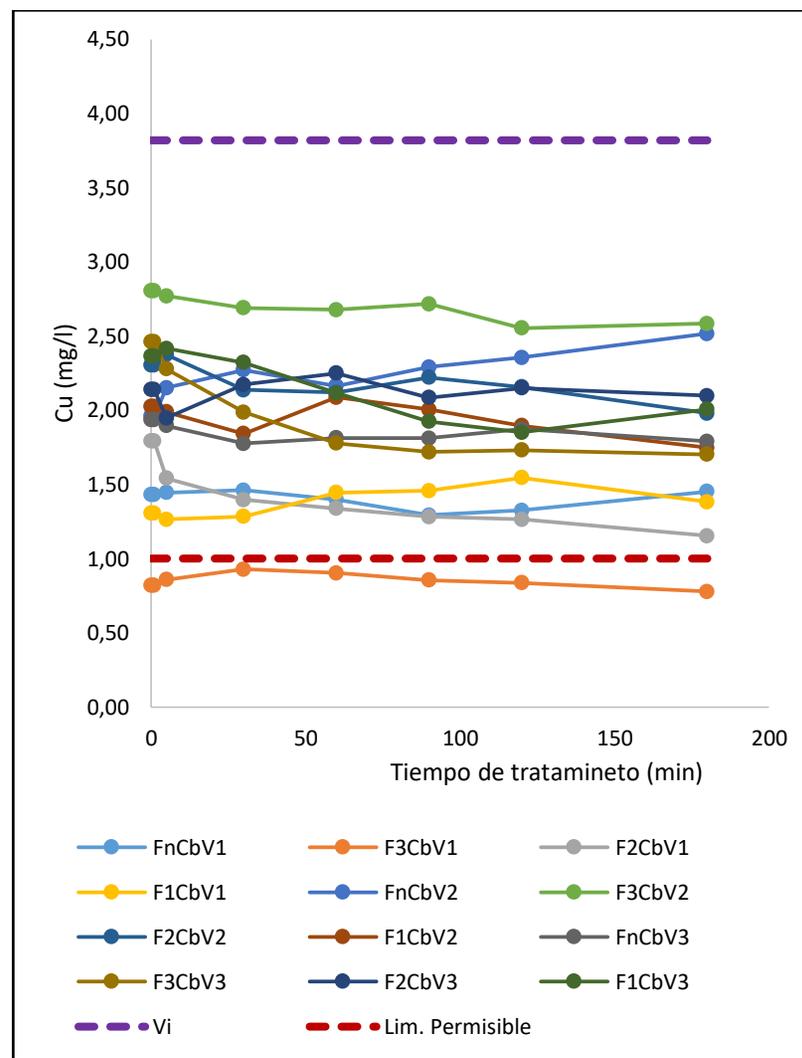
**Figura 35.** Remoción de color a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.



**Figura 36.** Remoción de DQO a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.



**Figura 37.** Remoción de Cr<sup>+6</sup> a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.



**Figura 38.** Remoción de Cu a concentraciones bajas con pre lavado de fibra.

**Anexo 3. Fibra *musa paradisiaca* utilizada en el tratamiento.**



**Anexo 4. Caracterización agua residual sintética.**



