

**EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE ADSORCIÓN A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS  
CAPILARES DE COMPUESTOS DE ORIGEN FENÓLICO EN MUESTRAS DE  
SOLUCIONES ACUOSAS PROVENIENTES DEL CANAL ARZOBISPO EN BOGOTÁ  
D. C.**

**LAURA VALENTINA MORENO ARCE**

**GABRIELA TORRES SÁNCHEZ**

**Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**JUAN ANDRÉS SANDOVAL HERRERA**

**Ing. Químico**

**Codirector**

**NELSON FERNÁNDEZ BARRERO**

**Ing. Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D. C.**

**2023**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---



---

Juan Andrés Sandoval Herrera

Director

---

Presidente

Jurado



---

Nelson Fernández Barrero

Codirector

---

XXXX

Jurado

---

XXXX

Jurado

Bogotá D.C., enero de 2023

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente Institucional de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, por estar presentes en cada paso que he dado a lo largo de mi vida y por el amor incondicional que me ha llevado a cumplir cada uno de mis sueños.*

Laura Valentina Moreno Arce

*A mis padres, por el amor que me han brindado, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y por motivarme constantemente a alcanzar mis sueños.*

Gabriela Torres Sánchez

## AGRADECIMIENTOS

A Dios.

*Por darnos la sabiduría y fuerza para culminar esta etapa académica.*

A nuestro director y codirector del proyecto de graduación, Ing. Juan Andrés Sandoval Herrera e Ing. Nelson Fernández Barrero.

*Por su dedicación, paciencia, risas y apoyo a lo largo del proyecto de investigación.*

A nuestros padres: Jairo y María del Pilar; y, Pedro Antonio y Sandra Milena.

*Por el apoyo emocional y económico, por confiar y creer en nosotras, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.*

A nuestros docentes de la Universidad de América.

*Por los aprendizajes adquiridos.*

A nuestras familias.

*Por hacer nuestro pilar en esta fase de nuestras vidas.*

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho posible la realización de este documento.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	4
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Contaminación de aguas	5
1.2 Adsorbentes	6
1.2.1 Adsorción	6
1.2.2 Caracterización de la estructura capilar como agente de adsorción	10
1.2.3 Otros adsorbentes orgánicos	12
1.3 Fenoles	12
1.3.1 Afectaciones al medio ambiente	14
1.3.2 Toxicidad y afectaciones	15
1.3.3 Métodos de determinación de fenoles	15
2. MARCO LEGAL	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 Materia prima	21
3.1.1 Cabello humano	21
3.1.2 Agua residual	21
3.1.3 Muestra sintética	22
3.2 Pre-experimentación	22
3.2.1 Método para la determinación de fenoles	22
3.2.2 Lavado de cabello	25
3.2.3 Preparación de las muestras	25
3.3 Experimentación	26

3.3.1	Ajuste de temperatura	26
3.3.2	Filtración	27
3.3.3	Determinación de contenido fenólico	28
3.3.4	Procedimiento para muestra sintética	29
4.	RESULTADOS	30
4.1	Curva de calibración	30
4.2	Análisis cuantitativo	32
4.2.1	Muestra agua residual	32
4.2.2	Muestra sintética	34
5.	ANÁLISIS DE VIABILIDAD	42
5.1	Viabilidad técnica	42
5.2	Equipos y costos	44
5.2.1	Lavadores de tornillo para finos	44
5.2.2	Cámara de secado	45
5.2.3	Calderas y/o termotanque	46
5.2.4	Tanque de filtro de agua	47
5.2.5	Tanques de almacenamiento	48
5.3	Viabilidad económica	48
5.4	Viabilidad ambiental	50
6.	CONCLUSIONES	52
	BIBLIOGRAFÍA	53

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Proceso de adsorción</i>	6
<b>Figura 2.</b> <i>Adsorción física y química</i>	7
<b>Figura 3.</b> <i>Isotermas de adsorción</i>	7
<b>Figura 4.</b> <i>Composición del cabello</i>	11
<b>Figura 5.</b> <i>Estructura química del fenol</i>	13
<b>Figura 6.</b> <i>Estructura molecular de los fenoles usados para la identificación en las muestras de aguas residuales</i>	16
<b>Figura 7.</b> <i>Montaje de sonda de extracción por membrana líquida soportada</i>	18
<b>Figura 8.</b> <i>Instrumento para recolección de agua en el canal Arzobispo de Bogotá D. C.</i>	22
<b>Figura 9.</b> <i>Resultados colorimetría curva de calibración para la determinación de fenoles</i>	24
<b>Figura 10.</b> <i>Frascos de vidrio marcados y con la cantidad de cabello requerida</i>	26
<b>Figura 11.</b> <i>Proceso de filtración de las mezclas de agua residual y cabello</i>	27
<b>Figura 12.</b> <i>Solución filtrada resultante de las mezclas de agua residual y cabello</i>	27
<b>Figura 13.</b> <i>Resultado colorimetría muestras N° 1, 4 y 7</i>	28
<b>Figura 14.</b> <i>Resultado colorimetría muestras N° 2, 5 y 8</i>	28
<b>Figura 15.</b> <i>Resultado colorimetría muestras N° 3, 6 y 9</i>	29
<b>Figura 16.</b> <i>Curva de calibración del método fotométrico directo</i>	31
<b>Figura 17.</b> <i>Curvas del comportamiento del porcentaje de remoción con respecto al tiempo</i>	39
<b>Figura 18.</b> <i>Curvas del comportamiento del porcentaje de remoción con respecto a la temperatura</i>	40
<b>Figura 19.</b> <i>Proceso de adsorción de fenoles por medio de estructuras capilares</i>	42
<b>Figura 20.</b> <i>Máquina de lavado para material fino</i>	45
<b>Figura 21.</b> <i>Cámara de secado</i>	46
<b>Figura 22.</b> <i>Caldera</i>	46
<b>Figura 23.</b> <i>Filtro de agua</i>	47
<b>Figura 24.</b> <i>Tanque de almacenamiento</i>	48

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades fisicoquímicas del fenol</i>	14
<b>Tabla 2.</b> <i>Relación entre muestra, temperatura y tiempo</i>	25
<b>Tabla 3.</b> <i>Resultados absorbancia curva de calibración</i>	30
<b>Tabla 4.</b> <i>Resultados absorbancia muestra río Arzobispo</i>	33
<b>Tabla 5.</b> <i>Resultados relación entre tiempo y porcentaje de remoción</i>	34
<b>Tabla 6.</b> <i>Resultados relación entre temperatura y porcentaje de remoción</i>	35
<b>Tabla 7.</b> <i>Resultados generales muestra sintética</i>	37
<b>Tabla 8.</b> <i>Identificación de corrientes</i>	43
<b>Tabla 9.</b> <i>Identificación de etapas y variables</i>	43
<b>Tabla 10.</b> <i>Especificaciones de máquina de tornillos para lavado de finos</i>	44
<b>Tabla 11.</b> <i>Especificaciones filtro de agua</i>	47
<b>Tabla 12.</b> <i>Costos fijos</i>	48
<b>Tabla 13.</b> <i>Consideraciones costos fijos y variables</i>	49

## RESUMEN

Teniendo en cuenta que los compuestos fenólicos son sustancias nocivas para la salud del ser humano y del medio ambiente, los cuales ingresan a los cuerpos de agua a través de los efluentes provenientes de procesos industriales o agrícolas, fue analizada la actividad de adsorción de las estructuras capilares para la remoción de estos en soluciones acuosas; se realizaron nueve experimentos, donde fue estudiado el comportamiento del tiempo y la temperatura con respecto a la absorbancia y por ende a la concentración de fenoles en muestras determinadas.

Es bien conocido que existe una amplia variedad de metodologías para la determinación de fenoles en muestras en estado líquido, sin embargo, en el presente proyecto de investigación, se implementó el método fotométrico directo, en el cual los compuestos de origen fenólico reaccionan con el reactivo 4-aminoantipirina y en presencia de ferricianuro de potasio, de lo cual se obtiene una colorimetría la cual gracias a su intensidad define proporcionalmente la concentración de fenol presente en la muestra estudiada.

Con la práctica realizada y la metodología mencionada, fue posible comprobar como la remoción de dicha sustancia mediante la implementación del cabello humano como adsorbente orgánico, se da casi por completo al transcurrir 90 minutos a una temperatura elevada constante de 50 °C, demostrando así la incidencia que tienen las variables de tiempo y temperatura en dicho proceso.

Palabras clave: Adsorción, remediación, actividad bioquímica, soluciones acuosas.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural que juega un papel primordial en la vida de los seres vivos que habitan en el planeta tierra, esto debido a que contribuye a la estabilidad y regulación de los ecosistemas, lo cual la convierte en un factor decisivo en la subsistencia de la fauna y la flora [1], [2]; adicionalmente, es de vital importancia para el desarrollo del ser humano, ya que está presente en tejidos corporales y órganos vitales, participando en las reacciones metabólicas y catabólicas del cuerpo, y a su vez impacta de manera significativa en la producción de alimentos, la generación de energía eléctrica [3], y el desarrollo socioeconómico, pues según lo estimado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 78% de los puestos de trabajo que constituyen la fuerza laboral mundial dependen del agua [4]; demostrando así como este recurso se encuentra en el epicentro del desarrollo sostenible [3].

Sin embargo, al día de hoy se tiene certeza de que el agua contaminada, definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como “aquella cuya composición haya sido modificada de modo que no reúna las condiciones para el uso que se le hubiera destinado en su estado natural” [5], es una problemática a nivel mundial, donde según lo planteado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), afecta a uno de cada tres habitantes del planeta [6], generando así consecuencias graves como la pérdida de la biodiversidad, alteración de los ecosistemas, pérdidas económicas y afectación a la salud de las personas, desencadenando enfermedades como el cólera, la disentería, infecciones por Giardia, la fiebre tifoidea y la poliomielitis [7], por mencionar sólo algunas de ellas.

A pesar de que la contaminación hídrica en muchas ocasiones se da como consecuencia de fenómenos naturales como las inundaciones, las riadas, los desprendimientos, las avalanchas y los flujos de lodo [8], se debe mayoritariamente a las actividades humanas tales como las tareas agrícolas, pecuarias, acuícolas, forestales, domésticas e industriales, las cuales desencadenan resultados devastadores en el recurso [9]. Las aguas residuales provenientes de industrias como la fabricación de pinturas, producción de resinas fenólicas, industrias férricas, fábricas de papel y celulosa, en su mayoría se encuentran conformadas por una amplia variedad de sustancias lesivas para los cultivos, la fauna y el hombre [10], [11], como lo son los compuestos fenólicos, término que según lo descrito por Eva Gimeno Creus, “engloba a todas aquellas sustancias que poseen

varias funciones fenol, nombre popular del hidroxibenceno, unidas a estructuras aromáticas o alifáticas” [12].

A lo largo de la última década, se ha evidenciado la necesidad de poner en marcha procesos de remoción de fenoles presentes en fuentes hídricas, es allí donde se destacan entre muchos, los adsorbentes orgánicos, o también denominados no-convencionales, verdes o bioadsorbentes, quienes, según lo afirmado “surgen del aprovechamiento de los materiales de desecho que provienen de la industria alimentaria y agrícola; estos son desechos de fruta, residuos vegetales y plantas” [13]. Algunos de ellos son el carbón activado obtenido a partir de semillas de eucalipto [14], la ceniza de bagazo de caña de azúcar [15], el carbón activado modificado con cobre [16], los biopolímeros naturales [17], las nanofibras de carbono [18], el carbón activado granular preparado a partir de bagazo de caña de azúcar [19], el carbón activado obtenido a partir de llantas de caucho [20], los monolitos de carbón activado de cáscara de coco [21], la cascarilla de higuera [22], el carbón activado preparado a partir de pepas de níspero de palo por activación química [23], entre otros.

Teniendo en cuenta lo descrito, en el presente trabajo de investigación se evalúa la actividad de adsorción mediante el uso de estructuras capilares humanas como una alternativa para la remoción de fenol en fuentes hídricas; contribuyendo así al desarrollo e implementación de nuevos procesos para la eliminación de contaminantes tóxicos orgánicos, mediante el uso de desechos igualmente orgánicos, promoviendo el manejo integral de los residuos sólidos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar la efectividad de estructuras capilares en el tratamiento de adsorción de compuestos de origen fenólico en muestras del acuífero del canal Arzobispo de Bogotá.

### **Objetivos específicos**

1. Identificar las afectaciones a nivel de sustrato fenólico del acuífero canal Arzobispo de Bogotá, por medio de un análisis preliminar por medio de espectroscopia.
2. Realizar la preparación de estructuras capilares para ser utilizadas como tratamiento de remediación de aguas provenientes del Canal Arzobispo de Bogotá.
3. Estimar de manera preliminar la viabilidad del adsorbente basado en estructuras capilares de compuestos de origen fenólico de forma industrial, teniendo en cuenta factores económicos y ambientales.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Contaminación de aguas

La actividad industrial incide de manera contundente en los indicadores ambientales que se producen luego del final del ciclo; como es asegurado, todos han sido producidos por actividades industriales y agrícolas, ejerciendo presión sobre el medio ambiente [24].

Se estima que hay cerca de 10.000 tipos de tintes disponibles comercialmente y 700 toneladas de colorantes se producen anualmente en el mundo; los colorantes son producidos todo el año y se utilizan ampliamente en las industrias textil, de teñido y de pintura [25]; se estima que aproximadamente del 2% al 20% de estos colorantes se pierden en los efluentes industriales [26].

Los hidrocarburos poliaromáticos (HAP) se originan a partir de fósiles y biomasa cuando se someten a combustiones incompletas y han sido detectados en altas concentraciones en aguas superficiales y residuales municipales; esto resulta preocupante ya que, en la ciudad de Bogotá, los compuestos de origen orgánico fenólico son arrojados diariamente sin control a los cuerpos hídricos, afectando poblaciones que no poseen recursos para acceder a agua potable, generando con ello un riesgo latente ya que se ha demostrado que estas sustancias son cancerígenas y perjudiciales para el ser humano [11], [27].

Las aguas residuales se encuentran segmentadas según su procedencia como se muestra a continuación [28]:

1. Aguas Residuales Domésticas, (ARD): Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:
  - a. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
    4. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos, y del lavado de ropa, sin incluirse las correspondientes a los servicios de lavandería industrial.
2. Aguas Residuales no Domésticas, (ARnD): Su fuente corresponde a las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, (ARD).

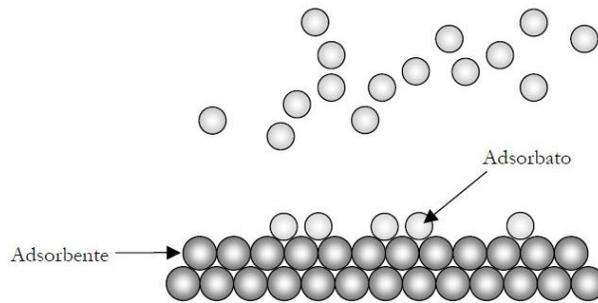
## 1.2 Adsorbentes

### 1.2.1 Adsorción

La adsorción es entendida como el fenómeno fisicoquímico en el cual un material sólido o líquido, denominado adsorbente, tiene la capacidad de atraer y retener en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos, los cuales son conocidos como adsorbatos [29], [30], proceso que se ilustra en la figura 1.

**Figura 1.**

*Proceso de adsorción.*

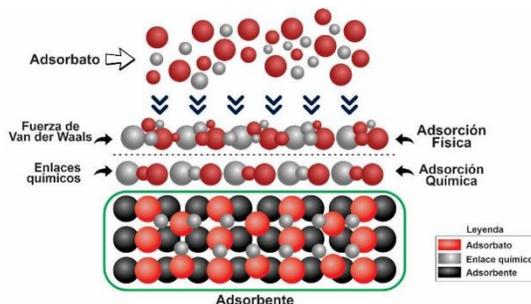


*Nota:* Ilustración del fenómeno de adsorción.  
Tomado de M. A. Díaz Viera y J. E. Santos,  
«Modelación de fenómenos de adsorción en  
problemas de flujo y transporte,» México, 2016.

Es posible distinguir dos comportamientos límites para el suceso evidenciado con anterioridad, la adsorción física o fisisorción, es allí donde las moléculas de gas se conservan unidas a la superficie del adsorbente, por medio de fuerzas de Van der Waals, las cuales se caracterizan por sus interacciones dipolares; y la adsorción química o quimisorción, propuesta por Langmuir en el año 1916, donde las moléculas de gas mantienen su unión a la superficie del adsorbente formando así un enlace químico de interacciones fuertes [31], [32], tal como se evidencia en la figura 2.

**Figura 2.**

*Adsorción física y química.*

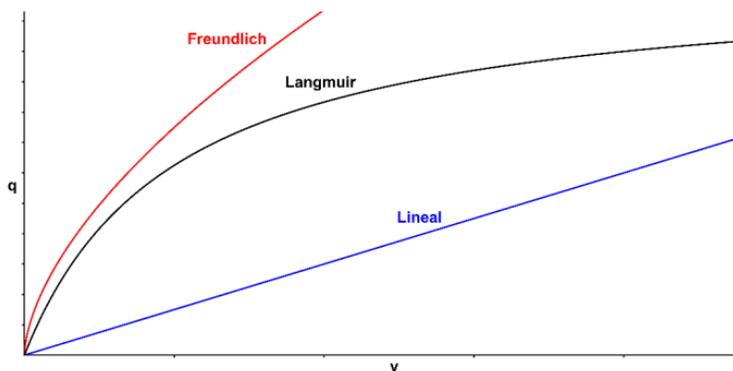


**Nota:** Ilustración acerca del comportamiento de las moléculas en un proceso de adsorción física y química. Tomada de D. L. Molina Campos y Y. R. Vergaray Campos, «Revisión bibliográfica de la adsorción de cadmio y plomo en agua usando biocarbón elaborado con residuos forestales,» Universidad César Vallejo, Lima, 2020.

1.2.1.a Modelos de adsorción. Al abordar temáticas de adsorción de sustancias gaseosas y solutos, se describen dos modelos, o también conocidos como isotermas, en las cuales se describe el comportamiento de la cantidad de adsorbato dentro del adsorbente, con respecto a su presión, cuando la sustancia es un gas, y a su concentración cuando se trata de solutos en fase líquida [33]; es por ello que se mencionan la ecuación de Langmuir y la curva de Freundlich, las cuales se encuentran representadas en la figura 3.

**Figura 3.**

*Isotermas de adsorción.*



**Nota:** Comportamiento de la función lineal, y de las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir. Tomado de F. M. Caballero Flores, «Desarrollo de interfaces gráficas de usuario para descripción del proceso de adsorción de proteínas por lotes o en columna empacada como herramientas educativas,» Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2015.

1.2.1.a.i Isoterma de Langmuir. Determinada por Irving Langmuir, en el año 1916, el modelo presenta la relación entre la adsorción de moléculas sobre una superficie en fase sólida, con presión o concentración del adsorbato, el cual se encuentra inmerso en un medio a temperatura constante [34]; tal como se especifica en la ecuación 1 a continuación.

**Ecuación 2.**

*Expresión matemática para la isoterma de Langmuir.*

$$\theta = \frac{V}{V_m} = \frac{\alpha P}{1 + \alpha P}$$

**Nota:** Ecuación para el comportamiento de la isoterma de adsorción de Langmuir. Tomado de Á. Méndez, «Ecuación de Langmuir,» 31 Enero 2011. [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/ecuaciones-quimicas/ecuacion-de-langmuir>. [Último acceso: 26 Enero 2023].

Donde:

$\theta$ : Fracción de cobertura de la superficie.

$V$ : Volumen del gas adsorbido por el sólido.

$V_m$ : Volumen de moléculas monocapa de gas, cubren toda la superficie del sólido y completamente ocupado por el adsorbente.

$\alpha$ : Constante de adsorción de Langmuir.

$P$ : Presión parcial del adsorbente.

1.2.1.a.ii Isoterma de Freundlich. Desarrollada por el astrónomo, físico y matemático alemán, Erwin Finlay Freundlich, la curva argumenta la correlación existente entre la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente dato, y la concentración del soluto inmerso en el líquido con el que se encuentra en contacto [35], para lo cual es implementada la ecuación 2 y 3, en las cuales se estudia el comportamiento de la presión y la concentración, respectivamente.

**Ecuación 4.**

1° *Expresión matemática para la isoterma de Freundlich.*

$$\frac{x}{m} = Kp^{1/n}$$

*Nota:* Primera ecuación para el comportamiento de la isoterma de adsorción de Freundlich. Tomado de M. González, «Isoterma de Freundlich,» 25 Abril 2011. [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/isoterma-de-freundlich>. [Último acceso: 26 Enero 2023].

Donde:

$x$ : Masa del adsorbato.

$m$ : Masa del adsorbente.

$p$ : Presión de equilibrio del adsorbato.

$K$  y  $1/n$ : Constantes de equilibrio, dependen del adsorbato y adsorbente a estudiar, a una temperatura específica.

**Ecuación 6.**

2° *Expresión matemática para la isoterma de Freundlich.*

$$\frac{x}{m} = Kc^{1/n}$$

*Nota:* Primera ecuación para el comportamiento de la isoterma de adsorción de Freundlich. Tomado de M. González, «Isoterma de Freundlich,» 25 Abril 2011. [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/isoterma-de-freundlich>. [Último acceso: 26 Enero 2023].

Donde:

$x$ : Masa del adsorbato.

$m$ : Masa del adsorbente.

$c$ : Concentración del adsorbato en disolución en el equilibrio.

$K$  y  $1/n$ : Constantes que dependen del adsorbato y adsorbente a estudiar, a una temperatura específica.

### ***1.2.2 Caracterización de la estructura capilar como agente de adsorción***

En los últimos años los diferentes estudios de la academia han estado dirigidos al aprovechamiento de diversos residuos para innumerables aplicaciones en varios sectores de la industria [22], [32], [33], [36]; en este caso se presenta la utilización de bioadsorbentes para remoción de compuestos fenólicos en aguas residuales, los cuales resultan perjudiciales para la salud de los seres vivos. Uno de ellos, el cual precisamente es el implementado en la presente investigación, es el cabello humano como adsorbente orgánico, no solo de fenoles, sino también, por ejemplo, para la remoción de azul de metileno.

Para la queratina del cabello, definida como una proteína fibrosa e insoluble [37], su composición y estructuración se encuentra definida como:

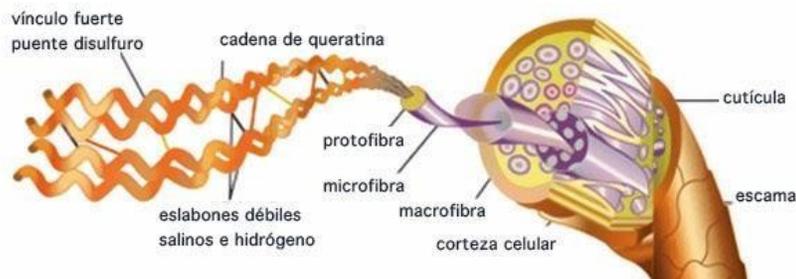
«Tienen un alto grado de estructura  $\alpha$ -helicoidal y la región central se caracteriza por un resto de repetición heptada. En material biológico, estas proteínas se ensamblan en estructuras enrolladas con dimensión general de 10 nm  $\times$  100 nm, y estabilizado por puentes salinos e interacciones hidrofóbicas. Las proteínas se componen de  $\beta$ -queratina y la masa molecular de esta queratina está en el rango de 10 kDa - 30 kDa.» [38]

Se reconoce el estudio de las proteínas mencionadas del cabello como compuestos promisorios de absorción de compuestos orgánicos, esto evidenciado en el mecanismo por los cuales la queratina tiene la capacidad de eliminar contaminantes de una solución, o incluso de la atmósfera, esto es la combinación entre un proceso de fisisorción y uno de quimisorción [39]; la fisisorción referida a la débil relación entre las fuerzas de interacción adsorbato – adsorbente, y la quimisorción se presenta cuando se forman enlaces químicos entre las moléculas del adsorbato y lugares específicos de la superficie del adsorbente, denominados también sitios activos [40].

Los materiales naturales de queratina dura están altamente organizados en la escala molecular de proteínas que puede limitar la accesibilidad de los sitios reactivos. En los cabellos, las proteínas están dispuestas en filamentos rodeados por una matriz que consta de proteínas accesorias, estas son las llamadas proteínas asociadas a la queratina; los filamentos de queratina están estabilizados por una red de enlaces químicos y por enlaces e interacciones interprotéicas [38], evidenciado así en la figura 4.

**Figura 4.**

*Composición del cabello.*



**Nota:** Ilustración de cada uno de los componentes de las fibras capilares humanas. Tomado de V. Estrada y M. Valencia, «El Cabello (Composición química del cabello y melaninas),» [En línea]. Available: <https://kolorissimoleon.wixsite.com/eyvgrupoestudio/single-post/2017/08/14/el-cabello-componente-principal-color-natural>. [Último acceso: 26 Enero 2023].

«El cabello humano contiene hasta un 95% de proteína que se compone principalmente de polímeros de aminoácidos como la queratina y la cistina; la queratina cumple con la función de brindarle fuerza, flexibilidad, durabilidad al cabello, son los enlaces de hidrógeno entre los grupos carboxílico ( $-\text{CO}-\text{OH}$ ) y amina ( $-\text{NH}$ ) quienes proporcionan estabilidad a las estructuras del mismo. Estos grupos funcionales tienen la posibilidad de actuar como sitios activos para la remoción de contaminantes del agua a través de un mecanismo de coordinación y atracción electrostática.

El cabello humano es uno de los materiales orgánicos con mayor contenido de nitrógeno, y es por ello que tienen una amplia oportunidad de mercado ya que ha sido implementado comercialmente como fertilizante; es también conocido por sus propiedades únicas como alta resistencia a la tracción, tasa de degradación lenta, superficie escamosa, aislamiento térmico e interacciones con agua y aceites. En vista de estas características, el cabello humano puede considerarse un excelente candidato como adsorbente natural y orgánico para la eliminación de contaminantes del agua.» [41]

Acorde a lo descrito previamente, es posible afirmar que el cabello es capaz de remover gran cantidad de compuestos presentes en aguas residuales debido a su naturaleza química, principalmente por su alto contenido de queratina.

Desde otra perspectiva, es necesario tener en cuenta la contaminación presente en vertederos dada su propia deposición, es por ello que resulta pertinente asegurar que el aprovechamiento de este residuo disminuye la obstrucción de los drenajes; adicionalmente a pesar de ser este un desecho biológico tiene una tasa de degradación lenta, donde se debe considerar al momento de esta, la liberación de gases como el amoníaco que contribuyen a la contaminación del medio ambiente, por lo que se confirma que la utilización de este residuo genera impactos positivos al medio ambiente.

### ***1.2.3 Otros adsorbentes orgánicos***

Actualmente se han adelantado varias investigaciones teniendo en cuenta diferentes materias primas, una de ellas el nanomaterial; “la biosorción es una estrategia alternativa prometedora para la eliminación de contaminantes orgánicos durante los procesos de purificación del agua. Los biosorbentes tienen varias ventajas, como la simplicidad de operación, buena capacidad de sorción, alta capacidad de recuperación y modificabilidad” [42]

Sin embargo, los nanomateriales adsorbentes se pueden obtener a partir de bacterias, hongos, algas y quitosano / quitina, como lo demuestran estudios realizados, fue posible identificar una variedad de nanomateriales bioadsorbentes, así como las técnicas adecuadas para una implementación eficiente para remover contaminantes orgánicos de aguas residuales [42]; como se evidencia, la complejidad de las materias primas depende en gran medida de la accesibilidad a ella.

Mencionando de manera concisa otro ejemplo de la gran variedad de bioadsorbentes ya estudiados con anterioridad, es importante destacar el caucho reciclado, para su análisis han sido involucrados diversos factores como el tiempo de contacto, la concentración inicial de fenol, la cantidad de adsorbente, el pH y la temperatura, evaluando así la actividad de adsorción mediante la utilización de gránulos de caucho de neumáticos usados; investigación muy fructífera en su campo, pues fue posible definir el tiempo de equilibrio en 60 minutos, indicando una rápida adsorción y concluyendo finalmente como el mencionado adsorbente es inversamente proporcional con el tamaño de las partículas del adsorbente y la temperatura de la solución [36].

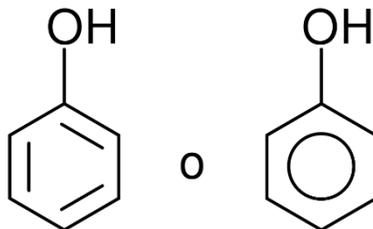
## **1.3 Fenoles**

Los fenoles, también denominados ácidos carbólicos, ácidos fénicos, alcoholes fenólicos, ácidos fenólicos, hidratos de fenilo, oxibencenos, hidroxibencenos o hidróxidos de benceno, son

compuestos orgánicos aromáticos cuyo grupo funcional es un grupo hidroxilo (OH-) unido a un átomo de carbono de un anillo bencénico [11] y su estructura se evidencia en la figura 5.

**Figura 5.**

*Estructura química del fenol.*



**Nota:** Ilustración de las dos formas de representar una molécula de fenol. Tomado de KASALAB, «Determinación de Fenoles en Agua y Efluentes: Método Colorimétrico con 4-aminoantipirina,» 16 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.kasalab.com/determinacion-de-fenoles-en-agua-y-efluentes-metodo-colorimetrico-con-4-aminoantipirina/>. [Último acceso: Septiembre 2022].

Se encuentran en la naturaleza en la madera, las agujas de pino, en la orina y en las heces de los herbívoros en forma de fenolsulfato; sin embargo, se obtienen sintéticamente a partir de la destilación del alquitrán de hulla, la disociación del hidróxido de cumeno y en menor proporción gracias a la síntesis del benceno, haciendo uso del ácido bencenosulfónico o del clorobenceno [43]. Estos hidroxiderivados del benceno son comúnmente utilizados como antisépticos y anestésicos locales, plaguicidas, curtientes sintéticos, sustancias aromáticas, aceites lubricantes, plásticos, reactivos químicos y antioxidantes, e incluso participan activamente en la fabricación de resinas sintéticas y colorantes.

**Tabla 1.***Propiedades fisicoquímicas del fenol.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Formula química	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20 °C (aire = 1 g/mL)	1,001
Densidad relativa de vapor (aire = 1 g/mL)	3,2
Densidad relativa del líquido (agua = 1 g/mL)	1,06
Masa molecular	94,1 g/mol
Presión de vapor a 20 °C	47 Pa
Punto de ebullición	182 °C
Punto de fusión	43 °C
Punto de inflamación	79 °C
Solubilidad en agua	Moderada
Solubilidad en agua (g/100 mL)	7

*Nota:* Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del fenol. Tomado de Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, «Fenoles,» [En línea]. Available: <https://prtr-es.es/fenoles,15658,11,2007.html#>. [Último acceso: Septiembre 2022].

### ***1.3.1 Afectaciones al medio ambiente***

Es posible encontrar compuestos fenólicos dentro del ecosistema como consecuencia de la manufactura, uso y disposición de productos que contienen fenol; motivo por el cual, dependiendo del recurso del que se hable, se tienen distintos períodos de permanencia en el mismo. Por ejemplo, cuando se habla del aire, se tiene conocimiento de que la sustancia es degradada rápidamente, siendo más específicos, en un período de entre 1 a 2 días; sin embargo, cuando hablamos de fuentes hídricas este tiempo aumenta alcanzando incluso un mínimo de una semana, y claro está, cuando son depositados sobre el suelo depende netamente de las bacterias y microorganismos que se encargan de su transformación [27].

El fenol y sus derivados resultan letales, según el estudio realizado en un grupo de animales utilizados en pruebas de laboratorio, tales como ratas y conejos, en concentraciones de mínimo 0,5

mg/L, lo cual resulta aún más crítico debido a sus características bio-acumulativas, que, como fue mencionado anteriormente, permite que dichos compuestos permanezcan en el ambiente por largos lapsos de tiempo [44], [45].

### ***1.3.2 Toxicidad y afectaciones***

Los niveles de toxicidad para el ser humano oscilan entre 10-24 mg/L, para una concentración letal en sangre de 150 mg / 100 mL [27]; teniendo en cuenta las diferentes vías por las que es posible que los compuestos fenólicos ingresen al cuerpo humano. Estas son mediante inhalación, cuando se respira aire con concentraciones de fenol, el cual rápidamente se abrirá camino hacia los pulmones; mediante ingestión, esto se da en el momento que se consumen alimentos o agua contaminada por el mismo; y finalmente, mediante contacto con la piel, cuando la persona entra en contacto con vapores de fenol, fenol líquido o líquidos que contienen fenol [27]. La exposición a compuestos fenólicos resulta en numerosas y graves consecuencias para la salud humana. Sus efectos incluyen afectaciones como quemaduras de alto grado en ojos, piel y tracto respiratorio, decoloración de la piel, alteraciones en el sistema nervioso central y digestivo, el corazón y los riñones, desencadenando convulsiones, alteraciones cardíacas, fallos respiratorios, colapsos intestinales graves, estado de coma y en casos severos la muerte [11].

### ***1.3.3 Métodos de determinación de fenoles***

Teniendo en cuenta que existe una gran variedad de metodologías diferentes a la expuesta en la sección 3.2.1 del presente documento, para la determinación de fenoles en una muestra, se mencionan a continuación algunas de ellas.

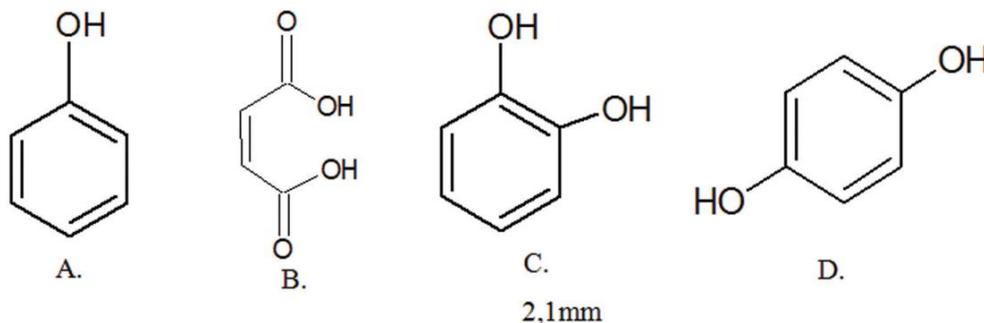
1.3.3.a Microextracción con solvent bar usando HPLC – UV. El método de microextracción en fase líquida se implementa mediante el uso de una membrana hueca funcionalizada como barra de solvente o “solvent bar” para la determinación de compuestos fenólicos utilizando cromatografía líquida de alta eficiencia [46].

El procedimiento a seguir para la ejecución de este método, es el descrito en el artículo de investigación *Determinación de compuestos Fenólicos mediante microextracción con solvent bar usando HPLC-UV en muestras de aguas residuales contaminadas con vinazas*, el cual expone lo especificado a continuación.

Establecer los reactivos y soluciones estándar por medio de 4 soluciones estándar de fenol, hidroquinona, pirocatecol y ácido maléico [46].

**Figura 6.**

*Estructura molecular de los fenoles usados para la identificación en las muestras de aguas residuales.*



**Nota:** Representación gráfica de las moléculas de A. Fenol, B. Ácido Maleico, C. Pirocatecol y D. Hidroquinona. Tomado de W. A. Largo Taborda y M. H. Rosero Moreano, «Determinación de compuestos fenólicos mediante microextracción con solvent bar usando HPLC-UV en muestras de aguas residuales contaminadas con vinazas,» Scientia Chromatographica, vol. 8, n° 2, pp. 121-127, 2016.

Estas soluciones se realizan con una concentración de  $100 \text{ mg/L}^{-1}$  en 100 mL.

1. Preparación de muestras: De acuerdo con los autores, “se eligieron tres muestras para el estudio; la primera antes de la descarga (afluente), otra después de la descarga (efluente) y otra en un río cercano lejos de la influencia de la factoría (500 m aguas abajo), todas las muestras se tomaron según las especificaciones del Standar Methods de la AWWA WPCF” [46].
2. Condiciones de carbono orgánico total: En este numeral, se tienen en cuenta diferentes equipos para el análisis de carbono orgánico, este análisis es fundamental debido a que a partir de este se llega a la curva de calibración del método.
3. Condiciones de cromatografía: Considerando el uso de un equipo “HPLC Thermo U- Dionex con un detector ultravioleta (UV), se utilizó una columna Pinnacle II C-18 (100mm  $\times$  2,1mm) ID 5,0 $\mu\text{m}$  tamaño de partícula); para la fase móvil se usó una mezcla de ácido fórmico 0,01 % (disolvente A) y metanol (disolvente B). Se llevó a cabo el análisis con un método de gradiente usando una velocidad de flujo de  $0,5 \text{ mL min}^{-1}$ , el tiempo de análisis fue de 30 minutos con una longitud de onda de 264 nm” [46].

4. Especificaciones de la membrana hueca: Fabricada con material polimérico, la cual para su buen uso debe ser esterilizada y acondicionada con acetona en baños de ultrasonidos de 1 a 2 minutos, para posterior dejar secar a temperatura ambiente.

5. Procedimiento de microextracción:

«Para dicho procedimiento se usaron 25 mm de membrana hueca en la que se incorpora un pin metálico que funcionaliza la membrana como agitador en la solución. La membrana es preparada con 1-octanol el cual se adiciona dentro del espacio hueco de esta (30  $\mu\text{L}$ ) y luego la membrana es impermeabilizada con el mismo solvente el cual ayuda a sellar los poros con el fin de mejorar la transferencia de analito dentro de la membrana (modo de dos fases). La membrana es sellada en ambos lados lo cual permite que la transferencia se dé solo por medio de los poros de la membrana y posterior a esto la membrana es introducida en el vial (5 mL) que contiene la muestra de agua para la extracción de los analitos de interés (no es necesario filtrar la matriz ya que la membrana facilita dicho proceso). Para la microextracción con membrana hueca como barra de solvente (HF-SBME) se tienen en cuenta los siguientes parámetros: agitación durante 30 minutos, se adiciona 5% de NaCl y con una agitación de 700 rpm a temperatura ambiente. Después de 30 minutos se extrae de la membrana el solvente (1-octanol) y se dispone en un vial para su posterior análisis por HPLC-UV.» [46]

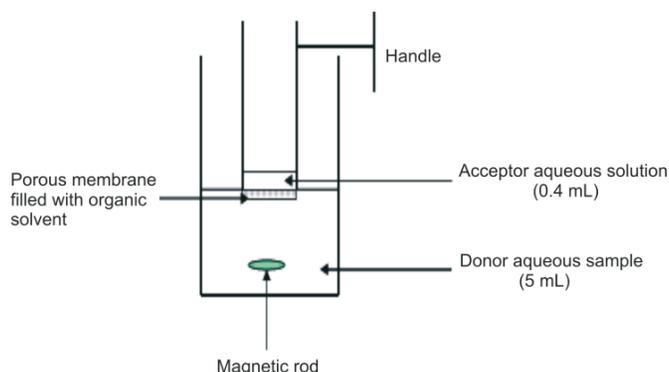
1.3.3.b Extracción Líquido – Líquido. Se realiza por medio de sonda de extracción de membrana líquida soportada y cromatografía líquida de arreglo de fotodiodos; el procedimiento descrito se obtuvo de *Determination of Phenols in Water Samples using a Supported Liquid Membrane Extraction Probe and Liquid Chromatography with Photodiode Array Detection*, el cual lleva a cabo el procedimiento que se describe a continuación.

1. Preparación de la muestra: Considerando como paso previo la filtración de residuos sólidos de las muestras de aguas residuales recolectadas, para posteriormente “ser enriquecidas con concentraciones conocidas de cada fenol. El pH se ajustó a 4.0 utilizando 2 mol  $\text{L}^{-1}$  de ácido sulfúrico. A continuación, se extrajeron 5 mL de la muestra con agitación, normalmente durante 50 minutos” [47].
2. Preparación de las unidades de membrana: La sonda de membrana líquida soportada (SLM) se empapó en un disolvente orgánico no polar (undecano) durante 15 minutos. A continuación,

se enjuaga con agua desionizada tanto en el interior como en el exterior para eliminar el exceso de disolvente orgánico en la superficie [47].

**Figura 7.**

*Montaje de sonda de extracción por membrana líquida soportada.*



**Nota:** Descripción gráfica para el montaje del método de extracción por membrana líquida soportada. Tomado de L. Chimuka, A. Masevhe y F. Nefale, «Determination of Phenols in Water Samples using a Supported Liquid Membrane Extraction Probe and Liquid Chromatography with Photodiode Array Detection,» Sabinet African Journals, vol. 60, pp. 102-108, 2007.

«El exterior de la sonda de membrana se sumergió en 5 mL, de la solución de muestra agitada. Se dejó que la extracción se realizará durante 50 minutos. A continuación, se retiró la sonda de la solución de muestra y se recogió la fase aceptora en un vial de polipropileno. El pH se ajustó añadiendo 100  $\mu\text{L}$  de ácido sulfúrico de  $2 \text{ mol}^{-1}$ . Los extractos se analizaron inmediatamente o se cerraron y se almacenaron a  $4^{\circ}\text{C}$  hasta su análisis. Antes de realizar la siguiente extracción, se lavó el interior de la sonda con unas tres porciones de 5 mL de solución de aceptación fresca y el interior con agua desionizada.» [47]

3. Preparación de curvas de calibración: Se realizan por medio de preparación de soluciones de agua madre desionizada; “las soluciones estándar en el rango de  $\mu\text{gL}^{-1}$  se prepararon diariamente, mientras que el rango de  $\text{mgL}^{-1}$  se almacenaron en un refrigerador durante aproximadamente una semana” [47].

Finalizando la metodología presentada, es importante realizar lo expuesto a continuación.

«Para que los fenoles se disuelvan en el disolvente orgánico no polar impregnado en la membrana de la muestra, tienen que estar no ionizados al pH de la muestra. A continuación, los compuestos se difunden a través de la membrana hacia la fase receptora. Una vez en la fase receptora, se ionizan y quedan atrapados. La concentración de los fenoles no ionizados en la fase receptora se mantiene así en cero. Esto mantiene una diferencia en el gradiente de concentración entre las fases donante y receptora.» [47]

Para la presente investigación se selecciona como método de Análisis (SM 5530-D), considerando puntos como:

1. Alcance geográfico: Para el método previamente mencionado, la determinación de concentración es determinada por medio de la absorbancia, variable que puede ser medida por medio de un equipo denominado espectrofotómetro, sin embargo, para los métodos expuestos en la sección previa, son requeridos equipos e instrumentos especializados los cuales no se encuentran disponibles en la ciudad de Bogotá D. C., locación en donde fue realizado el presente estudio.
2. Costo: Teniendo en cuenta el punto anterior, para determinar fenoles por los métodos expuestos, son requeridos costos adicionales como los implementados en logística para el envío de muestras a laboratorios especializados, los cuales no se encuentran previstos para el desarrollo de la investigación.

## 2. MARCO LEGAL

El fenol, y por ende los compuestos fenólicos en su estado puro, resultan inmensamente corrosivos, carcinogénicos y tóxicos para el medio ambiente, esto ligado a su estabilidad y bio-acumulación les concede la habilidad de permanecer en el entorno por largos períodos; es por ello que cuando la mencionada sustancia, dependiendo de la concentración en que se encuentre, ingresa a aguas subterráneas, ríos y embalses, interfiere en la calidad del agua que se dirige hacia el consumo humano, motivo por lo cual existen dentro de la legislación colombiana, decretos y resoluciones que regulan los parámetros de aquellas aguas [48].

Acorde con el capítulo N°11 de la resolución 631 de 2015 expuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, se establece el valor límite máximo permisible para la concentración de fenol en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de las actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados), fabricación y manufactura de bienes, labores industriales y comerciales, como 0,20 mg/L.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describirán los procesos y análisis llevados a cabo para el desarrollo del bioadsorbente, evaluando a su vez, las variables fundamentales en el proyecto de investigación y del mismo modo, la comparación de la eficiencia de las estructuras capilares humanas con los adsorbentes orgánicos existentes.

#### 3.1 Materia prima

##### 3.1.1 *Cabello humano*

Teniendo en cuenta que los fenoles tienen un amplio pasado formando parte de la industria cosmética, específicamente en la fabricación de tintes para el cabello y de protectores solares [49], se toma la decisión de trabajar con residuos provenientes de una población infantil; con el fin de reducir las probabilidades de que estos se encuentren fisicoquímicamente alterados por sustancias como las mencionadas previamente.

El cabello humano requerido para el proyecto fue recolectado en la peluquería infantil “Toy Story” ubicada en el barrio Castilla en la ciudad de Bogotá, Colombia. Corresponde a los desechos generados allí durante el transcurso de un mes, obteniendo un total de 2 kg.

##### 3.1.2 *Agua residual*

El agua a tratar fue recolectada en el canal “Arzobispo” de Bogotá, a la altura de la calle 40 con carrera 13, barrio Teusaquillo.

3.1.2.a Recolección de la muestra. Se limpian y esterilizan dos botellas de vidrio color ámbar, cada una de ellas con capacidad de 500 mL. Posteriormente, se agregan aproximadamente 5 gotas de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con el objetivo de evitar la degradación de los compuestos fenólicos al momento de la recolección de la muestra, así que los envases se aseguran en una nevera portátil para evitar posibles interferencias de la temperatura.

Una vez en el lugar donde se lleva a cabo la toma de la muestra, la recolección se hace por medio de un implemento de largo alcance, el cual en un extremo consta de un agujero para sujetar un vaso desechable totalmente tiempo permitiendo hacer más fácil la recolección como se observa en la figura 8.

**Figura 8.**

*Instrumento para recolección de agua en el canal Arzobispo de Bogotá D. C.*



*Nota:* Herramienta de amplio alcance para recolección de muestras de agua superficial.

De esta manera es posible recolectar un total de 1 L de agua residual, la cual es depositada en los envases descritos anteriormente, y finalmente las muestras son transportadas en la nevera portátil con el fin de conservar la sustancia de interés hasta su evaluación.

### **3.1.3 Muestra sintética**

La muestra a tratar en la práctica experimental fue obtenida gracias a la disolución 1 g de  $C_6H_5OH$  puro (fenol) de la marca J. T. Baker, en 100 mL de agua previamente destilada.

## **3.2 Pre-experimentación**

### **3.2.1 Método para la determinación de fenoles**

El método fotométrico directo emplea el uso de la 4-amino-antipirina a  $pH\ 7,9 \pm 0,1$ , la cual en presencia de ferricianuro de potasio reacciona con los compuestos fenólicos, formando así una pigmentación de antipirina coloreada, y de tal manera su absorbancia es medida a 500 nm [50].

3.2.1.a Instrumental. Para la implementación del método son necesarios dos equipos [50]:

1. Equipo fotométrico: Consta de un espectrofotómetro el cual se encuentra equipado con células de absorción quienes proporcionan trayectorias de luz de 1 a 5 cm para ser usadas a 500 nm.

## 2. pHmetro.

3.2.1.b Procedimiento. Las acciones a realizar para la correcta ejecución del método antes descrito, se encuentran definidas en el libro Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales:

«Colóquense 100 mL de destilado, o una porción que contenga no más de 0,5 mg de fenol diluido hasta 100 mL, en un vaso de 250 mL. Prepárese un blanco de agua destilada de 100 mL y una serie de patrones de fenol de 100 mL que contengan 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5 mg de fenol.

Trátase la muestra, el blanco y los patrones como sigue: Añádanse 2,5 mL de la solución de  $\text{NH}_4\text{OH}$  0,5N y ajústese inmediatamente a  $\text{pH } 7,9 \pm 0,1$  con tampón fosfato. Añádase 1,0 mL de solución 4-aminoantipirina, mézclese bien, añádase 1,0 mL de solución  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ , y mézclese bien.

Después de 15 minutos, pásese a células y léase la absorbancia de la muestra y los patrones frente al blanco a 500 nm.» [50]

3.2.1.c Curva de calibración. La curva de calibración fue realizada bajo el procedimiento que se indica a continuación:

1. Adicionar 500 mL de destilado o una porción que contenga hasta 50  $\mu\text{g}$  de fenol, y diluir hasta que se consiga un volumen de 500 mL en un vaso de capacidad de 1 L.
2. Preparar un blanco con 500 mL de agua destilada y patrones de fenol de 500 mL, los cuales contienen respectivamente 5, 10, 20, 30, 40 y 50  $\mu\text{g}$  del compuesto.
3. Tanto para la muestra, el blanco y los patrones, se añaden 12 mL de  $\text{NH}_4\text{OH}$  0,5 N y su pH es ajustado a  $7,9 \pm 0,1$  con tampón fosfato.
4. Los ejemplares son transferidos cada uno a embudos de separación de volumen de 1 L, posteriormente son añadidos 3 mL de solución de 4-amino-antipirina y 3 mL de solución de  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ , se procede a mezclar y se dejan en reposo durante 15 minutos.
5. Se extrae con  $\text{CHCl}_3$  con 25 mL para células de 1 a 5 cm y con 50 mL para una célula de 20 cm. Se agita el embudo un mínimo de 10 veces y se toma un tiempo de espera prudencial esperando que el  $\text{CHCl}_3$  sedimente.
6. Se realiza la filtración de los restos de  $\text{CHCl}_3$  por medio de papel de filtro o embudos de vidrio filtrado que contengan una capa de 5 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhidro.

7. La absorbancia de la muestra y de los patrones es leída contra el blanco a 460 nm; posteriormente a esto se representa en un gráfico la absorbancia frente a la concentración de fenol en unidades de microgramos.

Realizando este procedimiento se construye una curva de calibración para cada fotómetro y se recomienda su comprobación frecuente para afianzar su reproducibilidad [50], tal como se evidencia en la figura 9.

**Figura 9.**

*Resultados colorimetría curva de calibración para la determinación de fenoles.*



**Nota:** Las muestras resultantes corresponden, de izquierda a derecha, a las concentraciones de 0 mg/L; 0,1 mg/L; 0,2 mg/L; 0,3 mg/L; 0,4 mg/L y 0,5 mg/L.

3.2.1.d Cálculos curva de calibración. Es posible calcular el contenido fenólico presente en las muestras de las lecturas fotométricas gracias a la curva de calibración descrita en la sección 4.1, siguiendo la ecuación 7.

**Ecuación 7.**

*Concentración de fenol en la curva de calibración.*

$$mg \text{ fenol} / L = \frac{A}{B} \times 1000$$

**Nota:** Ecuación para hallar la concentración de fenol en unidades de mg, por litro de solución. Tomada de APHA, AWWA y W. , «Determinación de Componentes Orgánicos, Fenoles,» de Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales, Madrid, Díaz de Santos, 1992, pp. 5-56 - 5-62.

Donde:

A: mg de fenol en la muestra, a partir de la curva de calibración.

B: mL de muestra original.

### 3.2.2 *Lavado de cabello*

Se realizó el lavado de los 2 kg de cabello con abundante jabón líquido de pH neutro y agua destilada; posteriormente fueron agregados a dos cubetas plásticas donde se dejaron secar a temperatura ambiente (14 °C).

### 3.2.3 *Preparación de las muestras*

Se marcaron 9 frascos de vidrio, cada uno con capacidad de 100 mL, con los números del 1 al 9 según las condiciones de tiempo y temperatura a las que serían llevados en la práctica experimental, como se evidencia en la tabla 2.

**Tabla 2.**

*Relación entre muestra, temperatura y tiempo.*

Nº Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	14	30
2	14	60
3	14	90
4	35	30
5	35	60
6	35	90
7	50	30
8	50	60
9	50	90

*Nota:* Condiciones de temperatura y tiempo para cada una de las muestras numeradas.

Se procede a agregar  $0,25g \pm 0,005$  previamente pesados, de cabello, en cada uno de los frascos de vidrio marcados.

La cantidad de cabello es seleccionada acorde a la implementada por Banat en sus estudios [51], teniendo en cuenta la relación que se presenta, allí son añadidos 2,5 mg de adsorbente por cada 1 mL de solución; de esta manera es posible obtener el peso correspondiente a añadir para 100 mL de muestra, reportando así el dato presentado con anterioridad.

**Figura 10.**

*Fascos de vidrio marcados y con la cantidad de cabello requerida.*



*Nota:* Cada uno de los recipientes contiene la cantidad de cabello indicada con anterioridad (0,25 g).

Se adicionan aproximadamente 100 mL de muestra de agua residual a los frascos de vidrio, los cuales se someten a los procedimientos descritos a continuación.

### **3.3 Experimentación**

La práctica experimental llevada a cabo se realiza tomando en cuenta los ensayos ejecutados por Banat [51], el ajuste de temperatura es realizado de acuerdo a los rangos establecidos en la literatura, sin embargo, el tiempo empleado es seleccionado con el fin de estudiar la relación de las variables a lo largo de 1,5 h; esto debido a que es en este intervalo donde la concentración de fenol disminuye en mayor medida, para posteriormente adquirir un comportamiento lineal.

#### **3.3.1 Ajuste de temperatura**

Los frascos de vidrio previamente enunciados, se calientan hasta las temperaturas deseadas; acorde con la tabla 2 los recipientes N° 1, 2 y 3 se dejan a temperatura ambiente, la cual medida en el momento exacto en el que se lleva a cabo la práctica experimental es de 14 °C, los recipientes N° 4, 5 y 6 son introducidos en una incubadora marca Merck y los correspondientes a los N° 7, 8 y 9 son llevados a un horno marca Mermmet, para de esta manera conseguir las temperaturas deseadas.

### 3.3.2 Filtración

Al cabo de 30 minutos, las muestras N° 1, 4 y 7 son extraídas de sus respectivas fuentes de calor, y proceden a la etapa de filtrado por medio de un embudo de vidrio de 60 mm de diámetro y utilizando un pequeño trozo de algodón como agente filtrante, tal y como se muestra en la figura 11.

**Figura 11.**

*Proceso de filtración de las mezclas de agua residual y cabello.*



**Nota:** Las muestras evidenciadas corresponden, de izquierda a derecha, a las muestras N° 1, 4 y 7, descritas en la sección 3.2.3

Los restos de cabello son retenidos por el algodón y la solución es filtrada hacia un frasco de vidrio seco, el cual se encuentra marcado con el número correspondiente a la mezcla filtrada, como se evidencia en la figura 12.

**Figura 12.**

*Solución filtrada resultante de las mezclas de agua residual y cabello.*



**Nota:** Las muestras evidenciadas corresponden a la solución resultante del proceso de filtración evidenciado en la figura 11.

Las muestras N° 2, 5 y 8 son retiradas transcurridos 60 minutos, y las muestras restantes, es decir las N° 3, 6 y 9, son retiradas cuando se han cumplido los 90 minutos; el proceso de filtración se realiza igualmente a lo descrito con anterioridad.

### 3.3.3 *Determinación de contenido fenólico*

Las muestras previamente filtradas son sometidas al método fotométrico directo para la determinación de fenoles, el cual se describió en el inciso 3.2.1, obteniendo así la colorimetría que se evidencia en las figuras 13, 14 y 15, para las muestras N° 1, 4 y 7, 2, 5 y 8, 3, 6 y 9, respectivamente.

**Figura 13.**

*Resultado colorimetría muestras N° 1, 4 y 7.*



**Nota:** Las muestras evidenciadas fueron retiradas de sus respectivas fuentes de calor al completarse 30 minutos; las muestras N° 1, 4 y 7, se encontraban a 14 °C, 35 °C y 50 °C, respectivamente.

**Figura 14.**

*Resultado colorimetría muestras N° 2, 5 y 8.*



**Nota:** Las muestras evidenciadas fueron retiradas de sus respectivas fuentes de calor al completarse 30 minutos; las muestras N° 2, 5 y 8, se encontraban a 14 °C, 35 °C y 50 °C, respectivamente.

**Figura 15.**

*Resultado colorimetría muestras N° 3, 6 y 9.*



*Nota: Las muestras evidenciadas fueron retiradas de sus respectivas fuentes de calor al completarse 30 minutos; las muestras N° 3, 6 y 9, se encontraban a 14 °C, 35 °C y 50 °C, respectivamente.*

Posteriormente, la solución resultante se deja en reposo durante 15 minutos y procede a ser agregada a las células de absorción para de esta manera ser insertadas en el espectrofotómetro y realizar su respectiva lectura; los resultados de este procedimiento se encuentran en la sección 4, sección contigua a la presente.

**3.3.4 Procedimiento para muestra sintética**

La metodología implementada para el análisis de la muestra sintética es el mismo especificado a partir del inciso 3.2.2 para la muestra de agua residual, de igual manera los resultados de la misma se encuentran detallados en la sección 4 del documento.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Curva de calibración

Las lecturas de absorbancia obtenidas para el procedimiento correspondiente a la curva de calibración del método fotométrico directo descrito en el inciso 3.2.1.ii se especifican a continuación en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Resultados absorbancia curva de calibración.*

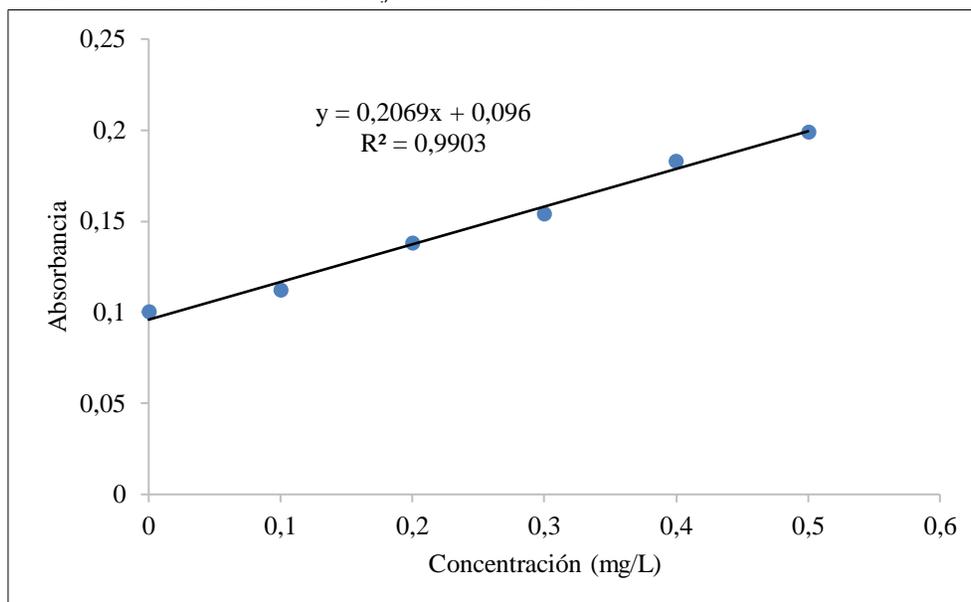
<b>N° Muestra</b>	<b>Concentración de fenol (mg / L)</b>	<b>Absorbancia</b>
<b>1</b>	0	0,10
<b>2</b>	0,100	0,112
<b>3</b>	0,200	0,138
<b>4</b>	0,300	0,154
<b>5</b>	0,400	0,183
<b>6</b>	0,500	0,199

*Nota:* Compilado de los resultados obtenidos para la lectura de absorbancia de la curva de calibración.

Posteriormente con los resultados obtenidos para las lecturas de las muestras, se grafican las concentraciones y las absorbancias, en los ejes  $x$  y  $y$ , respectivamente, como se evidencia en la figura 16, esto con el fin de obtener la curva correspondiente a la recta graficada, la cual se presenta en la ecuación 5.

**Figura 16.**

*Curva de calibración del método fotométrico directo.*



**Nota:** Gráfica concentración vs. absorbancia para la representación de la curva de calibración del método para remoción de fenoles.

**Ecuación 8.**

*Ecuación de la recta para la curva de calibración.*

$$y = 0,2069x + 0,096$$

**Nota:** Expresión matemática hallada mediante regresión para la curva de calibración.

Acorde a lo evidenciado en la figura 16, se obtiene un valor para el coeficiente de determinación  $R^2$  cercano a 1, el cual nos indica el alto grado de correlación que se presenta entre las variables y con ello, se confirma la fiabilidad del modelo para previsiones futuras [52].

Gracias a los datos obtenidos, es posible realizar la estandarización del método descrito en secciones anteriores para el fotómetro presente en el laboratorio Ingeniería Medio Ambiental, ubicado en la calle 87 #49-2, barrio Patria en la ciudad de Bogotá, Colombia, para de esta manera determinar la concentración de compuestos fenólicos en muestras futuras.

## 4.2 Análisis cuantitativo

### 4.2.1 Muestra agua residual

La lectura de absorbancia realizada para las 9 muestras de agua residual tomadas en el río Arzobispo de Bogotá D. C. especificadas en el inciso 3.2.3 arrojó los resultados reportados a continuación en la tabla 4.

Cuando son implementadas y estudiadas nuevas metodologías que permitan la sustracción de sustancias en un medio, resulta de vital importancia, por tanto, analizar el porcentaje de remoción que se genera en cada una de las muestras a trabajar; es por ello que en la ecuación 6, presentada a continuación, se reportan los cálculos necesarios para tal fin, y sus resultados correspondientes son comunicados posteriormente en la tabla 4.

#### **Ecuación 9.**

*Ecuación porcentaje de remoción.*

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100$$

**Nota:** Expresión matemática para calcular el porcentaje de fenol removido de la muestra de agua inicial.

Donde:

*C<sub>i</sub>*: Concentración inicial de la muestra.

*C<sub>f</sub>*: Concentración final de la muestra.

**Tabla 4.***Resultados absorbancia muestra río Arzobispo.*

<b>N° Muestra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
<b>Inicial</b>	14	0	0,100	0,002	-
<b>1</b>	14	30	0,108	0,060	-2900
<b>2</b>	14	60	0,110	0,070	-3400
<b>3</b>	14	90	0,110	0,070	-3400
<b>4</b>	35	30	0,113	0,080	-3900
<b>5</b>	35	60	0,110	0,070	-3400
<b>6</b>	35	90	0,110	0,070	-3400
<b>7</b>	50	30	0,113	0,080	-3900
<b>8</b>	50	60	0,113	0,080	-3900
<b>9</b>	50	90	0,113	0,080	-3900

*Nota:* Compilado de los resultados obtenidos para la lectura de absorbancia de las muestras de agua superficial del canal Arzobispo de Bogotá D. C.

Según los resultados evidenciados en la tabla 4, es posible afirmar que las muestras evaluadas no presentan un comportamiento similar al descrito en la literatura [51], ya que, de acuerdo con diferentes estudios relacionados, el cabello humano tiene la capacidad de disminuir la concentración de compuestos fenólicos en soluciones acuosas aproximadamente en un 90%, por lo cual, de acuerdo con los datos obtenidos es posible concluir que estos no son significativos ni confiables debido a la posible contaminación cruzada que pudo haberse presentado al momento de realizar la práctica experimental; a su vez es importante destacar que la metodología implementada, debido a su sensibilidad a concentraciones demasiado bajas, no resulta la adecuada

para la determinación de dichos compuestos en un dato como el obtenido para la muestra inicial reportada en la tabla 4.

Adicionalmente, como se observa en la muestra “inicial”, la concentración de esta es de 0,002 mg/L, lo cual comparado con la normativa colombiana descrita en la sección 2 cumple con los parámetros establecidos; motivo por el cual se toma la decisión de validar la capacidad del cabello humano de adsorber compuestos fenólicos tomando como medio una muestra sintética, la cual se encuentra especificada en el inciso 3.1.3

#### **4.2.2 Muestra sintética**

Como fue descrito en secciones anteriores, el procedimiento implementado para la muestra sintética fue exactamente el mismo especificado para la muestra de agua residual, siendo así que se obtienen los datos reportados a continuación en los incisos contiguos.

##### 4.2.2.a Efectos del tiempo en el porcentaje de remoción.

**Tabla 5.**

*Resultados relación entre tiempo y porcentaje de remoción.*

<b>N° Muestra</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
<b>1</b>	30	91,89
<b>2</b>	60	92,57
<b>3</b>	90	96,62
<b>4</b>	30	91,89
<b>5</b>	60	95,27
<b>6</b>	90	95,95
<b>7</b>	30	93,24
<b>8</b>	60	95,27
<b>9</b>	90	98,65

*Nota:* Compilado de los resultados obtenidos de porcentaje de remoción con relación al tiempo de cada muestra.

De acuerdo con los datos reportados en la tabla 5, se evidencia la importancia del tiempo para la determinación de la eficiencia de estructuras capilares en la adsorción de compuestos fenólicos, observando así que a igual tiempo el porcentaje de remoción varía únicamente en décimas; un ejemplo de ello, se da al comparar dichos porcentajes al transcurrir 30 minutos, es decir, para las muestras N° 1, 4 y 7, donde los porcentajes obtenidos son 91,89%, 91,89% y 93,24%, respectivamente, y a su vez analizando este fenómeno desde otro punto, es posible afirmar como la actividad de adsorción es mayor al cabo de 90 minutos resultando en porcentajes iguales o mayores al 98%.

Es posible relacionar lo descrito anteriormente con lo concluido por diversos autores, ya que se mencionan que al establecer métodos físicos de adsorción la variable más importante a considerar es el tiempo [41].

4.2.2.b Efectos de la temperatura en el porcentaje de remoción. Se ha evidenciado concluyentemente en varios estudios realizados como el presente, como la temperatura tiene un impacto positivo para la actividad de adsorción de compuestos fenólicos por medio del cabello humano, así para la muestra estudiada se obtienen los datos reportados en la tabla 6.

**Tabla 6.**

*Resultados relación entre temperatura y porcentaje de remoción.*

<b>N° Muestra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
<b>1</b>	14	91,89
<b>2</b>	14	92,57
<b>3</b>	14	96,62
<b>4</b>	35	91,89
<b>5</b>	35	95,27
<b>6</b>	35	95,95
<b>7</b>	50	93,24
<b>8</b>	50	95,27

---

*Nota:* Compilado de los resultados obtenidos de porcentaje de remoción con relación a la temperatura de cada muestra.

Gracias a la información mostrada anteriormente, se constata que a pesar de que la temperatura es una variable importante para la remoción de compuestos fenólicos, el porcentaje de este no tiene un cambio significativo en el rango de temperaturas estudiado, donde 14 °C es el límite inferior y corresponde a la temperatura ambiente del día 22 de octubre del 2022 en la ciudad de Bogotá, D. C., fecha en la que se llevó a cabo la práctica experimental, y 50 °C, ya que el porcentaje mencionado solo varió en un 7%, a lo cual según se afirma, es debido a que “si la adsorción es de tipo químico, los incrementos de temperatura podrían tener efectos positivos sobre la eficiencia de adsorción. Sin embargo, en adsorción física, los aumentos de temperatura tendrán Efecto potencialmente negativo sobre la eficiencia de adsorción” [41].

Es por ello, que se determina que la temperatura podría llegar a tener un mayor impacto en la adsorción de compuestos orgánicos en aguas residuales por medio de un proceso químico; sin embargo, esta condición requiere de otro tipo de estudio no tenida en cuenta en el presente escrito.

Por otro lado, según lo afirmado y estudiado por Ahmad y Sudi, para la realización de un método de quimisorción para un compuesto orgánico como el azul de metilo: “se trató cabello humano usando hidróxido de potasio (KOH) 0,1 M y ácido nítrico 0,1 M y se caracterizó el área de superficie específica y la química superficial de los adsorbentes” [41], investigación de la cual se concluyó cómo el efecto de la temperatura tiene un mayor impacto para este tipo de metodología, en comparación a la adsorción de tipo físico.

De esta manera, es posible afirmar acorde a lo evidenciado en este estudio, que el tiempo resulta ser el factor de mayor incidencia en la determinación de la actividad de adsorción de compuestos fenólicos del cabello humano, ello debido en gran parte, a como fue mencionado anteriormente, la temperatura no tiene mayor impacto en este proceso al tratarse un método de adsorción netamente físico.

4.2.2.iii Resultados generales. En la tabla 7, evidenciada a continuación, se encuentran los resultados de las muestras realizadas para el estudio de la muestra sintética definida con

anterioridad, bajo la incidencia del tiempo y la temperatura para la actividad de adsorción de fenol en ella.

**Tabla 7.**

*Resultados generales muestra sintética.*

N° Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
<b>Sintética</b>	14	0	0,250	1,480	-
<b>1</b>	14	30	0,120	0,120	91,89
<b>2</b>	14	60	0,119	0,110	92,57
<b>3</b>	14	90	0,107	0,050	96,62
<b>4</b>	35	30	0,120	0,120	91,89
<b>5</b>	35	60	0,110	0,07	95,27
<b>6</b>	35	90	0,109	0,06	95,95
<b>7</b>	50	30	0,116	0,100	93,24
<b>8</b>	50	60	0,111	0,070	95,27
<b>9</b>	50	90	0,101	0,020	98,65

*Nota:* Compilado de los resultados obtenidos para la lectura de absorbancia de las muestras sintética.

Teniendo en cuenta los resultados evidenciados en la tabla 7 y acorde a la ecuación 7 presentada a continuación, es posible determinar la cantidad de fenoles adsorbidos por cada gramo de cabello humano.

**Ecuación 15.**

*Ecuación relación entre gramos de fenol adsorbidos por gramos de cabello humano.*

$$\frac{g \text{ de fenol adsorbido}}{g \text{ de cabello humano}} = \frac{(A - B) * \frac{1 g}{1000 mg} * 0,1 L}{0,25 g}$$

*Nota:* Expresión matemática para calcular la cantidad de fenol adsorbido en gramos por gramo de cabello.

Donde:

A: Concentración inicial de la muestra en mg / L.

B: Concentración final de la muestra en mg / L.

Para la realización de los cálculos respectivos a la relación entre la cantidad de fenol por la cantidad de cabello humano, se establece que los datos a estudiar corresponden a los obtenidos para la muestra N° 9, esto debido a que es en ella donde el porcentaje de remoción es mayor en comparación a los demás ejemplares; es por ello que es resuelta la ecuación 8, obteniendo así la cifra expuesta a continuación.

**Ecuación 16.**

*Ecuación relación entre gramos de fenol adsorbidos por gramos de cabello humano para la muestra N° 9.*

$$\frac{g \text{ de fenol adsorbidos}}{g \text{ de cabello humano}} = \frac{\left(1,48 \frac{mg}{L} - 0,02 \frac{mg}{L}\right) * \frac{1 g}{1000 mg} * 0,1 L}{0,25 g} = 1,46 * 10^{-4}$$

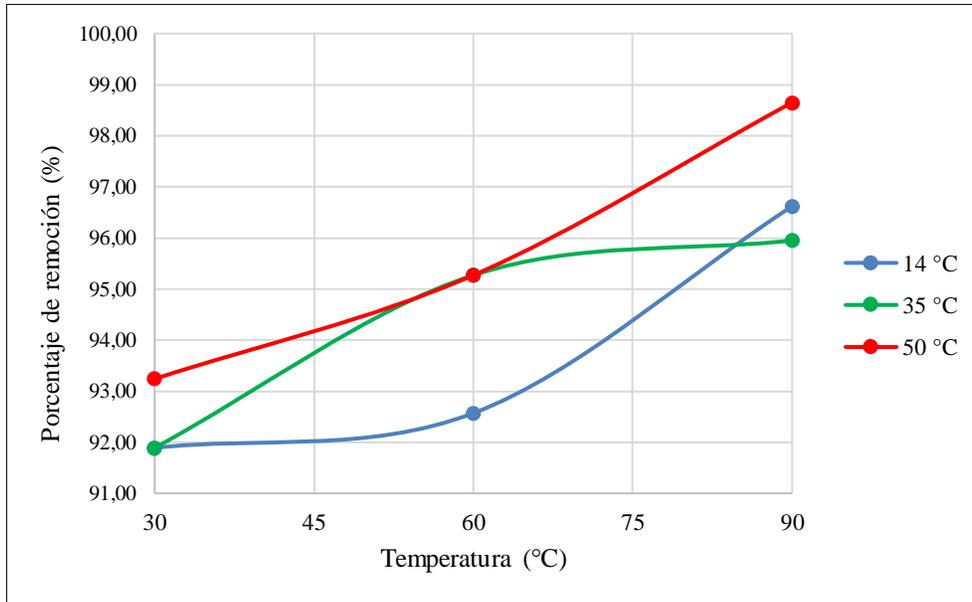
*Nota:* Cálculo para hallar la cantidad de fenol adsorbido en gramos por gramo de cabello, en la muestra N° 9.

Gracias a la información obtenida en la ecuación 8, es posible afirmar, como acorde a los datos correspondientes a la muestra estudiada, cada gramo de cabello humano empleado tiene la capacidad de adsorber  $1,46 \times 10^{-4}$  gramos de fenol de una muestra, es decir, existe una relación de proporcionalidad directa entre el fenol adsorbido y el cabello como adsorbente.

Obteniendo de manera gráfica las curvas que se representan en las figuras 17 y 18, reportadas a continuación, para cada una de las temperaturas (14 °C, 35 °C y 50 °C) y los tiempos estudiados (15 min, 30 min, 90 min).

**Figura 17.**

*Curvas del comportamiento del porcentaje de remoción con respecto al tiempo.*



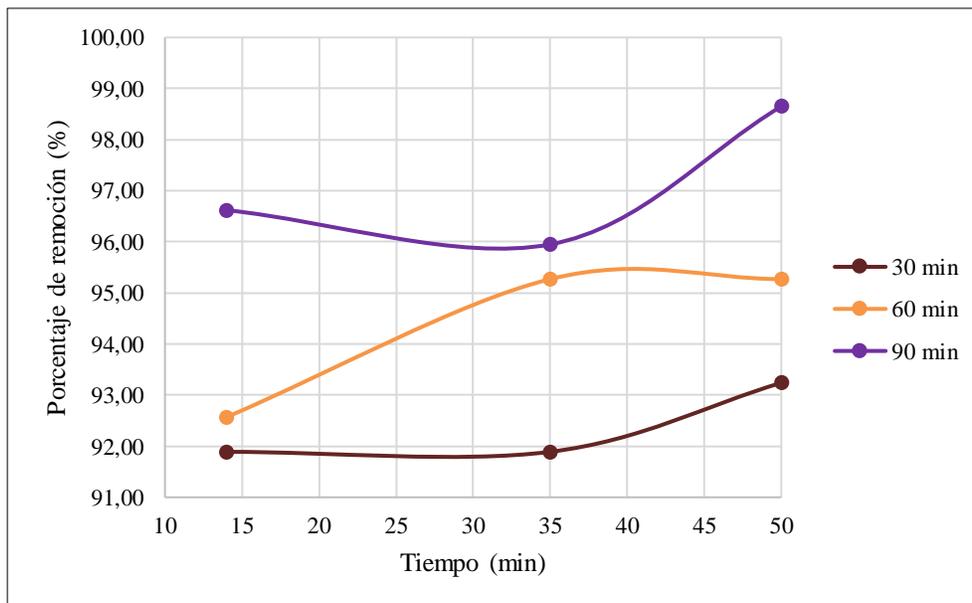
*Nota:* Grafica tiempo vs. porcentaje de remoción para los resultados de la muestra sintética.

Gracias a la figura 17, donde se muestra la gráfica resultante para la relación entre temperatura y el porcentaje de remoción, es posible afirmar como en la curva correspondiente a los 14 °C en el rango de tiempo de 30 – 60 min, y en aquella de 35 °C en el intervalo de 60 – 90 min, no hubo una diferencia significativa entre los porcentajes finales con respecto a los iniciales; sin embargo, para ellas en los rangos de 60 – 90 min y 30 – 60 min, respectivamente, se evidencia que el valor de la adsorción fue relativamente alto.

A su vez, es posible aseverar, según lo observado en la línea de los 50 °C, que la diferencia de temperaturas entre los dos rangos postulados, es similar y por ello la curva tiende a un comportamiento lineal ascendente, por ello, presenta una pendiente positiva.

**Figura 18.**

*Curvas del comportamiento del porcentaje de remoción con respecto a la temperatura.*



*Nota:* Grafica temperatura vs. porcentaje de remoción para los resultados de la muestra sintética.

Acorde a la figura 18, donde se muestra la gráfica resultante para la relación entre el tiempo y el porcentaje de remoción, es posible asegurar como en la curva de los 60 min en el rango de temperatura de 35 – 50 °C, y la correspondiente a 90 min en el intervalo de 14 – 35 °C, no hubo una diferencia significativa entre los porcentajes finales con respecto a los iniciales; sin embargo, para las mismas en los rangos de 14 – 35 °C y 35 – 50 min, respectivamente, se evidencia que el valor de la adsorción fue relativamente alto.

Adicionalmente, se constata, para la curva propia de los 30 min, no existe una diferencia significativa entre la concentración tomada para la temperatura de 14 °C y 50 °C, pues el diferencial que se obtiene es de solo el 1,35%, lo cual demuestra que para dicha temperatura y los tiempos empleados no se logran resultados relevantes.

Con los datos reportados, se consigue evidenciar de manera clara y objetiva la capacidad de adsorción que tienen las fibras de cabello para la remoción de compuestos fenólicos con respecto a dos variables controlables, como lo son la temperatura y el tiempo, sin embargo al realizar una comparativa entre las figuras 17 y 18, es preciso afirmar que a pesar que la temperatura tiene una relación directamente proporcional con el porcentaje de remoción, el tiempo es la variable quien

se ve mayormente involucrada en el proceso logrando así obtener cerca de un 99% de remoción al cabo de 90 minutos a una temperatura constante de 50 °C.

## 5. ANÁLISIS DE VIABILIDAD

El estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental se realiza para una planta piloto tipo batch o también denominado procesamiento por lotes, por lo cual teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el presente proyecto, son planteados los siguientes incisos.

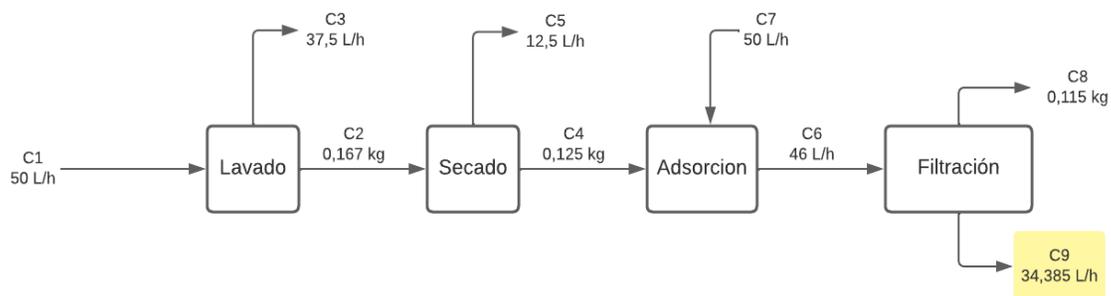
### 5.1 Viabilidad técnica

Son considerados aspectos técnicos relacionados con diseño operacional, almacenamiento, equipos y validación de materias primas, determinando que el método, por el cual se realizó el estudio a escala laboratorio, resulta viable industrialmente para adsorción de fenoles con estructuras capilares, así como también, la facilidad de operación de cada uno de los equipos y aspectos logísticos referentes al proceso.

Se presenta entonces el diagrama de bloques del procedimiento en la figura 19 y a su vez la correspondiente información de las corrientes involucradas y la identificación de etapas y variables en las tablas 8 y 9.

**Figura 19.**

*Proceso de adsorción de fenoles por medio de estructuras capilares.*



**Nota:** Diagrama de bloques de proceso considerando flujos de corrientes.

**Tabla 8.***Identificación de corrientes.*

<b>Corriente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
C1	Mezcla agua, jabón neutro y fibras capilares	50,000	L/h
C2	Cabello húmedo	0,167	Kg
C3	Agua contaminada	37,500	L/h
C4	Cabello seco	0,125	Kg
C5	Agua contaminada	12,500	L/h
C6	Agua residual	46,000	L/h
C7	Mezcla de agua + cabello	50,000	L/h
C8	Cabello con fenol	0,115	Kg
C9	Agua sin fenol	34,385	L/h

*Nota:* Identificación de cada corriente involucrada en el proceso, teniendo en cuenta el valor de cada una de ellas y la unidad de medida correspondiente.

**Tabla 9.***Identificación de etapas y variables.*

<b>Operación</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>pH</b>
<b>Lavado</b>	14	0,50	7,00
<b>Secado</b>	50	1,50	7,00
<b>Adsorción</b>	30	0,50	7,90
<b>Filtración</b>	14	1,00	7,00

*Nota:* Se establecen tiempos y temperaturas involucradas en el proceso; el pH se define como variable de control.

Para la estandarización del proceso a escala piloto, se tienen en cuenta las siguientes premisas de cálculo:

- Se estima que en el proceso de adsorción entra un flujo de 50L/h, debido a que la capacidad de este equipo es de 50L.
- Por lo anterior, se requiere de 0,125 kg de cabello tratado, teniendo en cuenta la relación establecida por Banat en su estudio [51].

- Se estima que en el proceso de lavado entra un flujo de 50L/h, debido a que la capacidad de este equipo es de 50L.

El cálculo de los balances de masa se establece bajo la ecuación expuesta a continuación.

**Ecuación 9.**

*Ecuación de balance de masa para sistemas sin reacción y en estado estacionario.*

$$E = S$$

*Nota:* Cálculo para determinar el valor de las corrientes sin definir de acuerdo con las premisas establecidas.

De lo anterior, se establecen los valores de la tabla 8, los cuales pueden ser vistos a detalle en el *Anexo N°1 Cálculos balances de masa.*

Las variables para considerar en el proceso de adsorción son de: Temperatura 30°C y la eficiencia de esto es de 92%, de acuerdo con los resultados de la tabla 7 para la muestra N° 4.

## 5.2 Equipos y costos

### 5.2.1 Lavadores de tornillo para finos

Es funcional para el lavado y la segregación de finos, por medio de separación hidráulica; es allí donde partículas con menor densidad flotan en la superficie y son descargadas sobre vertederos en el extremo inferior de la máquina [53].

**Tabla 10.**

*Especificaciones de máquina de tornillos para lavado de finos.*

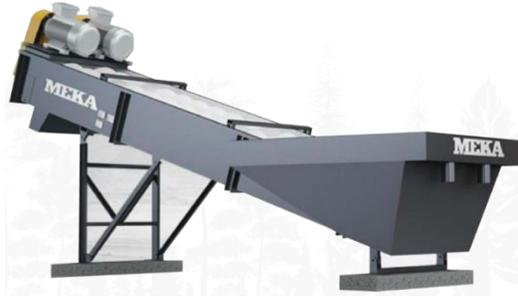
<b>Especificación</b>	<b>Equipo MFWS 0440</b>
Tamaño/DIA x L (mm x mm) Size/DIA x L (inch x feet)	400×4000 16×13
Capacidad (mthp) Capacity (stph)	20 22
Material (mm) Material (inch)	10 3/8
Potencia (kW) Power (HP)	3 4
Tornillo (rpm) Screw (rpm)	21 21
Peso (kg) Weight (lb)	1000 2200

*Nota:* Resumen de especificaciones volumétricas, métricas y material del equipo. *Tomado de* MEKA, «Meka Wet Processing,» [En línea]. Available: [https://www.mekaglobal.com/upload/files/26-04-2019\\_90165\\_meka\\_wet\\_processing-.pdf](https://www.mekaglobal.com/upload/files/26-04-2019_90165_meka_wet_processing-.pdf). [Último acceso: Noviembre 2022].

El precio de este equipo, teniendo en cuenta las especificaciones previamente mencionadas en la tabla 10, tiene un valor de alrededor de 1.500 USD – 3.000 USD (7'500.000 COP - 15'000.000 COP).

**Figura 20**

*Máquina de lavado para material fino.*



*Nota:* Representación gráfica de equipo para lavado de finos. Tomado de DISMET, «Lavadores de tornillo para finos MEKA,» [En línea]. Available: <https://www.dismet.com/product/productos-meka/lavado-meka/lavadores-de-tornillo-para-finos-meka/>. [Último acceso: Noviembre 2022].

### **5.2.2 Cámara de secado**

Es utilizada principalmente cuando la materia a secar contiene una baja humedad, tienen un rango de trabajo amplio, su temperatura varía desde la temperatura ambiente hasta los 25°C, adicionalmente gracias al avance tecnológico es posible encontrar cámaras de secado cuya temperatura alcance los 0°C [54].

Su precio puede oscilar entre los 2.000 USD – 2.500 USD (1'.000.000 COP – 12'500.000 COP).

**Figura 21.**

*Cámara de secado.*



*Nota:* Representación gráfica de equipo para secado de material fino. Tomado de Made-in-China, «Equipos de Filtración Industrial,» [En línea]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_kryiqi/product\\_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel\\_enyogehsy.html](https://es.made-in-china.com/co_kryiqi/product_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel_enyogehsy.html). [Último acceso: Noviembre 2022].

### **5.2.3 Calderas y/o termotanque**

Para el proceso de adsorción de fenol, teniendo en cuenta las condiciones óptimas del proceso, dadas por los análisis y resultados vistos con anterioridad; este equipo es empleado con el fin de elevar la temperatura del agua [55]. Puede ser encontrado en el mercado con valores que fluctúan entre los 1.200 USD – 1.500 USD (6'000.000 COP – 7'500.000 COP), para capacidades bajas.

**Figura 22.**

*Caldera.*



*Nota:* Representación gráfica de equipo para calentar mezcla de agua residual y cabello en proceso de Adsorción. Tomado de Smi Sur S.R.L., «Calentadores de Paso de Agua,» [En línea]. Available: <https://calderasindustrialesperu.com/productos/calentadores-de-paso-de-agua/>. [Último acceso: Noviembre 2022].

#### 5.2.4 Tanque de filtro de agua

Para realizar el proceso de separación del material sólido (fibras de cabello) y líquido (agua), es implementado un equipo de filtración industrial con embudo.

**Tabla 11.**

*Especificaciones filtro de agua.*

<b>Especificación</b>	<b>Equipo ZF - 10 L</b>
Volumen	10 L
Filtro	10 L
Tamaño	1200 x 400 x 400

*Nota:* Resumen de especificaciones volumétricas en filtro de agua. Tomado de Made-in-China, «Equipos de Filtración Industrial,» [En línea]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_kryiqi/product\\_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel\\_enyogehsy.html](https://es.made-in-china.com/co_kryiqi/product_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel_enyogehsy.html). [Último acceso: Noviembre 2022].

En el mercado este equipo se encuentra a un valor de entre los 500 USD – 1.000 USD (2'500.000 COP - 5'000.000 COP), teniendo en cuenta la capacidad de la planta piloto a evaluar.

**Figura 23.**

*Filtro de agua.*



*Nota:* Representación gráfica de equipo de separación de sólidos y líquidos luego de proceso de adsorción. Tomado de Made-in-China, «Equipos de Filtración Industrial,» [En línea]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_kryiqi/product\\_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel\\_enyogehsy.html](https://es.made-in-china.com/co_kryiqi/product_Lab-Industrial-Filtration-Equipment-Nutsch-Filter-Buchner-Funnel_enyogehsy.html). [Último acceso: Noviembre 2022].

### 5.2.5 Tanques de almacenamiento

Utilizados principalmente para almacenar el producto final y los subproductos frutos del proceso; para este equipo en particular la capacidad máxima es de 50 L.

**Figura 24.**

*Tanque de almacenamiento.*



*Nota:* Representación gráfica de equipos destinados al almacenamiento de productos y subproductos en cada etapa del proceso. Tomado de CITRUS: Engineering a Better World, «Tanques de Proceso de Acero Inoxidable,» [En línea]. Available: <https://citrus.mx/wp-content/cache/all/producto/tanques-de-proceso-de-acero-inoxidable/index.html>. [Último acceso: Noviembre 2022].

El coste del equipo en el mercado se encuentra entre 500 USD – 750 USD (2'500.000 COP - 3'750.000 COP)

### 5.3 Viabilidad económica

Se consideran principalmente, maquinaria y equipos, de planta piloto establecidos en la tabla 12 reportada a continuación.

**Tabla 12.**

*Costos fijos.*

Concepto	Cantidad	Inversión
Lavador de tornillo	1	\$ 7.500.000
Camara de secado	1	\$ 12.000.000
Caldera	1	\$ 6.500.000
Filtradora	1	\$ 3.000.000
Tanques de almacenamiento	5	\$ 2.500.000
<i>Inversión inicial</i>	-	<i>\$ 41.500.000</i>

*Nota:* Consolidado costos fijos de inversión, enfocados en la adquisición de equipos para la planta piloto.

De acuerdo con lo establecido previamente, la inversión inicial para la planta piloto enfocada a la adsorción de compuestos fenólicos en aguas residuales por medio de estructuras capilares es de 41.500.000 COP, teniendo en cuenta que esta inversión será entendida como un costo fijo.

Por otro lado, se hacen estimaciones de producción para un mes, dichos resultados a continuación:

**Tabla 13.**

*Consideraciones costos fijos y variables.*

Concepto	Valor	Unidad	Premisas
Cantidad	5502	L/mes	Litros producidos en cuatro semanas de producción, se trabaja de lunes a viernes, 8 horas al día.
Costo fijo	8.000.000	COP	Considerando arriendos, gastos de servicios y pagos de nómina.
Costos variables	700	COP	Se estipula teniendo en cuenta el 30% del margen sobre el precio de venta.
Precio de venta	1.000	COP	Precio esperado de venta por cada litro de agua.

*Nota:* Consideraciones producción, costos fijos, costo de producto terminado (1 L de agua libre de compuesto fenólico) y precio de venta para un mes de producción.

Los indicadores económicos considerados en la presente investigación son; Tasa Interna de Retorno (TIR), y Costo beneficio (B/C); para la presente investigación, se consideran las ecuaciones 10 y 11, para el cálculo de los indicadores previamente mencionados:

**Ecuación 10.**

*Ecuación Tasa Interna de Retorno*

$$B - A = X/A(100) \rightarrow 1.000 - 700 \rightarrow 300/700 \rightarrow 0,43 \text{ ó } 43\%$$

*Nota:* Cálculo para determinar el valor de TIR, para el proyecto; se reemplazan los valores tenidos en cuenta en la tabla 13.

Donde:

B: Valor final esperado de ventas (Precio de venta en tabla 13)

A: Costos de operación (Costos variables en tabla 13)

X: Diferencia entre B y A

### **Ecuación 11.**

*Costo beneficio.*

$$\text{Costo beneficio} = \frac{\text{Beneficios netos}}{\text{Costos de inversión}} \rightarrow \frac{5.502.000}{3.458.333} = 1,6$$

*Nota:* Cálculo para determinar el valor de Costo beneficio, para el proyecto.

Donde:

Los costos de inversión es la “inversión inicial” establecida en la tabla 12, con la cual se determinó un valor de COP \$41.500.000, considerando que este valor se termina para un año, para facilidad de cálculo, el valor se debió en 12 (número de meses en el año), para tener todos los números bajo la misma unidad.

Finalmente, los beneficios netos fueron determinados mediante la multiplicación de los valores de “precio de venta” y “cantidad” establecidos en la tabla 13.

El valor establecido de costo beneficio, al ser mayor a 1, establece que el proyecto es viable económicamente bajo este indicador, considerando que cada indicador fue obtenido bajo un supuesto de producción de 1 mes.

### **5.4 Viabilidad ambiental**

Partiendo de que el principal objetivo de la presente investigación, es ofrecer una solución ambientalmente eficiente para el tratamiento de aguas residuales, especialmente, en la adsorción de sustancias de origen fenólico presentes en ellas, por medio de una variedad de análisis donde se establecen temperaturas y tiempos de operación mínimos, ofreciendo así un bajo consumo de energía en la planta, y adicionalmente arrojando como resultado una adsorción de más del 90% de dichos compuestos, se cumple con el parámetro de 0,20 mg/L para la concentración máxima permisible en vertimientos, establecido así en la regulación colombiana.

De acuerdo con el ministerio de ambiente, en 2005 se establece la política de recolección de desechos peligrosos, la cual busca la gestión integral de residuos peligrosos que ayuda a la problemática ambiental asociada a su generación y manejo, de esta manera proteger el medio ambiente y la salud humana, por lo anterior se definen gestores capacitados para este fin [56],

teniendo en cuenta esto, su recolección resulta ser de fácil acceso; considerando que este residuo orgánico actualmente no tiene ningún valor comercial, el uso de esta materia prima resulta tener una gran viabilidad no solo ambiental, también económica.

El aprovechamiento de residuos de índole orgánica trae consigo múltiples beneficios, teniendo en cuenta que este tipo de desechos son los generados en mayores proporciones [57], ya que ello conlleva al ahorro en costos de adquisición de materias primas, reducción de energía, agua y emisiones de efecto invernadero, y a su vez tiene un papel de suma importancia en la generación de empleo en la industria [58]. Es por esto, que el proyecto de investigación expuesto impacta directamente en la reducción de los restos de cabello humano, donde además de contribuir a la utilización de este tratándose de un desperdicio, es implementado para tratar una problemática ambiental de suma preocupación, la contaminación de recursos hídricos por sustancias peligrosas tales como los fenoles [59].

## 6. CONCLUSIONES

Las estructuras capilares del cabello humano resultan ser una alternativa prometedora para la adsorción de compuestos fenólicos de soluciones acuosas, ya que con los resultados obtenidos es posible afirmar como durante un lapso de 90 minutos bajo condiciones de temperatura de 50 °C, la remoción de dichas sustancias fue casi completa, logrando un resultado de 98,65%; valor que resulta bastante positivo no solo por el hecho de extraer este compuesto, el cual representa peligro para salud y bienestar de los seres vivos y los ecosistemas, sino también porque se le está dando tratamiento a un residuo orgánico convirtiéndolo en un adsorbente de igual tipo.

Según los estudios realizados mediante la implementación del método fotométrico directo por colorimetría, fue posible establecer un valor de concentración de sustancias de origen fenólico en el Canal Arzobispo, ubicado en la ciudad de Bogotá, de 0,002 mg/L, lo cual a pesar de encontrarse dentro de los parámetros establecidos por la normativa colombiana para aguas residuales, nos indica como el vertido de efluentes de industrias productoras de fármacos, textiles, resinas sintéticas, herbicidas y pesticidas, impactan directamente en la calidad de los recursos hídricos.

De acuerdo con los resultados, se logra establecer un método de preparación de estructuras capilares las cuales fueron funcionales para adsorción de compuestos fenólicos, por lo anterior esto resulta ser un procedimiento corto, aunque necesario, buscando un adsorbente libre de material particulado que genere interferencia con el método de adsorción; así mismo, se establece variables (tales como pH del jabón, cantidad y tipo de agua) óptimas para llevar este proceso a cabo de manera eficiente.

Considerando los aspectos técnicos, económicos y ambientales establecidos en el presenta trabajo de investigación, es posible aseverar que el proyecto de la implementación de un adsorbente orgánico de compuestos de origen fenólico, a partir de estructuras capilares, resulta una opción bastante viable para ser evaluado a una escala de planta piloto, esto considerando el fácil acceso a materias primas, el aprovechamiento de estas, así como el bajo costo de inversión para planta piloto teniendo en cuenta la capacidad de la misma y bajos costos relacionados a la operación proyectados.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fundación Aquae, «La importancia del agua en los seres vivos,» 12 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/importancia-del-agua/>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [2] Nestlé por Niños Saludables, «La importancia del agua en el planeta y en nuestras vidas,» 9 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.nestleporninossaludables.co/blog/articulo/importancia-del-agua>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [3] Organización de las Naciones Unidas, «Desafíos globales, Agua,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/water>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, «Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016, Agua y Empleo,» París, 2016.
- [5] V. Florencia Ailen, «Contaminación de Aguas,» Universidad de Belgrano, Buenos Aires, 2021.
- [6] Iberdrola, «Contaminación del Agua, La contaminación del agua: cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [7] Organización Mundial de la Salud, «Agua para consumo humano,» 21 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [8] D. Cortés Pérez, «Principales contaminantes naturales del agua,» [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/principales-contaminantes-naturales-del-agua.html>. [Último acceso: Septiembre 2022].

- [9] S. Menchaca Dávila, «Actividades Humanas y el Agua,» 12 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.uv.mx/cienciauuv/blog/lasactividadeshumanasyelagua/>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [10] M. Meersseman, «Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas por Fenol con Adsorción en Carbón Activo,» 30 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/tratamiento-de-aguas-residuales-contaminadas-por-fenol-con-adsorci-n-en-carb-n>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [11] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, «Fenoles,» [En línea]. Available: <https://prtr-es.es/fenoles,15658,11,2007.html#>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [12] E. Gimeno Creus, «Compuestos fenólicos: Un análisis de sus beneficios para la salud,» *Elsevier*, vol. 23, n° 6, pp. 80-84, Junio 2004.
- [13] P. De la Cruz Burelo, R. M. Melgoza Alemán, C. Valerio Cárdenas y M. G. Valladares Cisneros, «Adsorventes não convencionais, alternativas sustentáveis para o tratamento de águas residuais,» *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 16, n° 31, pp. 55-73, Diciembre 2017.
- [14] D. A. Blanco Martínez, L. Giraldo, C. Mojica Sánchez, J. C. Moreno Piraján, W. M. Ramírez Gómez y N. G. Rincón Silva, «Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Caracterización y evaluación de la capacidad de absorción de fenol desde solución acuosa.,» *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, n° 1, pp. 207-219, 2014.
- [15] Y. Miguel Gallo, J. O. Prieto García y I. L. Rodríguez Rico, «Influencia del pH y la temperatura en la,» *Afinidad*, vol. 74, n° 579, pp. 176-179, 2017.
- [16] E. J. Aylas Orejón, «Estudio de la Adsorción de Fenol, 4-nitrofenol y 4-clorofenol Utilizando Carbón Activado Modificado con Cobre,» Pontificia Universidad Católica del Perú - Escuela de Posgrado, San Miguel, 2018.

- [17] N. A. Cuizano, B. P. Llanos y A. E. Navarro, «Aplicaciones ambientales de la adsorción mediante biopolímeros naturales: Parte 1-Compuestos fenólicos,» *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 75, nº 4, pp. 495-508, 2009.
- [18] R. Beltrán Suito, «Aplicación de un Diseño Experimental Factorial en el Estudio de la Adsorción de Fenol y Nitrofenoles con Nanofibras de Carbono,» Pontifica Universidad Católica del Perú, Lima, 2015.
- [19] V. Vacca J., G. Colina, E. Behling, J. Martín, N. Rincón, E. Chacín, A. Díaz y N. Fernández, «Adsorption for the Removal of Phenolic Compounds from the Effluent of a Biologic Reactor,» *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 35, nº 3, pp. 252-260, Diciembre 2012.
- [20] A. L. Arango Villar, «Estudio de la Adsorción de Fenol Mediante la Obtención y Modificación de Carbón Activado a partir de Llantas de Caucho,» Universidad de los Andes, Bogotá D.C., 2006.
- [21] L. Giraldo, J. F. González y J. C. Moreno Piraján, «Adsorción de Fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cáscara de Coco: isotermas y cinéticas de adsorción,» *Afinidad*, vol. 68, nº 554, pp. 290-295, 2011.
- [22] L. F. Navarrete Rodríguez y Z. Rodríguez Parra, «Evaluación de la Cascarilla de Higuierilla como Posible Adsorbente de Contaminantes Fenólicos en Fase Acuosa,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 36, nº 141, pp. 595-598, 2012.
- [23] G. Delgadillo Gamboa y M. d. R. Sun Kou, «Adsorción de Fenol con Carbones Activados Preparados a partir de Pepas de Níspero de Palo por Activación Química,» *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 75, nº 1, pp. 64-75, 2009.
- [24] G. M. Gadd, «Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment,» *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 84, nº 1, pp. 13-28, 2008.

- [25] R. Marchant, G. McMullan, P. Nigam y T. Robinson, «Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative,» *Elsevier*, vol. 77, n° 3, pp. 247-255, 2001.
- [26] N. Balasubramanian, C. A. Basha, K. Koteeswaran, V. Ramamurthi, P. A. Soloman y M. Velan, «Electrochemical Degradation of Remazol Black B Dye Effluent,» *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 37, n° 11, pp. 889-900, 2009.
- [27] ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry, «ToxFAQs™ for Phenol,» Septiembre 2008. [En línea]. Available: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxFAQs/ToxFAQsDetails.aspx?faqid=147&toxid=27>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [28] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 631 de 2015, Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015*, 2015.
- [29] V. Talanquer y I. Tubert, «Sobre adsorción,» *Para Saber, Experimentar y Simular*, vol. VIII, n° 4, pp. 186-190, 1997.
- [30] M. A. Díaz Viera y J. E. Santos, «Modelación de fenómenos de adsorción en problemas de flujo y transporte,» México, 2016.
- [31] Departamento de Química Física, Tema 7. Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea, Valencia: Univèrsitat de València.
- [32] D. L. Molina Campos y Y. R. Vergaray Campos, «Revisión bibliográfica de la adsorción de cadmio y plomo en agua usando biocarbón elaborado con residuos forestales,» Universidad César Vallejo, Lima, 2020.
- [33] D. M. Aguilera Casabella, M. H. Broche Galindo, A. Curbelo Sánchez, Á. Mollineda Trujillo y J. O. Prieto García, «Estudio Cinético y Termodinámico de la Adosrción de Plomo (II) en Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar,» *Revista Centro Azúcar*, vol. XLVI, n° 3, 2019.

- [34] L. M. Atarés Huerta, «La isoterma de Langmuir,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2022.
- [35] M. González, «Isoterma de Freundlich,» 25 Abril 2011. [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/isoterma-de-freundlich>. [Último acceso: 26 Enero 2023].
- [36] F. Aisisien, A. Adeboyejo y A. N. Amenaghawon, «Application of Recycled Rubber from Scrap Tire in the Removal of Phenol from Aqueous Solution,» 2013.
- [37] Clínica Universidad de Navarra, «Diccionario Médico: Queratina,» [En línea]. Available: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/queratina>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [38] S. R. Collie y A. Ghosh, «Keratinous Materials as Novel Absorbent Systems for Toxic Pollutants,» *Defence Science Journal*, vol. 64, nº 3, pp. 209-221, 2014.
- [39] N. S. Romero Buitrago, «Evaluación del potencial de adsorción de las fibras de queratina en la remoción de compuestos químicos contaminantes presentes en las aguas - hierro,» Universidad de La Salle, Bogotá D.C., 2005.
- [40] IESMAT, «Quimisorción,» [En línea]. Available: [https://iesmat.com/catalogos/WC\\_QUIMISOR/quimisorcion/](https://iesmat.com/catalogos/WC_QUIMISOR/quimisorcion/). [Último acceso: Septiembre 2022].
- [41] M. A. Ahmad Zeini y R. M. Sudi, «Valorization of human hair as methylene blue dye,» *Green Process Synth*, vol. 7, pp. 344-352, 2018.
- [42] A. G. Adeniyi, I. Jimoh, I. A. Lawal, C. J. Ngila, C. O. Ogunkunle, H. K. Okoro, M. M. Orosun, S. Pandey y C. Zvinowanda, «Nanomaterial-based biosorbents: Adsorbent for efficient removal of selected organic pollutants from industrial wastewater,» *Emerging Contaminants*, vol. 8, pp. 46-58, 2022.

- [43] E. G. Carrilo Cedillo, *Evaluación de Fenol y Clorofenoles en Agua Purificada*, Tijuana: Universidad Autónoma de Baja California, 2008.
- [44] F. K. Attiogbe, M. Glover Amengor y K. T. Nyadziehe, «Correlating biochemical and chemical oxygen demand of effluents – A case study of selected industries in Kumasi, Ghana,» *West African Journal of Applied Ecology*, vol. 11, nº 1, 2007.
- [45] M. Han, F. He y L. Yu, «A review of treating oily wastewater,» *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 10, nº 2, pp. 913-922, 2017.
- [46] W. A. Largo Taborda y M. H. Rosero Moreano, «Determinación de compuestos fenólicos mediante microextracción con solvent bar usando HPLC-UV enmuestras de aguas residuales contaminadas con vinazas,» *Scientia Chromatographica*, vol. 8, nº 2, pp. 121-127, 2016.
- [47] L. Chimuka, A. Masevhe y F. Nefale, «Determination of Phenols in Water Samples using a Supported Liquid Membrane Extraction Probe and Liquid Chromatography with Photodiode Array Detection,» *Sabinet African Journals*, vol. 60, pp. 102-108, 2007.
- [48] ECOPETROL S.A., «Convenio Marco 5220334, Acuerdo de Cooperación N°01,» Bucaramanga, 2015.
- [49] Fgm04 Cosmetica Professionale, «¿Qué es fenólico y dónde está el fenol?,» [En línea]. Available: <https://fgm04.com/es/blog/60-qu-significa-fenlico-y-dnde-est-el-fenol>. [Último acceso: 26 Enero 2023].
- [50] APHA, AWWA y W. , «Determinación de Componentes Orgánicos, Fenoles,» de *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales*, Madrid, Díaz de Santos, 1992, pp. 5-56 - 5-62.
- [51] S. M. Al-Asheh y F. Banat, «The Use of Human Hair Waste as a Phenol Biosorbent,» *Adsorption Science and Technology*, vol. XIX, nº 7, pp. 599-608, 2001.

- [52] E. Martínez Rodríguez, «Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal,» *Anuario jurídico y económico escurialense*, vol. 38, pp. 315-332, 2005.
- [53] DISMET, «Lavadores de tornillo para finos MEKA,» [En línea]. Available: <https://www.dismet.com/product/productos-meka/lavado-meka/lavadores-de-tornillo-para-finos-meka/>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [54] Franz Binder GmbH & Co., «Cámaras de secado en uso: definición, aplicaciones y criterios de selección,» [En línea]. Available: <https://pages.binder-world.com/es/camara-de-secado>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [55] Smi Sur S.R.L., «Calentadores de Paso de Agua,» [En línea]. Available: <https://calderasindustrialesperu.com/productos/calentadores-de-paso-de-agua/>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [56] M. d. A. y. D. Sostenible, «www.minambiente.gov.co,» [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-peligrosos/>. [Último acceso: Enero 2022].
- [57] VOLTA, «¿Cómo se pueden reutilizar los residuos orgánicos?,» 2 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.voltachile.cl/reutilizar-residuos-organicos/>. [Último acceso: 9 Febrero 2023].
- [58] Ecoembes, «Beneficios de reciclar,» [En línea]. Available: <https://www.ecoembes.com>. [Último acceso: 09 02 2023].
- [59] R. Abreu Cuadra, C. Martínez Bracho, H. Moran Guillén y J. Perozo Cuicas, «Tratamiento de aguas residuales fenólicas de refinería por métodos electroquímicos,» *Multiciencias*, vol. 16, n° 3, pp. 239-246, 2016.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Considerando que en el presente trabajo se realizó 1 replica que arrojó datos significativos para la investigación, dado que el alcance económico para este proyecto no superaba \$1.000.000; es recomendable para futuros ensayos, realizar por lo menos 3 replicas con las cuales se logren determinar de mejor manera las especificaciones del proceso de adsorción de fenoles con cabello humano.

Teniendo en cuenta que en la presente investigación se estudió el efecto de la temperatura y el tiempo en función de la concentración, es recomendable en futuros estudios considerar otras variables no establecidas anteriormente, tales como la cantidad del adsorbente, es decir, de cabello, y la concentración inicial de la muestra, con el fin de establecer una relación ideal entre cantidad y concentración para llevar a cabo esta técnica.

El tratamiento de residuos resulta un tema de gran importancia debido a que con ello se pretende reducir la contaminación ambiental, evitar riesgos para salud, y adicionalmente, preservar los recursos que nos brinda la naturaleza; es por ello que es necesario estudiar, en futuras investigaciones, el procedimiento óptimo para realizar la disposición del cabello humano utilizado para la remoción de compuestos fenólicos, pues es evidente que el adsorbente orgánico debido a la tarea que ejerció, se encuentra contaminado con sustancias perjudiciales y por ello no puede ser tratado ni desechado como un material del común.