

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Investigación de la remoción de sulfatos en aguas residuales de la industria textil por métodos físico-químicos.**

**Jhonatan Isaac Criollo Criollo**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Químico

Quito, 4 de mayo del 2020

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**  
**COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**

**HOJA DE CALIFICACIÓN**  
**DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Investigación de la remoción de sulfatos en las aguas residuales de la  
industria textil por métodos físicos-químicos.**

**Jhonatan Isaac Criollo Criollo**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Daniela Almeida Streitwieser, Ph.D.**

Quito, 4 de mayo del 2020

## **DERECHOS DE AUTOR**

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

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

Nombres y apellidos: Jhonatan Isaac Criollo Criollo

Código: 00124942

Cédula de identidad: 1725210890

Lugar y fecha: Quito, 4 de mayo de 2020

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

La remoción de sulfatos representa un reto en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, principalmente por la formación de sales solubles en cuerpos de agua. El objetivo de este trabajo es brindar consideraciones que permitan optimizar el diseño para tratar efluentes con presencia de sulfatos en sus vertidos. Para ello, se evaluó la remoción aplicando dos métodos: adsorción y coagulación-floculación. Para la remoción por coagulación-floculación se utilizó policloruro de aluminio con 12% en alúmina como agente coagulante y poliacrilamida catiónica como floculante. Se investigó el tratamiento en aguas sintéticas a diferentes valores de pH, y variando la dosificación de coagulante y floculante. Se observó que a una razón molar de 7.2:1 entre el coagulante y los sulfatos, se registra una remoción de 81.65% del valor inicial de sulfatos (1800 mg/L). Para la remoción por adsorción se utilizó carbón activado granular 6x12 en un sistema batch con una concentración del 10% en masa/volumen por 90 minutos, donde la máxima remoción registrada fue del 16.5%. Estos resultados muestran que mediante adsorción por carbón activado no logra remover sulfatos, mientras que por coagulación-floculación se alcanzan remociones de hasta el 80% de sulfatos con un valor final de 330 mg/L, valor que cumple con el límite máximo permisible de 400 mg/L en la normativa ecuatoriana (TULSMA, 2017).

Palabras clave: Sulfatos, Plantas de tratamiento, coagulación, floculación, adsorción, carbón activado, policloruro de aluminio, aguas residuales.

## ABSTRACT

Sulfate removal present a challenge during the design of wastewater treatment plants from the textile industry, mainly due to the formation of soluble salts in water bodies. Therefore, the objective of this work is to investigate different methods to treat effluents with the presence of sulfates in their discharges. For this, adsorption and coagulation-flocculation methods were evaluated. Aluminum polychloride with 12% in alumina was used as a coagulating agent and cationic polyacrylamide as a flocculant. The treatment was carried out in synthetic water and after varying the pH, the dosage of coagulant and flocculant was varied. It was observed that at a molar ratio between coagulant and sulfates of 7.2: 1, the sulfates were removed by 81.65% of the initial value. While for adsorption, granular activated carbon with mesh 6x12 was used in a batch system with a concentration of 10% in mass / volume where, the maximum recorded removal was 16.5%. These results show that adsorption by activated carbon show no significant sulfate removal, while by coagulation – flocculation up to 80% removal has been achieved. A value that complies with the maximum permissible limit of 400 mg/L in Ecuadorian regulations (TULSMA, 2017).

Key words: Sulfates, Treatment plants, coagulation, flocculation, adsorption, activated carbon, aluminum polychloride, wastewater.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
2.1 Recurso Hídrico e Industria en Ecuador .....	12
2.2 Agentes Contaminantes Presentes en Aguas Residuales y Efectos de su Descarga..	13
2.3 Industria Textil en Ecuador.....	15
2.5 Sulfatos en la Industria Textil .....	19
2.6 Tratamiento de Aguas Residuales.....	20
2.7 Métodos para la Remoción de Sulfatos .....	21
2.8 Coagulación/floculación para la Remoción de Sulfatos .....	23
2.9 Adsorción de Sulfatos en Carbón Activado.....	24
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>25</b>
3.1 Muestreo y caracterización de las aguas residuales de una industria textil. ....	25
3.3 Método colorimétrico para determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)	25
.....	25
3.4 Determinación de sólidos totales (TS).....	26
3.5 Determinación de sólidos orgánicos totales (oTS) .....	27
3.6 Determinación de solidos suspendidos totales (SST). ....	27
3.7 Determinación turbidimétrica de sulfato .....	28
3.8 Diseño de experimentos para remoción de sulfatos.....	28
3.9 Remoción de sulfatos por coagulación/floculación.....	28
3.10 Remoción de sulfatos con carbón activado en un sistema batch .....	29
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
4.1 Caracterización de aguas residuales.....	31
4. 2 Coagulación Floculación .....	31
4.3 Adsorción en carbón activado.....	35
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>36</b>
<b>6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>38</b>
<b>7. Anexo A: Ficha Técnica – PAC2-pv1.....</b>	<b>42</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles para descargas líquidas por cuerpo receptor.....	13
Tabla 2. Contaminantes generales presentes en aguas residuales.....	14
Tabla 3. Principales fuentes de descargas de sulfatos en aguas residuales según la industria.	15
Tabla 4. Resumen de operaciones unitarias, procesos o sistemas de tratamientos para eliminar los contaminantes presentes en el agua.....	20
Tabla 5. Resumen de ventajas y desventajas de los distintos tipos de tratamiento elegido para la remoción efectiva de sulfatos.....	22
Tabla 6. Resultados de caracterización de las aguas residuales.....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.1 Composición porcentual a nivel nacional de los distintos usos de agua en Ecuador (SENAGUA, 2017). .....	12
Figura 2. Esquema básico de insumos básicos empleados en la producción de textiles(Sedlak, 2013) .....	16
Figura 3. Cadena de producción de una fibra de la industria textil (Sedlak, 2013). .....	17
Figura 4. Tecnologías para el tratamiento de sulfatos (Arnold et al., 2016). .....	21
Figura 5. Resultados de variación de floculante con una proporción 10:1 PAC:SO <sub>4</sub> .....	32
Figura 6. Remoción de sulfatos en función de la variación de policloruro de aluminio (PAC) a distintos pH.....	33
Figura 7. Disminución de sulfatos y porcentaje de remoción. Variando la proporción PAC: SO <sub>4</sub> .....	34
Figura 8. Remoción de sulfatos en función del tiempo para distintas concentraciones de carbón activado 6x12. ....	36

## 1. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) informó que en el año 2016 más del 80% de las aguas residuales provenientes de la actividad humana se descargaron directamente en ríos o en el mar, sin recibir ningún tipo de tratamiento (ONU, 2016). Esto genera una carga de contaminación en el agua que altera el ecosistema, genera un riesgo para la salud y limita considerablemente el uso del agua. Por ello, es importante presentar métodos efectivos de tratamientos de agua que permitan reducir considerablemente la carga contaminante a las fuentes de agua.

Dentro de las principales industrias que presentan mayor potencial de contaminación se encuentra el sector manufacturero, por el uso continuo de agentes químicos para el tratamiento de materias primas. De este sector, la industria textil que tiene por objetivo la preparación y tinturado de fibras para la elaboración de telas, no tejidos y productos terminados, mantienen un alto potencial de contaminación debido a que en sus vertidos presentan agentes contaminantes y requieren del uso de grandes volúmenes de agua con agentes químicos para generar los productos deseados (Samanta et al., 2019).

Solo en el Ecuador para el año 2018, se registraron 315 empresas en el sector textilero con 48.4 millones USD en ventas al exterior en un periodo de 6 meses desde enero a junio de ese año (Tapia, 2018). La descarga de contaminantes varía para cada empresa dependiendo de las distintas unidades de proceso que mantiene y al sistema de tratamiento de aguas del cuál disponen. Sin embargo, solo para generar un kilogramo de material textil, se requieren de 50 a 150 L de agua (Senthil Kumar & Grace Pavithra, 2019).

Los efluentes de este sector varían en calidad y cantidad de distintas especies químicas, mezclas complejas que son de naturaleza orgánica e inorgánica. Los principales impactos que generan estos agentes sobre el medio ambiente son: disminución del contenido

de oxígeno, fomenta la eutrofización (aceleración de los procesos de maduración de cuerpos de agua), corrosión de tuberías, variación de pH, entre otros. Uno de los contaminantes más recurrentes dentro de este sector, son las sales inorgánicas a base de sulfatos que en altas concentraciones ( $>500$  mg/L) presentan un riesgo para la salud humana e incluso aporta a la corrosión de tuberías y en la acidez de cuerpos de agua (Giti, 2015).

Existen distintos métodos de tratamiento de sulfatos, como por ejemplo: a través de la precipitación con agentes químicos, adsorción, filtración, intercambio iónico, métodos físico-químicos o electroquímicos y por tratamiento biológico (Runtti et al., 2018). Cada uno de los métodos varía en el valor de remoción de sulfatos y en los costos de inversión necesarios para diseñar los sistemas de tratamientos de aguas residuales. Por ello, es recurrente el uso de agentes coagulantes-floculantes como las sales de aluminio debido, a su costo relativamente económico y por su rendimiento en la remoción de sulfatos junto con otros contaminantes.

En este estudio se investigó la remoción de sulfatos en aguas sintéticas por: métodos físico-químicos y adsorción en carbón activado, con el objetivo de encontrar el método más efectivo. Y a su vez, encontrar las condiciones de operación óptimas para brindar una base de diseño para optimizar las plantas de tratamiento de aguas existentes.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Recurso Hídrico e Industria en Ecuador

Ecuador es un país reconocido por su biodiversidad biológica en el mundo (CEPAL & ONU, 2018). Posee una disponibilidad anual de agua que varía de 4320.000 hm<sup>3</sup> en la temporada lluviosa a 146.000 hm<sup>3</sup> en la temporada seca. El volumen total de recursos hídricos a nivel nacional es de 376 018 hm<sup>3</sup>, del cual un 96% corresponden a aguas subterráneas y un 4% corresponden a aguas superficiales. La distribución porcentual de los principales usos del agua en el país se detalla en la Figura.1.

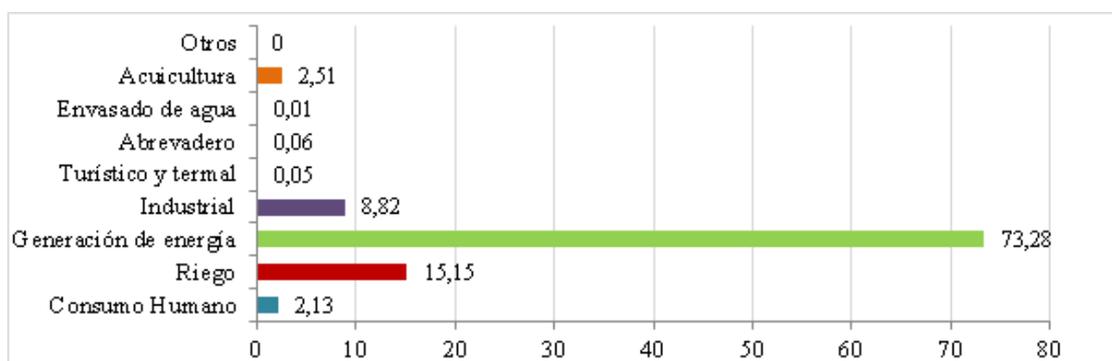


Figura.1 Composición porcentual a nivel nacional de los distintos usos de agua en Ecuador (SENAGUA, 2017).

En el 2018 en Ecuador, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) registró 899 208 empresas activas, por medio de conteo en procedimientos legales como: declaración de ventas en el SRI (Servicio de Rentas Internas), plazas de empleo en el IESS (Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social) o paga de impuestos bajo el Régimen Impositivo Simplificado (RISE). La distribución porcentual por sector económico es 42.66% para servicios, 34.93% para comercio, 10.38% para agricultura/ganadería/pesca/silvicultura, 8.38% para la industria manufacturera y 3.43% para construcción (INEC, 2018). De esta distribución de empresas, es importante enfatizar que la industria manufacturera es uno de los sectores con mayor potencial de contaminación a cuerpos de agua debido al uso de químicos

o descarga de residuos sólidos, liberando principalmente agentes asociados a los sólidos en suspensión, sales orgánicas e inorgánicas disueltas, materia orgánica biodegradable, sustancias no degradables, entre otros (Samanta et al., 2019).

## 2.2 Agentes Contaminantes Presentes en Aguas Residuales y Efectos de su Descarga

En Ecuador el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente limita el volumen de contaminantes presentes en aguas residuales por fuente de descarga. En la Tabla 1, se detallan los límites de descarga de cada agente contaminante por cuerpo receptor.

*Tabla 1. Límites máximos permisibles para descargas líquidas por cuerpo receptor (TULSMA, 2017)*

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite en alcantarillado</b>	<b>Límite en cuerpo de agua dulce</b>
Aceites y grasas	A y G	mg/L	70	30
Aluminio	Al	mg/L	5.0	5.0
Bario	Ba	mg/L		2.0
Cadmio	Cd	mg/L	0.02	0.02
Cobre	Cu	mg/L	1.0	1.0
Compuestos organoclorados	Organoclorados Totales	mg/L	0.05	0.05
Cromo hexavalente	Cr	mg/L	0.5	0.5
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO	mg/L	170	100
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	350	160
Materia flotante	Materia Visible	-	Ausencia	Ausencia
Plomo	Pb	mg/L	0.5	0.2
Potencial de hidrógeno	pH	-	6 – 9	6 – 9
Sólidos totales	TS	mg/L	1600	1600
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	mg/L	400	1000
Temperatura	-	°C	< 40°C	Condición natural +/- 3°
Tensoactivos	Substancias activas al azul de metileno	mg/L	1	0.5
Turbidez	.	NTU	Turbidez del cuerpo	Turbidez del cuerpo

A continuación en la Tabla 2, se detallan los principales contaminantes en aguas residuales junto con los posibles efectos que generan y la definición del contaminante.

Tabla 2. Contaminantes generales presentes en aguas residuales(METCALF & EDDY INC, 1995)(Ramalho, 2003).

Contaminantes	Definición	Efecto
Sólidos en suspensión	Materia sólida inmisible.	Generación de fangos y fomentan condiciones anaerobias en el cuerpo receptor.
Materia orgánica biodegradable	Materia derivada de proteínas, carbohidratos y grasas.	Su descarga a cuerpos de agua conlleva al agotamiento de los niveles de oxígeno y fomenta el desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Organismos infecciosos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas.
Nutrientes	Descargas con nitrógeno, fósforo y carbono.	Fomentan el crecimiento de organismos acuáticos no deseados, en agua promueven la eutrofización del agua. La descarga en terrenos puede contaminar las fuentes subterráneas.
Contaminantes prioritarios	Descargas de compuestos determinados en base a su toxicidad y carcinogenicidad.	Alteran severamente la calidad del agua y aumentan la toxicidad.
Materia orgánica refractaria	Agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas agrícolas.	Materia orgánica resistente a métodos convencionales de tratamiento.
Sólidos inorgánicos disueltos.	Inorgánicos no disueltos como calcio, sodio o sulfatos.	Lluvia ácida, eutrofización de agua y corrosión de tuberías.

De los contaminantes mencionados, los agentes que usualmente representan un reto para el tratamiento de aguas residuales son la materia orgánica, contaminantes prioritarios y los sólidos inorgánicos disueltos. Dentro de los sólidos inorgánicos disueltos, los sulfatos son contaminantes que se deben considerar en vertidos industriales debido a que cuando exceden concentraciones mayores a 500 mg/L en cuerpos de agua, presenta propiedades laxantes en seres humanos y contribuyen en la diarrea osmótica, acidosis metabólica, colitis ulcerativa, fallas renales e hipertiroidismo (Giti, 2015). Mientras que en animales, puede conllevar a una severa deshidratación, diarrea crónica y desencadenar en la muerte (Bashir et al., 2012; MN Department of Health, 2019). Además los sulfatos son un componente que fomenta la producción de lluvia ácida y acelera los procesos de degradación (la corrosión en tuberías). Es por ello, que es importante investigar procesos que reduzcan considerablemente la carga de este contaminante en aguas residuales.

El compuesto sulfato es un anión con una carga iónica de -2, presente en la gran mayoría de cuerpos de agua, a pesar de no ser considerada una especie tóxica, en altas concentraciones puede ser perjudicial por las razones ya mencionadas (Meays & Nordin, 2013). Esta sustancia dificulta su remoción de aguas residuales debido a que esta especie tiende a reaccionar con varios elementos para formar sales que en su mayoría son solubles y únicamente las sales de calcio, bario y de metales pesados no presentan solubilidad en agua (Lide, 2009). Algunas de las fuentes con mayor descarga en sulfatos a través de aguas residuales según el tipo de industria se detallan en la Tabla 3.

*Tabla 3. Principales fuentes de descargas de sulfatos en aguas residuales según la industria (Brahmacharimayum et al., 2019).*

<b>Origen</b>	<b>Valor de sulfatos (mg/L)</b>	<b>Referencia</b>
Industria del cuero	2500 – 3000	(Galiana-Aleixandre et al., 2011; Kaul et al., 2005)
Farmacéutica	500 – 600	(Management Association, 2020)
Industria minera	100 – 20 000	(Bowell et al., 1998)
Producción de Ácido cítrico	2500 – 4500	(Colleran et al., 1995)
Minería	20 – 800	(Brahmacharimayum et al., 2019)
Industria Química	180000 – 284 000	
Industria de Procesamiento de Alimentos Marinos	2100 – 2700	
Industria Textil	2690	

### 2.3 Industria Textil en Ecuador

Dentro del sector manufacturero, la industria textil en Ecuador representa apenas el 0.05% de la totalidad de empresas presentes en el país. Como se describió previamente, esta industria en específico posee un alto impacto, debido a que un mal control de los efluentes libera sustancias químicas peligrosas y gases tóxicos.

Los compuestos a base de sulfatos forman parte de los agentes químicos más utilizados para procesos de lavado, tinturado y fijación de material. Los insumos básicos que

por lo general son utilizados dentro de la industria textil para generar sus fibras textiles se pueden resumir en la Figura 2. Los sulfatos se encuentran en forma de ácido sulfúrico o sales de sulfatos como sulfato de sodio, sulfato de cobre o sulfato de hierro. Esto debido a que son compuestos más económicos y son componentes que tienen por función auxiliar u optimizar las condiciones de procesamiento de las materias primas (Samanta et al., 2019)

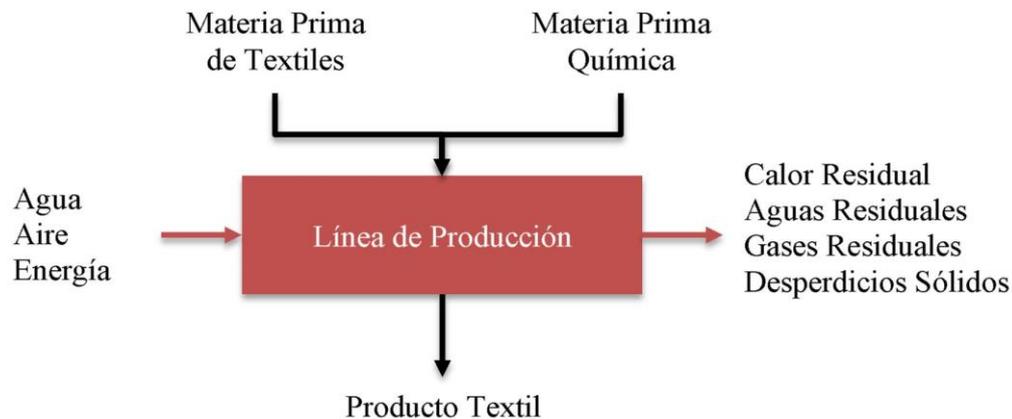


Figura 2. Esquema básico de insumos básicos empleados en la producción de textiles (Sedlak, 2013)

Las materias primas de esta industria son de 2 tipos: textil (recursos que provienen de fuentes naturales o elaborados artificialmente que conforman principalmente las fibras textiles) y químicos (agentes que generan transformaciones físico-químicas a la materia prima con el uso de agua, aire y energía para generar un producto final). El procesamiento de fibras para generar productos no tejidos como sombreros de fieltro se puede resumir en los siguientes pasos: preparado de tejido, cardado, afieltrado y terminado de textil. En la Figura 3 se detalla la cadena de producción general con las respectivas operaciones más simples que se da lugar en cada uno de los pasos de producción. Cabe recalcar que los procesos varían dependiendo de las materias primas que se utilizan, el producto que se busca generar, así como la inversión y tamaño de la industria.

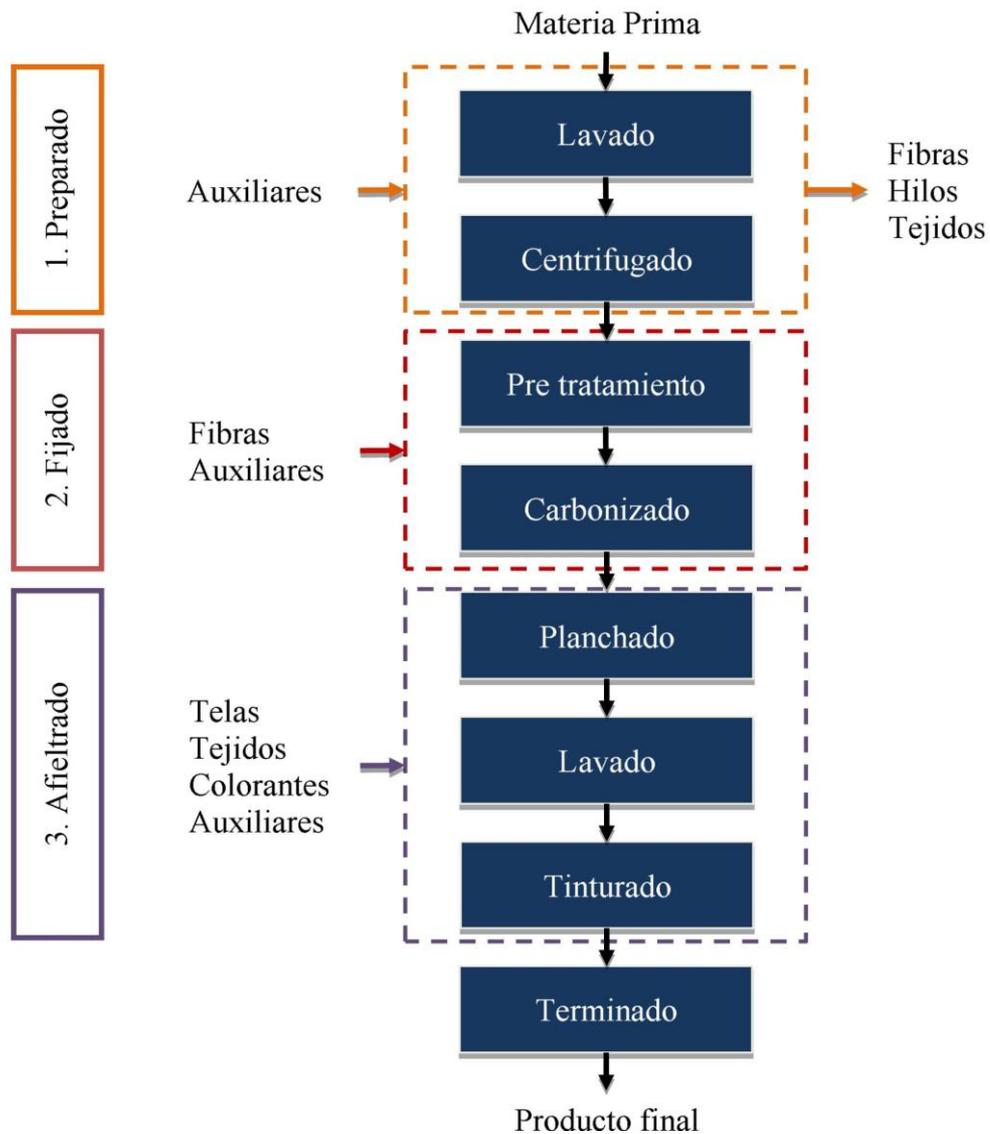


Figura 3. Cadena de producción de una fibra de la industria textil (Sedlak, 2013).

La sección de preparado corresponde al tratamiento de la materia prima cruda (lana o algodón por ejemplo) donde se remueven impurezas naturales (grasas) y adicionales (polvo, tallos, hojas). Para ello, se efectúan procesos de lavados con agentes desengrasante y de lavado. Además, dependiendo de la calidad y el tipo de la materia prima, esta puede presentar cierta coloración y para eliminarlos se utiliza agentes reductores con oxidantes, como por ejemplo: ácido sulfúrico, ácido sulfuroso o hidro-sulfitos. La adición de agentes blanqueadores es común cuando se desea producir fibras de color blanco o de tonos pasteles.

Tras el lavado, se utiliza el centrifugado u otras alternativas mecánicas para remover considerablemente el contenido de humedad en el material (Sedlak, 2013).

Luego la fibra entra a un proceso de fijado que tiene por objetivo brindar estabilidad dimensión al material tras el lavado. Para ello, se utiliza vapor u otras fuentes de calor tras la adición de componentes auxiliares que brindarán suavidad o previenen la formación de pliegues y arrugas en el tejido (Riva, 1993).

Los componentes auxiliares de la cadena de producción corresponden a distintos agentes que son utilizados para proporcionar propiedades específicas a la materia prima y así obtener el producto deseado. Estos pueden ser: agentes antiestáticos, impermeables, poliméricos, entre otros (Riva, 1993). Tras fijar el material se procede a carbonizar el material, donde se eliminan químicamente las impurezas que acompañan la materia prima. Para ello se impregnan ácidos fuertes o sales provenientes de dichos ácidos y se somete a temperaturas de 105 – 115°C con el fin de deshidratar las impurezas vegetales (principalmente tallos, hojas, flores y raíces).

El agente deshidratante más común es el ácido sulfúrico debido a su fuerte actividad química. La dosificación de ácido varía dependiendo de la cantidad de impurezas presentes y la cantidad de agentes alcalinos utilizados en el lavado. Sin embargo, los baños con este ácido se hallan en un intervalo de 4 a 5° Baumé, dado que en este rango no hay variación significativa sobre la resistencia que presenta la fibra (Riva, 1993)(Sedlak, 2013). Tras ello, se procede a hilar el material y se obtiene una fibra sencilla.

Luego se procede con el afieltrado del tejido, donde se da lugar a una reducción en las dimensiones de la superficie del tejido generando un aumento en el espesor y la densidad de material. Para ello, se utilizan operaciones netamente físicas como encogimiento del material a través del calor por medio de planchado o lavados a temperaturas de 40 – 50°C en soluciones alcalinas.

Al obtener un material denso, con características similares al de una tela, se procede con la tintura del material para ello, se somete el material a baños con colorantes para fibras. Estos colorantes pueden ser ácidos, de complejo metálico y colorantes reactivos. Los colorantes ácidos se caracterizan por brindar colores brillantes a la fibra, mantener una gran capacidad de tintura y homogeneidad del tono requerido sin embargo, requieren de valores de pH bajos por lo cual, se añade soluciones de ácido sulfúrico en su preparación. De la misma manera se procede con los colorantes de complejo metálico sin embargo, estos tintes presentan un color más sólido y cobertura de neps (fibras enredadas). Por último, los colorantes reactivos son útiles para brindar colores brillantes de gran solidez ante la luz pero con un costo relativamente más elevado que los mencionados anteriormente (Riva, 1993; Sedlak, 2013).

La última etapa de un proceso textil corresponde al acabado o terminado del material donde varía dependiendo del producto final de interés, algunos ejemplos de estos procesos son: adición de aditivos para generar material impermeable, impregnación de formas en tejidos (alas de sombreros), brindar brillo al material, entre otros.

## 2.5 Sulfatos en la Industria Textil

Una fuente de descarga de sulfatos en aguas residuales es a través del procesamiento de lana. En el proceso de lavado se utilizan soluciones alcalinas con baños de ácido sulfúrico en concentraciones del 0.025% (es decir, aproximadamente 25 kg de ácido sulfúrico por metro cúbico de agua). En el procesos de fijado, como agentes deshidratantes se emplean principalmente ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o sulfato ácido de sodio (Riva, 1993).

Además, otras fuentes comunes de sulfatos en la industria textil pueden ser por: agentes antiestáticos (de índole catiónica como metasulfato), emulsores, agentes de

desencolado (como persulfato), agentes para macerización (como alquilsulfatos), aceites abrasivos (como aceites sulfatados o acrilamidas sulfatadas), en formulaciones de colorantes o en auxiliares de tintura (como tiosulfatos, sulfato de sodio, entre otros) (Sedlak, 2013) (CAR, 2002)(Namgoung, 2011).

## 2.6 Tratamiento de Aguas Residuales

Al comprender el impacto que generan las aguas residuales en el medio ambiente, es importante diseñar herramientas o procesos que disipen la carga de estos agentes en cuerpos de agua. Por ello se define que un proceso de tratamiento de aguas residuales tiene como fin la eliminación o reducción de cualquier agente químico o biológico que genere un impacto ambiental o generar un riesgo para la salud (Rojas, 2004). El diseño de una planta de tratamiento de aguas se realiza en función de los contaminantes que se desean eliminar, en la Tabla 4 se resumen los procesos, operaciones unitarias o sistemas de tratamiento más comunes para la remoción de los agentes contaminantes más comunes.

*Tabla 4. Resumen de operaciones unitarias, procesos o sistemas de tratamientos para eliminar los contaminantes presentes en el agua (METCALF & EDDY INC, 1995).*

<b>Contaminante</b>	<b>Operación unitaria, proceso o sistema de tratamiento</b>	
Sólidos en suspensión	Desbaste y dilaceración Sedimentación Flotación	Desarenado Filtración Coagulación y Sedimentación
Materia orgánica biodegradable	Filtros percoladores o biofísicos Adsorción en carbón	Filtración en arena Sistema fisicoquímico
Compuestos volátiles	Arrastre por aire	Adsorción en carbón
Patógenos	Cloración Hipo cloración Sistemas Naturales	Cloruro de bromo Ozonación Radiación UV
Nutrientes: nitrógeno	Sistemas de nitrificación y desnitrificación Sistemas naturales	Arrastre con amoníaco Intercambio iónico Cloración al breakpoint
Fósforo	Eliminación biológica Adición de sales metálicas	Coagulación y sedimentación con cal
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón	Ozonación
Metales pesados	Precipitación química Intercambio iónico	Sistemas de tratamiento por evacuación
Sólidos orgánicos disueltos	Intercambio iónico Osmosis inversa	Electrodialisis

## 2.7 Métodos para la Remoción de Sulfatos

En resumen, los sulfatos son sólidos inorgánicos disueltos que poseen un impacto considerable en cuerpos de agua. Por ello es importante diseñar sistemas de tratamiento de aguas que disminuyan considerablemente la carga de este contaminante. La descarga de sulfatos debe ser inferior a 400 mg/l y 1000 mg/L para vertidos al alcantarillado y a cuerpos de agua dulce para ello, algunos de los métodos más usuales para su remoción se detallan en Figura 4.

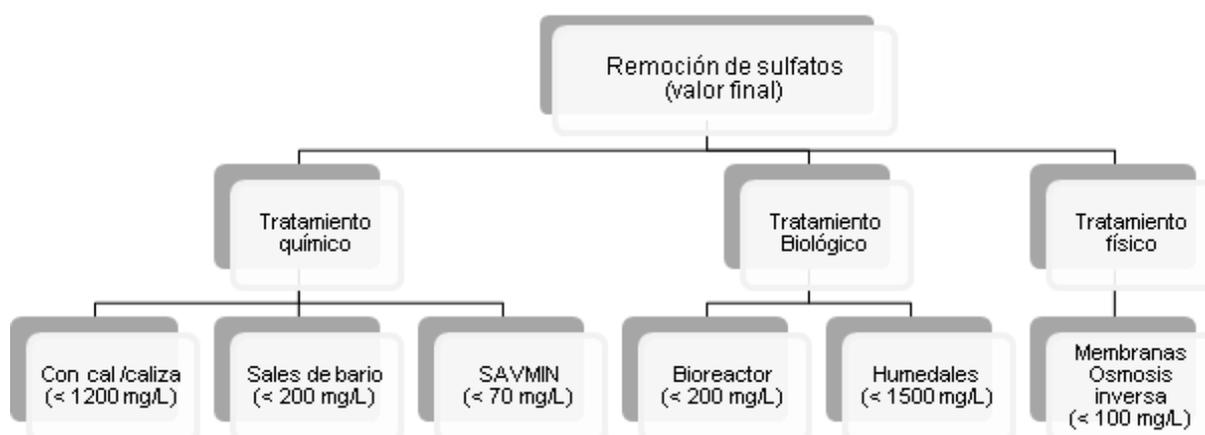


Figura 4. Tecnologías para el tratamiento de sulfatos (Arnold et al., 2016).

La selección del método de tratamiento depende de la carga contaminante inicial y de las características de la descarga deseada, por lo general para la industria textil se utilizan los tratamientos químicos debido a que no hay generación de salmuera tras el tratamiento. El mantenimiento, el costo capital y operacional es relativamente bajo en comparación a los otros tipos de tratamiento. En la Tabla 5 se detalla un resumen de las principales ventajas y desventajas de distintos métodos utilizados para la remoción de sulfatos.

*Tabla 5. Resumen de ventajas y desventajas de los distintos tipos de tratamiento elegido para la remoción efectiva de sulfatos.*

<b>Tratamiento/proceso</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Referencia</b>
Precipitación con cal/caliza	Remoción de metales trazas. Costo capital y operacional barato. Sin pretratamiento.	Requiere de un monitoreo constante. Remoción de sulfatos limitada. Producción de lodos.	(Lorax Environmental, 2003; Nariyan et al., 2018)
Coagulación y floculación	Corto periodo de operación Elimina partículas en suspensión Efectividad Alta Elimina gran cantidad de sustancias Relativamente barato	Costo de estudio alto Un proceso incorrecto fomenta la degradación rápida del agua Afecta el valor final de pH	(Zand & Hoveidi, 2015)
SAVMIN (precipitación con hidróxidos)	Sin pretratamiento. Remoción de sulfato alto. Reciclaje de ettringita.	Requiere monitoreo constante. Producción de lodos.	(Lorax Environmental, 2003)
Precipitación con sales de bario	Remoción alta de sulfatos. Posibilidad de reciclar la sal de bario. Mantenimiento bajo y no requiere pretratamiento.	Remoción de trazas baja. Alta producción de lodos. Monitoreo alto. Costo relativamente alto si no hay reciclaje de la sal.	(Nariyan et al., 2018)
Reducción biológica	Remoción de trazas. Reciclaje de CO <sub>2</sub> . Alta remoción	Requiere pretratamientos. Requiere monitoreos continuos. Emisión de H <sub>2</sub> S. Alto costo energético. Tiempo para remoción alto (días).	(Lorax Environmental, 2003)
Osmosis inversa	Alta remoción de sulfatos (80-99%). Genera agua de alta calidad para su ingestión.	La membrana posee un tiempo de vida bajo. No es escalable para grandes volúmenes. Membranas son costosas. Mantenimiento constante y producción de salmuera	(Silva et al., 2010)
Intercambio iónico	Alta eficiencia en remoción. Sulfatos < 250 mg/L. Costos más bajos que osmosis inversa.	Requiere regeneración frecuente del lecho.	(Nariyan et al., 2018)

## 2.8 Coagulación/floculación para la Remoción de Sulfatos

Los sulfatos se hallan como sólidos inorgánicos disueltos. Por ello, se requiere de una desestabilización del medio a través de un set de reacciones fisicoquímicas (Silva et al., 2010). Esto se da mediante la adición de un coagulante, que promueve la formación de flóculos insolubles, estos son aglomeraciones de la materia suspendida en el agua. Mientras tanto, la floculación consiste en la adición de un polímero con carga iónica que facilita la aglomeración de los flóculos generados durante la coagulación. La aglomeración de estas partículas resulta en el incremento de la masa del coloide y promueve la velocidad de sedimentación (Gilpavas et al., 2018; Management Association, 2020; Nariyan et al., 2018).

Dentro de la industria, es frecuente el uso de sales de aluminio que poseen alúmina como agente coagulante, la cual opera en un rango óptimo de pH de 5-8. Al añadir esta sal en aguas residuales, se forma un floculante de hidróxido de aluminio que es insoluble en un amplio rango de pH. Estos flóculos sedimentan y se forma un lodo que se separa del agua tratada (Environmental Protection Agency, 2002).

Las sales de aluminio siguen la fórmula  $(Al_n(OH)_mCl_{3n-m})_x$ . Presentan una estructura polimérica que es totalmente soluble en el agua. Los coagulantes altamente polimerizados usados comúnmente son: policloruro de aluminio (PACl,  $n=2$  y  $m=3$ ), cloruro de aluminio hidratado (ACH,  $n=2$  y  $m=5$ ) y policloruro de aluminio hidratado (PACH, similar en composición a ACH)(Gebbie, 2001; Zouboulis et al., 2008).

De ellos, el policloruro de aluminio (PAC) es una de las sales más utilizadas para tratamiento de aguas residuales debido a que presentan menor residuo de aluminio en el agua tratada, la temperatura de operación requerida para la floculación funciona correctamente a temperaturas normales y bajas, el lodo que se genera es menor en comparación al uso directo de alúmina, almacenamiento estable por 4-6 meses a temperaturas menores de 50°C. El costo

de esta sal es inferior a las otras sales a base de aluminio y además presenta una mayor eficiencia en la remoción de sulfatos. Por último, la dosificación requerida de esta sal es mucho menor en comparación a la dosificación directa de alúmina (Gebbie, 2001; Silva et al., 2010).

## 2.9 Adsorción de Sulfatos en Carbón Activado

La adsorción con un material poroso con el fin de remover los agentes contaminantes disueltos en aguas residuales por medio de filtros es una de las operaciones en el tratamiento de aguas más presentes en esta industria. A escala industrial, se utilizan tres tipos de adsorbentes, que son: carbón activado, zeolitas y polímeros (Sorrels, 2018). La adsorción en la superficie de materiales porosos ocurre cuando la energía atractiva de una sustancia con la superficie del sólido es mayor a la energía cohesiva de la sustancia. Si la adsorción ocurre debido a las fuerzas de Van Der Waals entre el sólido y el adsorbato, se denomina adsorción física (fisisorción), mientras que si la interacción es debido a enlaces químicos, se denomina quimisorción (Chiou, 2003). En otras palabras, el uso de adsorbentes tiene la finalidad de atraer y mantener los contaminantes en la superficie de las partículas de carbono.

En el sector textil, el carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados con el fin de disminuir la carga orgánica, tintes y la turbidez de aguas residuales. Esto se debe a que el carbón activado es un material con una gran área superficial (áreas entre 800 a 1400 m<sup>2</sup>/g), que favorece los procesos de fisisorción. Además, es ligeramente más barato y presenta una alta remoción los contaminantes mencionados. Dada su alta capacidad de adsorción, se investigó sus efectos en la remoción de sulfatos.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Muestreo y caracterización de las aguas residuales de una industria textil.

Con el fin de comprender la carga contaminante presente en vertidos del sector textil, se caracterizó el efluente de las aguas residuales en una industria textil a través del análisis de: demanda química de oxígeno, sulfatos, sólidos disueltos, sólidos orgánicos y sólidos totales. Las muestras se tomaron en varios puntos del recorrido de las aguas residuales generadas en una industria textil dedicada a la producción de sombreros de ala a partir de lana de oveja en un proceso continuo. Por ello, se muestreo 3 veces por semana durante un mes. Las muestras se tomaron en un volumen de 250 mL de agua cruda, esto es antes de antes del ingreso a la planta de tratamiento de aguas residuales. Las muestras para análisis se conformaron por una muestra compuesta, la cual se conformó por muestras tomadas cada 2 horas por las 8 horas de operación de la industria. Las muestras compuestas se almacenan en un envase de polietileno de alta densidad a una temperatura de 4°C debido a su bajo valor de pH (1-2).

#### 3.3 Método colorimétrico para determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Se preparó una solución de digestión, secando 10.5 g de dicromato de potasio a 150°C por 2 horas. Se pesaron 10.216 g de dicromato con la balanza analítica Boeco BBL 31, se transfirió a un balón de aforo de 1L, se añadió 500 mL de agua destilada y lentamente se agregaron 167 mL de ácido sulfúrico al 96%. Se aforó a 1L y se almacenó a 4°C en un frasco ámbar.

Para la preparación de la muestra, se diluye la muestra a valores de 0 a 1000 mg/L de DQO, se agitó y se dejó reposar hasta que la mayoría de los sólidos sedimenten, la muestra

para análisis se tomó de la zona media del balón de aforo y se evitó tomar los sólidos en suspensión. Para la digestión, se transfirieron 3.5 mL de ácido sulfúrico al vial, 1.5 mL de la solución de digestión y 2.5 mL de muestra. Se sella el vial y se agita hasta obtener una solución homogénea. El blanco se prepara reemplazando la muestra por agua destilada y repitiendo el proceso mencionado. La muestra se colocó en un digestor (Hach DRB 200) precalentado a 150°C, se insertó los viales en el digestor por 2 horas. Los viales se extrajeron cuando el digestor se enfría hasta una temperatura de 120°C y se colocaron en un soporte para tubos de ensayo, se almacenaron en una zona oscura hasta que los viales alcanzaran la temperatura ambiente. Por último, se midió los valores de DQO con un colorímetro portable (Hach DRB 890) en una longitud de onda de 610 nm (Baird & Bridgewater, 2017).

#### 3.4 Determinación de sólidos totales (TS)

Para la determinación de TS, se calcinaron crisoles de porcelana por 5 minutos a 550°C en una mufla (Thermolyne F6018) con el fin de prevenir variaciones en el peso de los crisoles. Se colocaron los crisoles en un desecador y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente. Se pesaron los crisoles con una balanza analítica (Boeco BBL 31) y se registró este valor como masa inicial de crisol.

Se transfirió con una pipeta graduada un volumen de 30 mL de muestra de agua residual fresca. Y se colocó el crisol en una estufa (Fanem 315 SE) precalentado a 105°C. Tras un secado por 24 horas, se colocó el crisol en un desecador hasta que se enfrió a temperatura ambiente. Se pesó el crisol en una balanza (Boeco BBL 31) y se registró el valor como masa final de crisol con residuo seco (Baird & Bridgewater, 2017). El cálculo de los sólidos totales en la muestra se determinó según la Ecuación 1:

$$ST = \frac{m_f - m_o}{V_m} \left( \frac{g TS}{L} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

- $m_f$ : Masa final de crisol con residuo seco en gramos (g).  
 $m_o$ : Masa inicial de crisol en gramos (g).  
 $V_m$ : Volumen de la muestra en litros (L).

### 3.5 Determinación de sólidos orgánicos totales (oTS)

Se colocó el crisol con la muestra seca en una mufla (Thermolyne F6018) a 550°C por 8 horas. Se dejó enfriar el crisol en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Se pesaron las muestras en una balanza analítica (Boeco BBL 31) y se registró como masa de crisol calcinado (Baird & Bridgewater, 2017). Se calculó el valor de oTS según la Ecuación 2.

$$oTS = \frac{m_1 - m_2}{V_m} \left( \frac{g \text{ oTS}}{L} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

- $m_1$ : Masa final de crisol con residuo seco en gramos (g).  
 $m_2$ : Masa de crisol calcinado en gramos (g).  
 $v_m$ : Volumen de la muestra en litros (L).

### 3.6 Determinación de sólidos suspendidos totales (SST).

Se secó papel filtro analítico en una estufa (Fanem 315 SE) a 105°C por 30 minutos, se colocó en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se pesó en una balanza (Boeco BBL 31) y se registró este valor como masa inicial de papel filtro. Tras esto, se agitó intensamente la muestra, se colocó el papel filtro en un embudo y se filtró de 30 a 50 mL de muestra de agua residual en un Erlenmeyer de 125 mL. Se colocó el papel filtro en una estufa (Fanem 315 SE) por 24 horas a 105°C, se dejó enfriar hasta temperatura ambiente en un desecador y se pesó el papel con una balanza (Boeco BBL 31) y se registró el valor como masa final de papel filtro (Baird & Bridgewater, 2017). Se determinó el valor de oTS por medio de la Ecuación 3.

$$SST = \frac{m_f - m_o}{V_m} \left( \frac{g \text{ SST}}{L} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

- $m_f$ : Masa final de papel filtro en gramos (g).  
 $m_o$ : Masa inicial de papel filtro en gramos (g).  
 $V_m$ : Volumen de la muestra en litros (L)

### 3.7 Determinación turbidimétrica de sulfato

Se diluyó la muestra hasta obtener una muestra de agua residual con valores de sulfatos en un rango de 0 a 100 mg/L. Se transfirió 10 mL de la muestra diluida a una celda de vidrio para su medición con el equipo LaMotte DC1600 a 420 nm y se ajustó el valor de la transmitancia a 100%. Se retiró la celda y se añadió 0.1 g de “Sulfate Reagent V-6277”, se agitó hasta obtener una solución homogénea, se dejó reposar por 5 minutos. Se agitó por 15 segundos y se midió el valor de transmitancia. Se determinó la concentración de sulfatos según la curva de calibración para valores de transmitancia provista por el equipo (Baird & Bridgewater, 2017).

### 3.8 Diseño de experimentos para remoción de sulfatos

Tras caracterizar las aguas residuales, se utilizaron dos métodos para evaluar la remoción de sulfatos: Coagulación/floculación y adsorción en carbón activado. Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado. Para encontrar, el método de tratamiento y las condiciones óptimas, se utilizó agua sintética, mediante la dilución de sulfato de sodio hasta una concentración de 1800 mg/L en  $\text{SO}_4^{2-}$ , este valor es el promedio de sulfatos encontrado en los análisis de aguas residuales de la industria textil. El carbón activado, policloruro de aluminio y poliacrilamida catiónica fueron proporcionadas por la empresa AVALCHEM S.C.

### 3.9 Remoción de sulfatos por coagulación/floculación

Se evaluó el uso de policloruro de aluminio (PAC) como agente coagulante y poliacrilamida catiónica como floculante. Para ello, se evaluó la variación en la dosificación con una proporción en masa de Coagulante: Sulfatos (PAC:SO<sub>4</sub>) de 7:1, 10:1, 12:1, 15:1, 60:1, 70:1 y 80:1 con 30 mg/L de poliacrilamida catiónica. Adicionalmente, se evaluaron los efectos del pH en la remoción de sulfato. Para esto, se utilizó hidróxido de sodio y ácido clorhídrico para controlar el valor inicial de pH a 4, 6 y 9.

Para la preparación del floculante, se diluye la poliacrilamida a una concentración de 1000 mg/L. Para los experimentos, se tomaron alícuotas de 100 mL de agua sintética y se añade el policloruro de aluminio a razón en masa de 7:1 (PAC: SO<sub>4</sub>), se agita a 200 rpm en una plancha Velp - AREC X por 30 segundos. Se añade 3 mL de floculante y se deja sedimentar por 10 minutos. Se filtra con papel filtro y se diluye el agua tratada con un factor 1:50 o 1:40. Se toman 10 mL de la muestra tratada diluida para la medición de sulfatos. Se repiten los experimentos para las proporciones restantes de PAC:SO<sub>4</sub> 7:1, 10:1, 12:1, 15:1, 60:1, 70:1 y 80:1. Para la variación de floculante se escoge una proporción de 10:1 de PAC:SO<sub>4</sub> y se varia la dosificación de floculante en un rango de 1, 2,3, 4 y 5 mL con concentraciones de 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L, respectivamente.

### 3.10 Remoción de sulfatos con carbón activado en un sistema batch

Para el tratamiento con carbón activado, se pesaron 2 g de carbón activado 6x12 en un Erlenmeyer de 125 mL con una balanza (Boeco BBL 31). Se agregaron 100 mL de la muestra de agua sintética (previamente neutralizada a un pH de 7) y se agitó a 350 rpm en una plancha Velp – AREC X. Se tomaron alícuotas para la medición de sulfatos en los siguientes intervalos de tiempo: 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. Se diluyeron las alícuotas y se

midieron los valores de sulfatos en las muestras por triplicado. Se repitió el proceso para 4, 6, 8 y 10 g de carbón activado.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de aguas residuales

El agua residual compuesta fue tomada en puntos previos al ingreso a la planta de tratamiento fue analizada de acuerdo con los métodos detallados en el capítulo 3. En la Tabla 6 se detallan los valores promedio obtenidos para los parámetro de análisis más importantes en la industria textil en aguas residuales para la semana correspondiente. De estos análisis, se observó un valor promedio de sulfatos en el agua residual del proceso (sin tratamiento) de 1800 mg/L. Por ello, se replicó esta concentración para el agua sintética utilizada para la investigación de los diferentes métodos de por medio de coagulación – floculación y adsorción.

*Tabla 6. Resultados de caracterización de las aguas residuales.*

Parámetro	Unidad	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Norma
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	502 ± 57.51	856 ± 80.98	586 ± 51.17	598 ± 53.40	350
Potencial de hidrógeno (pH)	-	2.30 ± 0.05	2.33 ± 0.03	2.16 ± 0.05	2.75 ± 0.03	6 – 9
Sólidos totales (TS)	mg/L	12480 ± 576.58	6523 ± 483.62	4200 ± 300.25	4250 ± 348.93	1600
Sólidos orgánicos totales (oTS)	mg/L	8653 ± 648.12	4093 ± 260.89	1830 ± 108.15	1970 ± 112.49	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	405 ± 9.19	157 ± 4.29	70 ± 1.67	37 ± 1.23	220
Sulfatos	mg/L	1916 ± 204.44	1763 ± 167.31	1536 ± 174.64	1887 ± 165.63	400

### 4.2 Coagulación Floculación

La investigación de la remoción de sulfatos por coagulación-floculación inicia con el ajuste del pH inicial en la solución a valores de 4, 6 y 9 previo a la adición del coagulante. Se mantiene constante el policloruro con una relación en masa 10:1 (PAC:SO<sub>4</sub>) según la

metodología descrita por (Silva et al., 2010) y se evaluó la remoción de sulfatos en función de la dosificación de floculante, los resultados se muestran en la Figura 5.

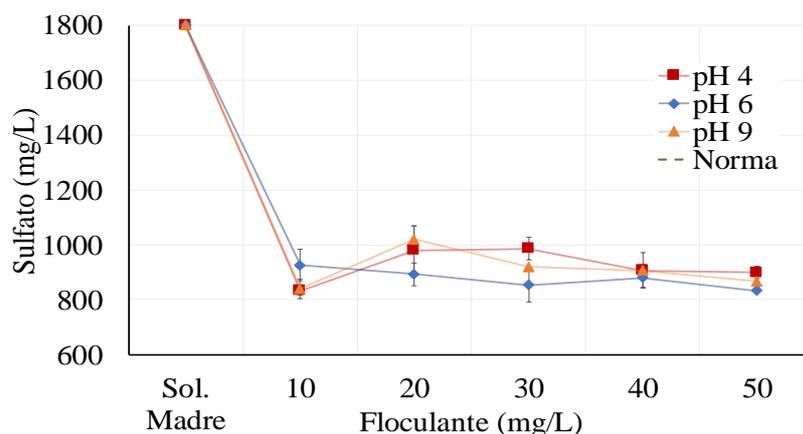


Figura 5. Resultados de variación de floculante con una proporción 10:1 PAC:SO<sub>4</sub>.

Se observó que con un valor de 10 mg/L de floculante, la concentración de sulfatos se reduce por debajo de los 1000 mg/L. A medida que se aumenta la concentración de floculante la disminución en la concentración de sulfatos se mantiene entre 1000 – 850 mg/L de (remoción del 45-55% del valor inicial de sulfatos) en distintos valores de pH. Tras el análisis de varianza de los resultados obtenidos para la variación de floculante y pH, se observó que no existe diferencia significativa en la disminución de sulfatos por variación de la concentración de floculante en distintos valores de pH.

Tras ello, se evaluó la variación en la concentración de policloruro de aluminio manteniendo 30 mg/L de floculante a tres valores de pH. En la Figura 6 se describe el valor final de sulfatos tras variar el coagulante y se observa que la remoción más baja se encuentra a una proporción 15:1 entre el PAC y el ión sulfato. El valor de sulfatos más bajo con un valor de 576.7 mg/L se encuentra a un pH de 6 y una relación en masa de PAC:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 15:1. Alcanzando una remoción del 68% del valor inicial de sulfatos.

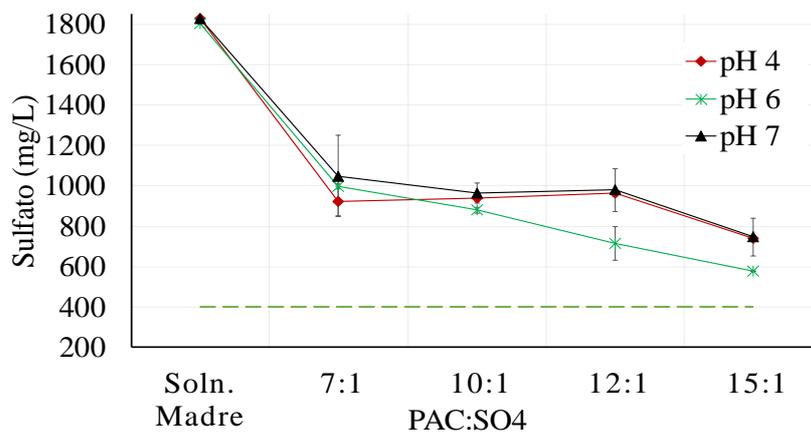


Figura 6. Remoción de sulfatos en función de la variación de policloruro de aluminio (PAC) a distintos pH.

El pH óptimo para la mejor remoción fue 6, que coincide con resultados presentados en otros estudios que registran valores de 4 - 6 en pH puesto que los procesos de coagulación son favorecidos en medios ligeramente neutros o alcalinos (Wang et al., 2002; Xu et al., 2004; Yu et al., 2018). Sin embargo, al analizar el valor de sulfatos obtenido en la Figura 6 con trabajos similares (Silva, 2010) se encontró que la remoción obtenida era baja y no cumplía con el límite permisible para descargas líquidas en la normativa ecuatoriana. La razón de esta deficiencia es por el policloruro utilizado en este estudio, el compuesto posee una composición del 12% en alúmina, la baja concentración de aluminio en este compuesto limita la cantidad de especies que pueden interactuar con el ión sulfato. Por ello, se consideró aumentar la remoción molar entre la alúmina (alum) y el ión sulfato. El valor de pH inicial se mantiene en 6 y se espera que el pH final tienda a un valor de 4.75 esto debido a la formación de complejos de aluminio solubles que tienden a disminuir el pH (Silva et al., 2010).

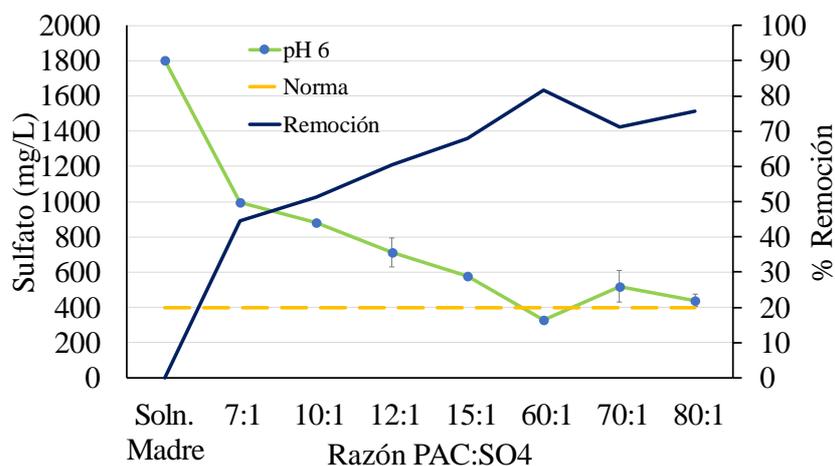


Figura 7. Disminución de sulfatos y porcentaje de remoción. Variando la proporción PAC:SO<sub>4</sub>

La Figura 7 describe la disminución de sulfatos a un pH inicial de 6 a partir de una solución madre de 1800 mg/L junto con el porcentaje de remoción para cada relación en masa. Como se observa, la concentración de PAC a una proporción 15:1 era insuficiente para lograr remover sulfatos. En la proporción de 15:1 se tenía una relación molar 2:1 de Alum/SO<sub>4</sub>. Por ello, se aumentó la proporción en masa a valores razones de 60:1, 70:1 y 80:1, considerando que estos valores mantienen una relación molar de Alum/SO<sub>4</sub> de 7.2, 8.5 y 9.6 respectivamente. Se consideró la relación molar entre la alúmina y el ión sulfato, dado que en trabajos similares que presentan valores finales de sulfatos inferiores a 300 mg/L tras el tratamiento, mantienen una relación molar 10:1 entre la fuente de aluminio (alum) y el ión sulfato (Silva et al., 2010; Xu et al., 2004; Yu et al., 2018). Sin embargo, en la Figura 7 se observó que la proporción óptima para remoción de sulfatos desde un valor inicial de 1800 mg/L a un valor final de 330 mg/l fue a una razón molar de 7.2:1 alum/SO<sub>4</sub>, correspondiente a una proporción en masa de 60:1 de PAC:SO<sub>4</sub> para un policloruro de aluminio con 12% en alúmina. La remoción alcanzada es de 81.65%.

El aumento en la concentración de aluminio en presencia de sulfatos favorece la formación de: especies monoméricas, poliméricas y coloidales. Las especies monoméricas

generan complejos solubles de aluminio con los iones sulfatos, lo cual no favorece la remoción de este agente contaminante de aguas residuales mientras que, la formación de especies poliméricas genera moléculas polinucleares de aluminio que son altamente estables y que aumentan la eficiencia de la coagulación debido a su rápida aglomeración (Silva et al., 2010). Por último, las especies coloidales son la fracción que tiende a formar sales de hidróxido que precipitan fácilmente debido a su alto grado de insolubilidad en el agua (Silva et al., 2010; Xu et al., 2004).

#### 4.3 Adsorción en carbón activado

A continuación se presentan los resultados de la investigación de adsorción de sulfatos por carbón activado. En la Figura 8 se detallan las curvas de remoción de sulfatos para distintas concentraciones en masa de carbón activado tras 2 horas de agitación en un sistema batch con una concentración inicial de 1800 mg/L de sulfatos. La remoción más alta se logró con una concentración de 10% en carbón activado que presentó un valor final de 1503 mg/L, alcanzando una remoción porcentual de 16.5%. Tras 90 minutos en el sistema, los valores finales de sulfatos se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo.

La baja remoción de sulfatos se encuentra limitada principalmente por la capacidad de adsorción del carbón activado. En experimentos similares se ha encontrado que para concentraciones bajas en sulfatos de 120 y 520 mg/L, la máxima remoción porcentual fue de 84.5% y 43%, respectivamente (Rahmati et al., 2019; Salman, 2009). Sin embargo, para altas concentraciones del contaminante, la eficiencia en la adsorción disminuye considerablemente debido a la saturación de los sitios activos del carbón activado (Rahmati et al., 2019).

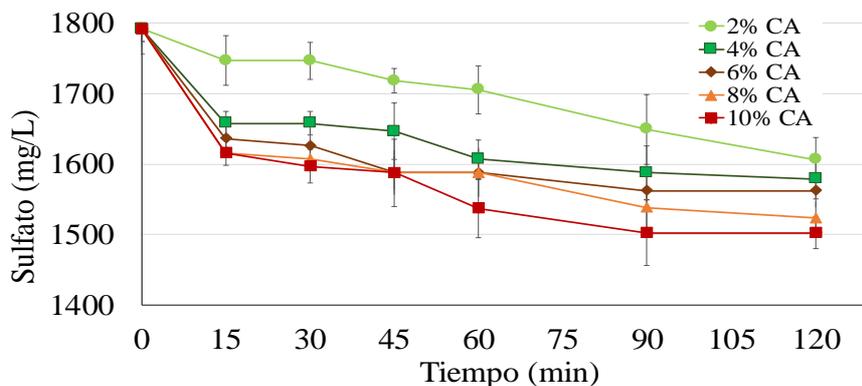


Figura 8. Remoción de sulfatos en función del tiempo para distintas concentraciones de carbón activado 6x12.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio se investigaron dos alternativas para remover iones de sulfato en aguas residuales de la industria textil que produce sombreros de ala a partir de lana de oveja. En una primera etapa se caracterizó el agua residual cruda, sin ningún tipo de tratamiento previo. De este análisis, se obtuvo que la concentración promedio de sulfatos de descarga es de 1800 mg/L. De acuerdo con la normativa ecuatoriana los límites permisibles para descargas líquidas al alcantarillado son de 400 mg/L.

Para la remoción de sulfatos se evaluaron dos métodos: coagulación-floculación y adsorción en un material poroso. Para la coagulación-floculación se utilizó policloruro de aluminio, con 12% en alúmina, como agente coagulante y poliacrilamida catiónica como agente floculante. Para los ensayos de adsorción se utilizó carbón americano 6x12.

Para la investigación de coagulación-floculación, se evaluó la influencia de la variación de floculante en la remoción de sulfatos a una dosificación fija de 10:1 de PAC:SO<sub>4</sub> y se observó que para dosis de 1 a 5 ppm de floculante no existe una diferencia significativa en la remoción de sulfatos tras el análisis de varianza en el valor final de remoción. Sin embargo, tras variar la dosificación de coagulante manteniendo fijo 30 mg/L

de floculante a distintos valores de pH, se observó la importancia de considerar una relación molar mayor a 7.2:1 entre la alúmina y el ión sulfato para una remoción efectiva del contaminante a valores inferiores a 400 mg/L, lo cual significa una remoción de sulfatos del 81.65%. La remoción con este método es efectiva a una relación en masa de 60:1, debido a que aumenta la disponibilidad del aluminio a interactuar con el ión sulfato y de esta manera formar especies que fomenten la separación del contaminante del agua residual.

Por último en la adsorción con carbón activado, se obtuvo una remoción máxima de sulfatos del 16.5%. Este valor final no cumple con los límites permisibles de descarga. La alta concentración inicial de sulfatos limitó la adsorción debido a la saturación de sitios activos. Por ello, a nivel industrial dadas las condiciones de los experimentos, este método no sería escalable debido al tiempo requerido de tratamiento, la baja eficiencia en remoción y la alta concentración de carbón requerido.

## 6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Arnold, M., Gericke, M., & Muhlbauer, R. (2016). Technologies for sulphate removal with valorisation options. *Imwa 2016*, 600, 1–4.  
[https://www.imwa.info/docs/imwa\\_2016/IMWA2016\\_Arnold\\_249.pdf](https://www.imwa.info/docs/imwa_2016/IMWA2016_Arnold_249.pdf)
- Baird, R., & Bridgewater, L. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Bashir, M. T., Ali, S., & Bashir, A. (2012). Health effects from exposure to sulphates and chlorides in drinking water. *Pakistan Journal of Medical and Health Sciences*, 10(3), 648–652.
- Bowell, R. ., Dill, S., Cowan, J., & Wood, A. (1998). A review of sulfate removal options for mine waters. *IMWA Preceedings 1998*, 329–342.  
[https://www.imwa.info/docs/imwa\\_1998/IMWA1998\\_Dill\\_329.pdf](https://www.imwa.info/docs/imwa_1998/IMWA1998_Dill_329.pdf)
- Brahmacharimayum, B., Mohanty, M. P., & Ghosh, P. K. (2019). Theoretical and Practical Aspects of Biological Sulfate Reduction: A Review. *Global NEST Journal*, 21(2), 222–244. <https://doi.org/10.30955/gnj.002577>
- CAR. (2002). *Prevención de la contaminación en la Industria textil en los países del Mediterráneo*.
- CEPAL, & ONU. (2018). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas.
- ChangingMarkets. (2017). Dirty fashion. *How Pollution in the Global Textiles Supply Chain Is Making Viscose Toxic*. [http://changingmarkets.org/wp-content/uploads/2017/06/CHANGING\\_MARKETS\\_DIRTY\\_FASHION\\_REPORT\\_SPREAD\\_WEB.pdf](http://changingmarkets.org/wp-content/uploads/2017/06/CHANGING_MARKETS_DIRTY_FASHION_REPORT_SPREAD_WEB.pdf)
- Chiou, C. T. (2003). Fundamentals of the Adsorption Theory. In *Partition and Adsorption of Organic Contaminants in Environmental Systems* (John Wiley, pp. 39–52).  
<https://doi.org/10.1002/0471264326.ch4>
- Colleran, E., Finnegan, S., & Lens, P. (1995). Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 29–46.  
<https://doi.org/10.1007/BF00872194>
- Environmental Protection Agency. (2002). *Water Treatment Manuals: Coagulation, flocculation & Clarification*.  
[http://www.epa.ie/pubs/advice/drinkingwater/EPA\\_water\\_treatment\\_mgt\\_coag\\_flocc\\_clar2.pdf](http://www.epa.ie/pubs/advice/drinkingwater/EPA_water_treatment_mgt_coag_flocc_clar2.pdf)
- Galiana-Aleixandre, M. V., Mendoza-Roca, J. A., & Bes-Piá, A. (2011). Reducing sulfates concentration in the tannery effluent by applying pollution prevention techniques and nanofiltration. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 91–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.006>

- Gebbie, P. (2001). Using Polyaluminium Coagulants in Water Treatment. *64th Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference*, 5(39), 39–47.
- Gilpavas, E., Arbeláez-Castaño, P. E., Medina-Arroyave, J. D., & Gómez-Atehortua, C. M. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(1), 157–161.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- Giti, K. (2015). Optimization of electrochemical process for removing Sulphate from drinking water by Taguchi mode. *International Journal of Current Research*, 7(6), 17409–17414.
- INEC. (2018). *Directorio de Empresas y Establecimientos - Boletín técnico N° 01-2019-DIEE*. [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Inflacion/2018/Enero-2018/01\\_ipc\\_Presentacion\\_IPC\\_enero2018.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Inflacion/2018/Enero-2018/01_ipc_Presentacion_IPC_enero2018.pdf)
- Kaul, S. N., Tapas, N., Szpyrkowicz, L., Gautam, A., & Khanna, D. R. (2005). *Wastewater Management (With Special Reference to Tanneries)*. Discovery Publishing House.
- Lide, D. R. (2009). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (90th ed.).
- Lorax Environmental. (2003). *Treatment of Sulphate in Mine Effluents* (Issue October). [http://www.inap.com.au/public\\_downloads/Research\\_Projects/Treatment\\_of\\_Sulphate\\_in\\_Mine\\_Effluents\\_-\\_Lorax\\_Report.pdf](http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Treatment_of_Sulphate_in_Mine_Effluents_-_Lorax_Report.pdf)
- Management Association, I. (2020). *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1210-4>
- Meays, C., & Nordin, R. (2013). Ambient Water Quality Guidelines for Sulphate. In *Water Protection & Sustainability Branch Environmental Sustainability and Strategic Policy Division BC Ministry of Environment*. [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/sulphate/bc\\_moe\\_wqg\\_sulphate.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/sulphate/bc_moe_wqg_sulphate.pdf)
- METCALF & EDDY INC. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales* (A. García Brage (ed.); 3rd ed.). McGraw - Hill.
- MN Department of Health. (2019). Sulfate In Well Water. In *Department of Health*. <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/wells/waterquality/sulfate.html>
- Namgoung, S. (2011). *Estudio y optimización del método tradicional de blanqueo comparando la efectividad con diferentes tratamientos de blanqueo de algodón* [Universidad Politecnica de Valencia]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15497/TFM\\_blanqueo\\_2011\\_Seol\\_Namgoung\\_ok.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15497/TFM_blanqueo_2011_Seol_Namgoung_ok.pdf?sequence=1)

- Nariyan, E., Wolkersdorfer, C., & Sillanpää, M. (2018). Sulfate removal from acid mine water from the deepest active European mine by precipitation and various electrocoagulation configurations. *Journal of Environmental Management*, 227, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.095>
- ONU. (2016). *Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento*. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>
- Rahmati, M., Yeganeh, G., & Esmaeili, H. (2019). Sulfate ion removal from water using activated carbon powder prepared by *Ziziphus spina-christi* lotus leaf. *Acta Chimica Slovenica*, 66(4), 888–898. <https://doi.org/10.17344/acsi.2019.5093>
- Ramalho, R. S. (2003). *Introduction to Wasterwater Treatment Processes*. Reverté.
- Riva, J. (1993). Tratamientos de la lana en medio acuoso: problemas generales y parámetros a controlar. *Boletín INTERTER 1993 N° 103*.
- Rojas, J. A. R. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño* (C. S. Perdomo (ed.); 3ra Ed.).
- Salman, M. S. (2009). Removal of Sulfate from Waste Water by Activated Carbon. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 5(3), 72–76.
- Samanta, K. K., Pandit, P., Samanta, P., & Basak, S. (2019). Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation. In *Water in Textiles and Fashion*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102633-5.00003-8>
- Sedlak, D. (2013). Manual de química moderna. In *Documento/Manual de Química*. <https://www.afirm-group.com/wp-content/uploads/2013/07/Apendice-F-Manual-de-Guia-Quimica.pdf>
- SENAGUA. (2017). Boletín de la estadística sectorial del agua. In *Agencia de Regulación del Agua*. [https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/2018/02/Boletin-Estadistico-ARCA-SENAGUA\\_08feb.compressed-2.pdf](https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/2018/02/Boletin-Estadistico-ARCA-SENAGUA_08feb.compressed-2.pdf)
- Silva, R., Cadorin, L., & Rubio, J. (2010). Sulphate ions removal from an aqueous solution: I. Co-precipitation with hydrolysed aluminum-bearing salts. *Minerals Engineering*, 23(15), 1220–1226. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.08.016>
- Sorrels, J. L. (2018). *Carbon adsorbers*. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-10/documents/final\\_carbonadsorberschapter\\_7thedition.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-10/documents/final_carbonadsorberschapter_7thedition.pdf)
- TULSMA. (2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA. In *Decreto Ejecutivo 3516*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Wang, D., Tang, H., & Gregory, J. (2002). Relative importance of charge neutralization and precipitation on coagulation of kaolin with PACI: Effect of sulfate ion. *Environmental Science and Technology*, 36(8), 1815–1820. <https://doi.org/10.1021/es001936a>

- Xu, Y., Wang, D., & Tang, H.-X. (2004). Interaction of PACls with sulfate. *Journal of Environmental Sciences*, *16*(3), 420–422.
- Yu, J., Lu, J., & Kang, Y. (2018). Removal of sulfate from wet FGD wastewater by coprecipitation with calcium hydroxide and sodium aluminate. *Water Science and Technology*, *77*(5), 1336–1345. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.019>
- Zand, A. D., & Hoveidi, H. (2015). Comparing aluminium sulfate and poly-aluminium chloride (PAC) performance in turbidity removal from synthetic water. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, *2*(3), 287–292.
- Zouboulis, A., Traskas, G., & Samaras, P. (2008). Comparison of efficiency between poly-aluminium chloride and aluminium sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. *Separation Science and Technology*, *43*(6), 1507–1519. <https://doi.org/10.1080/01496390801940903>

## 7. ANEXO A: FICHA TÉCNICA – PAC2-PV1

### POLIMERO CLARIFICADOR DE AGUA PAC2-PV1

#### DESCRIPCION:

Es un producto formulado a base de policloruro de aluminio con certificación en NSF y polielectrolitos catiónicos (poliamidas) con certificación en NSF, con propiedades coagulantes y floculantes, para la obtención de aguas clarificadas de buena calidad.

#### CARACTERISTICAS:

Apariencia: Líquido amarillo  
 PH: 1  
 Densidad: (g/ml) 1,25-1,30  
 Olor: característico.  
 Contenido de AL: 12-15% P/V

#### USO:

Se aplica en los procesos de clarificación de agua potable, residuales, proceso, etc.

#### DOSIS:

Está en función de las características del agua a tratarse, variando la dosis desde 8 ppm a 3000ppm. Para la dosis de operación en planta se recomienda realizar prueba de jarras.

#### PRESENTACION:

El producto se expende en envases plásticos de 250kg.

#### MANEJO:

Se recomienda el uso de guantes de caucho y gafas de seguridad.

En caso de contacto, lavar la parte afectada con abundante agua corriente.

#### ATENTAMENTE

ING. MANUEL BENALCAZAR  
 AVALCHEM SCC

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
 POTABLE, FILTROS ABLANDADORES \* ARENAS \* GRAVAS  
 \* ANTRACITA \* COQUE \* CARBON ACTIVADO  
 R.U.C. 1792431425001

