

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) EN UNA EMPRESA DEL  
SECTOR TEXTIL

ANGÉLICA JOHANNA RODRÍGUEZ REYES  
MARYURY KAROLINA SALINAS VILLAMIL

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2020

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) EN UNA EMPRESA DEL  
SECTOR TEXTIL.

ANGÉLICA JOHANNA RODRÍGUEZ REYES  
MARYURY KAROLINA SALINAS VILLAMIL

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

Director:  
FELIPE CORREA MAHECHA  
Ing. Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma Orientador  
Ing. Harvey Andrés Milquez Sanabria

---

Firma Jurado 1

---

Firma Jurado 2

Bogotá D.C. septiembre 2020.

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro  
Dr. MARIO POSADA GARCIA PEÑA

Consejero institucional  
Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones  
Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLES

Vicerrector Administrativo y Financiero  
Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General  
Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías  
Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química  
Ing. IVAN RAMÍREZ MARIN

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

## DEDICATORIA

*Dedico mi proyecto de grado a Dios, que es mi guía en cada paso de mi vida, permitiéndome culminar una etapa importante como lo es mi carrera. A mis padres, por su esfuerzo, apoyo incondicional, por formarme siempre con amor y dedicación, siendo mi mayor ejemplo de fortaleza y responsabilidad, y motivándome a enfrentar los retos de cada día. A mis abuelos y mi familia, con los que siempre puedo contar. A mis amigos, compañeros y profesores que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia enriquecedora, de crecimiento personal y académico. A mi Tuna, donde encontré un espacio de música, amistad y crecimiento que hicieron mis años de Universidad más felices. Finalmente, a mi compañera Angélica, la cual aprecio y quiero mucho, por la gran amistad que formamos hace muchos años, por ser mi mejor compañía durante la carrera y por el trabajo en equipo para culminar nuestro proyecto.*

*Maryury Karolina Salinas Villamil*

*A mis padres, quienes con gran esfuerzo me han dado la invaluable oportunidad de estudiar, no solo les debo la vida, sino todo lo que soy y seré, pues su trabajo y amor son mi ejemplo e impulso de vida. Para mi hermano que me llena de orgullo a diario, verlo crecer y convertirse en una persona íntegra, es todo un privilegio. A mi compañera de trabajo de grado que más que mi amiga desde los 12 años es parte de mi familia, la admiro y estimo de corazón. Para mis amigos y todas las personas increíbles que conocí en la Universidad, especialmente, las que me inspiraron con su forma ser y pensar. Finalmente, dedico este trabajo al dueño de nuestras vidas y proyectos, Dios.*

*Angélica Johanna Rodríguez Reyes*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Fundación Universidad de América, por ser ese espacio donde se adquirieron los conocimientos que hoy nos hacen profesionales, pero en especial por ser un lugar de crecimiento personal donde nacieron en nosotros sueños y metas.

A la empresa del sector textil que nos abrió las puertas, confió en nuestros conocimientos y nos permitió aplicarlos, a los ingenieros y operarios encargados de la PTAR que con su conocimiento y gestión contribuyeron para culminar el proyecto, especialmente al ingeniero Julián Andrés Gómez Restrepo, quien, con su mejor disposición, nos compartió su conocimiento, nos representó frente a la empresa y nos permitió encontrar oportunidades de mejora en esta.

A todo el cuerpo de profesores y directivas por dedicar su trabajo a la educación, dándonos las herramientas necesarias para iniciar nuestra vida profesional, en especial a nuestro director de trabajo de grado Felipe Correa, por su compromiso, colaboración, por incentivarnos a la excelencia, el cuestionamiento y el trabajo fuerte.

A nuestros amigos con los que compartimos proyectos, vivencias, retos, etapas que hicieron amena y especial nuestro paso por la universidad, haciendo de esta una experiencia enriquecedora.

## CONTENIDO

	pág
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
<b>1. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>23</b>
1.1 MARCO TEÓRICO	23
1.1.1 Aguas residuales	23
1.1.2 Contaminantes del agua	23
1.1.2.1 Agentes patógenos	23
1.1.2.2 Sustancias químicas orgánicas	23
1.1.2.3 Sustancias químicas inorgánicas	23
1.1.2.4 Desechos orgánicos	23
1.1.2.5 Nutrientes vegetales inorgánicos	24
1.1.2.6 Sedimentos o materias suspendidas	24
1.1.2.7 Sustancias radiactivas	24
1.1.2.8 Metales pesados	24
1.1.3 Tratamientos de aguas residuales	24
1.1.3.1 Pretratamiento	24
1.1.3.2 Tratamiento primario	24
1.1.3.3 Tratamiento secundario	25
1.1.3.4 Tratamiento terciario	25
1.1.4 Procesos de tratamiento de aguas residuales.	26
1.1.4.1 Coagulación-floculación	26
1.1.4.2 Proceso Fenton	26
1.1.4.3 Ozonización	27
1.1.4.4 Tecnología de membranas	27
1.1.4.5 Adsorción	27
1.1.4.6 Técnicas electroquímicas	28
1.1.4.7 Procesos biotecnológicos	28
1.1.5 Parámetros en aguas residuales.	28
1.1.5.1 Relación DQO/DBO	28
1.1.5.2 DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)	28
1.1.5.3 DQO (Demanda Química de Oxígeno)	29
1.1.5.4 Carbono orgánico total	29
1.1.5.5 Materias en suspensión.	29
1.1.5.6 Conductividad (salinidad)	29
1.1.5.7 Color	29
1.1.5.8 Materias inhibidoras	29
1.1.5.9 Contenido de nutrientes (nitrógeno [N] y fósforo [P])	29
1.1.5.10 Nitrógeno	30
1.1.5.11 Fósforo total	30
1.1.5.12 Tensioactivos	30

1.1.5.13 Contenido de gérmenes	30
1.2 MARCO LEGAL	31
1.2.1 Resolución 0631 de 2015	31
1.2.2 Decreto 1180 de 2003	32
1.2.3 Resolución 2086 de 2010	32
<b>2. GENERALIDADES</b>	<b>33</b>
2.1 LA EMPRESA	33
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN	34
2.2.1 Procesos en seco	36
2.2.1.1 Preparación de la fibra	36
2.2.1.2 Hilado	36
2.2.1.3 Tejido	36
2.2.1.4 Costura	36
2.2.2 Procesos húmedos	36
2.2.2.1 Encolado	36
2.2.2.2 Desencolado	36
2.2.2.3 Lavado	36
2.2.2.4 Blanqueamiento	36
2.2.2.5 Mercerizar	37
2.2.2.6 Teñido	37
2.2.3 Otros procesos	37
2.3 PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO	37
<b>3. DIAGNÓSTICO</b>	<b>40</b>
3.1 GENERALIDADES SOBRE LA PTAR	40
3.2 TIPOS DE TRATAMIENTOS REALIZADOS EN LA PTAR	40
3.2.1 Pretratamiento	40
3.2.2 Tratamiento primario	40
3.2.3 Tratamiento secundario	40
3.2.4 Tratamiento de lodos	40
3.3 FUENTES DE SUMINISTRO A LA PTAR	40
3.3.1 Lavado	40
3.3.2 Teñido	41
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE LA PTAR	41
3.4.1 Cárcamos y Tanque de subterráneo	41
3.4.2 Filtro box	41
3.4.3 Tanque pulmón	41
3.4.4 Torres de enfriamiento	41
3.4.5 Ecuador	41
3.4.6 DAF	42
3.4.7 Filtros.	43
3.4.3.1. Filtros de carbón activado	43
3.4.7.1 Filtros de arena	43

3.4.8	Espesador	43
3.4.9	Tornillo prensa	43
3.5	DESCRIPCIÓN OPERATIVA DE LA PTAR	43
3.6	ANÁLISIS DE DATOS Y PROCESO	46
3.6.1	Cartas de control	46
3.6.1.1	Análisis de las cartas de control	51
3.6.2	Correlación de datos	53
3.6.3	Eficiencia de procesos	54
3.6.4	Instrumentación y mantenimiento	56
3.6.4.1	DAF	56
3.6.4.2	Filtros	56
3.6.4.3	Torres de enfriamiento	57
3.6.4.4	Tornillo prensa	57
3.6.4.5	Laboratorio	57
3.6.5	Subdimensión de la planta	57
<b>4.</b>	<b>ALTERNATIVAS DE MEJORA</b>	<b>60</b>
4.1	PUNTOS DE MUESTREO	60
4.2	ALTERNATIVAS DE AGENTES COAGULANTES	60
4.2.1	Revisión bibliográfica	60
4.2.1.1	Coagulantes en la industria	61
4.2.1.2	Coagulante actual	63
4.2.2	Selección de coagulantes	63
4.2.2.1	Selección de criterios	64
4.2.2.2	Matriz de selección	64
4.3	TRATAMIENTO SECUNDARIO COMPLEMENTARIO	67
4.3.1	Revisión bibliográfica	67
4.3.2	Selección de tratamiento adicional	70
4.3.2.1	Métodos multicriterio aplicables a aguas residuales del sector textil	72
4.3.2.2	Fase preliminar	72
4.3.2.3	Encuesta a expertos	73
4.3.2.4	Árbol jerárquico	76
4.3.2.5	Selección de criterios, pesos y alternativas	78
4.3.2.6	Matriz de selección de alternativa	80
4.3.2.7	Resultados	81
4.4	SUBDIMENSIONAMIENTO	83
<b>5.</b>	<b>ESPECIFICACIONES DE MEJORA</b>	<b>86</b>
5.1	INSTRUMENTACIÓN	86
5.1.1	Variables controladas	86
5.1.1.1	Caudal	86
5.1.1.2	Temperatura	86
5.1.1.3	Nivel	86
5.1.1.4	Presión	86

5.1.1.5 Análisis químico	86
5.1.2 Diagrama de propuestas	87
5.2 MANTENIMIENTO	87
5.2.1 PTAR	87
5.2.1.1 DAF	88
5.2.1.2 Filtros	88
5.2.1.3 Prensa tornillo	90
5.2.1.4 Torres de enfriamiento	91
5.2.1.5 Tuberías y bombas	91
5.2.2 Laboratorio.	91
5.2.2.1 Métodos y procedimientos de análisis del laboratorio	91
<b>6. COSTOS</b>	<b>94</b>
6.1 COSTOS FIJOS	94
6.1.1 Valor de los equipos de laboratorio	94
6.1.2 Valor de los equipos de instrumentación	95
6.1.3 Valor de los equipos de planta	96
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>110</b>

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág</b>
Anexo A. Correlacion de sperman y pearson y xlstat	111
Anexo B. Diseño experimental de coagulantes	113
Anexo C. Encuestas de comparación por pares	121
Anexo D. Resultados encuesta de comparación por pares	125
Anexo E. Actividades de mantenimiento preventivo	129
Anexo F. Formatos registro de mantenimiento preventivo PTAR	133
Anexo G. Toma de muestras	140

## LISTA DE CUADROS

	<b>pág</b>
Cuadro 1. Tipos de tratamiento en aguas residuales	25
Cuadro 2. Productos químicos en la tintorería.	37
Cuadro 3. Productos para preparación de la tela	38
Cuadro 4. Auxiliares de teñido	39
Cuadro 5. Listado de equipos del diagrama de proceso de la PTAR	46
Cuadro 6. Coagulantes químicos de la industria textil	61
Cuadro 7. Características de coagulantes	62
Cuadro 8. Puntaje de evaluación	65
Cuadro 9. Factor de ponderación	65
Cuadro 10. Selección de coagulantes	65
Cuadro 11. Costo de coagulante alternativo	67
Cuadro 12. Ventajas-desventajas procesos	68
Cuadro 13. Escala de Saaty	74
Cuadro 14. Comparación por pares	74
Cuadro 15. Comparación por pares simplificada	75
Cuadro 16. Recopilación de resultados	78
Cuadro 17. Matriz de combinación binaria	79
Cuadro 18. Matriz de combinación binaria normalizada	79
Cuadro 19. Matriz de selección	81
Cuadro 20. Porcentajes de remoción de adsorbentes no convencionales en aguas textiles	82
Cuadro 21. Espacio de almacenamiento de la PTAR	83
Cuadro 22. Costo de tratamiento de lodos	90
Cuadro 23. Costo de los equipos de laboratorio	94
Cuadro 24. Costo de los equipos de instrumentación	95
Cuadro 25. Costo de los equipos de planta	96

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág</b>
Tabla 1. Resolución 0631 de 2015-vertimiento aguas textiles en alcantarillado	31
Tabla 2. Porcentajes en los cuartiles	52
Tabla 3. Datos fuera de norma.	52
Tabla 4. Correlación de parámetros Ssed-color-SST	54
Tabla 5. Correlación de parámetros DQO-G&A-cloruros	54
Tabla 6. Remoción total del proceso	55
Tabla 7. Porcentaje de remoción en DAF	55
Tabla 8. Porcentaje de remoción en filtros	55
Tabla 9. Porcentaje de datos para los rangos de caudal	58
Tabla 10. Porcentaje de incumplimiento de parámetros para los rangos de caudal	58
Tabla 11. Análisis del DAF, Porcentaje de remoción para los rangos de caudal	59
Tabla 12. Análisis de filtros, porcentaje de remoción para los rangos de caudal	59
Tabla 13. Porcentaje de remoción del proceso para rangos de caudal	59
Tabla 14. Remoción de diferentes procesos en aguas residuales textiles	70
Tabla 15. Determinación de	80
Tabla 16. Factor de ponderación	80

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
Figura 1. Equipo de tintura textil	34
Figura 2. Procesos textiles	35
Figura 3. Proceso tradicional de tintura por agotamiento con colorantes reactivos	39
Figura 4. DAF de planta circular	42
Figura 5. Diagrama de procesos de la PTAR	45
Figura 14. Árbol de proceso	71
Figura 15. Árbol de jerarquización	76
Figura 16. Diagrama de propuestas	87

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>pág</b>
Ecuación 1. Tela procesada	34
Ecuación 2. Consumo de agua en tintorería	35
Ecuación 3. Porcentaje de remoción	54
Ecuación 4. normalización	79
Ecuación 5. Peso equivalente	80
Ecuación 6. Caudal de trabajo por hora máximo	83
Ecuación 7. Tiempo de retención	84
Ecuación 8. Costo diario de disposición de lodos	90

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>pág</b>
Gráfica 1. Carta de control de SST- segundo semestre de 2019	47
Gráfica 2. Carta de control de Ssed- segundo semestre de 2019	48
Gráfica 3. Carta de control de pH- segundo semestre de 2019	48
Gráfica 4. Carta de control de DQO- segundo semestre de 2019	49
Gráfica 5. Carta de control de CLORUROS- segundo semestre de 2019	49
Gráfica 6. Carta de control de GRASAS- segundo semestre de 2019	50
Gráfica 7. Carta de control- COLOR, segundo semestre de 2019	50
Gráfica 8. Carta de control CAUDAL, segundo semestre de 2019	51

## GLOSARIO

**CLORACIÓN:** consiste en la eliminación de los microorganismos mediante la aplicación de productos clorados. Además, contribuyen a la eliminación del amonio e impide la oxidación de elementos inorgánicos.<sup>1</sup>

**EFLUENTE:** la salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua en un tanque. Este es el agua producto dada por el sistema<sup>2</sup>.

**ESTRATIFICACIÓN:** consiste en que al terminar de retro lavar, las partículas más grandes o más densas queden en la parte inferior de la cama, y las más pequeñas o menos densas queden en la parte superior.<sup>3</sup>

**FILTRACIÓN:** consiste en la eliminación de partículas orgánicas que no hayan podido ser extraídas en los tratamientos anteriores. Para ello se emplean arenas y gravas.<sup>4</sup>

**FLOTACIÓN:** consiste en la retirada de espumas, grasas y aceites ya que debido a la baja densidad que tienen se sitúan en la capa superficial del agua. También pueden eliminarse partículas de baja densidad, para lo que se inyectan burbujas de aire facilitando su ascensión. Con la flotación podrían eliminarse hasta un 75% de las partículas suspendidas. Esto ocurre en otros tanques denominados flotadores por aire disuelto.<sup>5</sup>

**INTERCAMBIO IÓNICO:** técnica utilizada para retirar sales en bajas concentraciones y para ello se emplean unas resinas que son capaces de retener iones temporalmente.<sup>6</sup>

**NEUTRALIZACIÓN:** consiste en la normalización del pH, es decir, ajustarlo a un valor en el rango de 6-8,5, que es típicamente el valor del agua. En el caso de aguas residuales ácidas (pH bajo) como las que contienen metales pesados se añaden sustancias alcalinas (pH alto) para subir el pH del agua. Por el contrario, en aguas

---

<sup>1</sup> LENNTECH. Glosario del agua, una explicación de la terminología referente al agua. [en línea]. 2019. [Consultado 20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm#ixzz62AOgABYR>

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> CARBOTECNIA. Importancia de los retrolavados y ¿Cómo y cuándo realizarlos? [en línea]. Marzo 2019. [20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://www.carbotecnica.info/aprendizaje/filtros-de-lecho-profundo-medios-granulares/retrolavados-o-limpieza-de-los-filtros-de-agua/>

<sup>4</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>5</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>6</sup> LENNTECH. Op. Cit.

residuales alcalinas suele introducirse CO<sub>2</sub> para que el pH del agua disminuya hasta los valores normales.<sup>7</sup>

ÓSMOSIS INVERSA: consiste en la eliminación de sales al pasar el agua desde una disolución más concentrada a una más diluida.<sup>8</sup>

SEDIMENTACIÓN: proceso por el que las partículas caen al fondo gracias a la acción de la gravedad. Pueden eliminarse hasta un 40% de los sólidos que contienen las aguas.<sup>9</sup>

SUSTANTIVIDAD: afinidad del colorante a la fibra determinada.<sup>10</sup>

VERTIMIENTO NO PUNTUAL: aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares<sup>11</sup>.

VERTIMIENTO PUNTUAL: el que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo<sup>12</sup>.

VERTIMIENTO: descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido<sup>13</sup>.

---

<sup>7</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>8</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>9</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>10</sup> WARD, J. Relaciones entre la estructura química de las fibras acrílicas y su comportamiento tintóreo, cursillos y conferencias. Laboratorio de Investigaciones de Tintura de Courtoulds, Ltd. Inglaterra.

<sup>11</sup> LENNTECH. Op. Cit.

<sup>12</sup> COLOMBIA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Permiso-vertimientos. [En línea]. 2019. [Consultado 20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <http://portal.anla.gov.co/permiso-vertimientos>

<sup>13</sup> LENNTECH. Op. Cit.

## RESUMEN

El presente proyecto pretende evaluar y seleccionar diferentes opciones de mejora de tratamiento de aguas residuales que sean económicas, eficientes y suplan las necesidades de la empresa del sector textil; de esta manera se inicia con el primer objetivo que corresponde a los capítulos dos y tres del presente documento, donde se realiza un diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con el fin de identificar puntos críticos y oportunidades de mejora; para dar continuidad al segundo objetivo, se seleccionan alternativas útiles y de posible aplicación que permitan una mejora de los parámetros de vertimiento, con base en métodos de toma de decisiones multicriterio y referencias bibliográficas, presentadas en el capítulo cuatro. Posteriormente en el capítulo cinco se determinan las especificaciones técnicas de instrumentación y mantenimiento preventivo y correctivo para la mejora del proceso en la PTAR, mediante análisis bibliográficos, dando resolución al tercer objetivo y finalmente en el capítulo seis, se desarrolla el cuarto objetivo donde se determinan los costos de la propuesta de los cuales, por iniciativa propia de la empresa, solo se establecen los costos fijos de equipos adquiridos en la propuesta.

Durante el desarrollo se revisan estudios actuales para reformar los procesos de tratamiento de aguas residuales que se centran en técnicas como tamizado, técnicas de coagulación y floculación, adsorción en distintos materiales, oxidación, y tratamientos biológicos<sup>14</sup>. Así como se utilizan programas que permiten recopilación y análisis de datos, como lo son XLSTAT (versión de prueba) de Microsoft, y programas de desarrollo de diagramas como EDraw Max (versión de prueba) de Wondershare Technology Group Co. Ltd. Por otro lado, también se realizaron análisis con metodologías como lo son, cartas de Shewart, método de correlación de Pearson y Spearman, método de jerarquías analíticas, método Delphi, pertenecientes a métodos de toma de decisiones multicriterio y suma de calificaciones ponderadas.

### PALABRAS CLAVES

Tratamiento de aguas, efluentes textiles, biofiltros, coagulación, mantenimiento.

---

<sup>14</sup> COLLIVIGNARELLI, Maria, et al. Treatments for color removal from wastewater: State of art. En: Journal of Environmental Management. Italia. 2019.p.141-142.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria textil toma fuerza en el mundo con el crecimiento de tendencias orientadas al seguimiento de la moda, se estima que el mercado global de la industria textil está valorado actualmente en 1,1 trillones de dólares y constituye casi el 1,8% del PIB mundial; de igual manera se espera que para el 2025 esta industria incremente su valor a 3 trillones de dólares<sup>15</sup>.

En Colombia según Inexmoda se estima que los hogares colombianos para octubre del 2018, destinaron un total de 53,7 billones de pesos en la compra de productos textiles, un 6,11% más que en octubre del 2017<sup>16</sup>; igualmente se estima que las cifras de exportación de prendas de vestir confeccionadas en el 2018 crecieron en un 8%, respectivamente, en comparación con septiembre de 2017, alcanzando cifras de 457.659 miles de dólares FOB<sup>17</sup>. Estos datos representan el incremento de la producción en las industrias textiles radicadas en Colombia. Según un artículo publicado por la Revista Internacional De Contaminación Ambiental en 2018, en el proceso de producción textil se requieren de 100 a 200 L de agua por cada kilogramo de productos textiles, de igual manera el agua residual resultante contiene altos niveles de contaminantes: colorantes, surfactantes, sales inorgánicas y distintos compuestos químicos empleados en el proceso<sup>18</sup>.

La empresa del sector textil, ha llegado a ocupar los primeros lugares en ventas en moda textil en Colombia en los últimos años.<sup>19</sup> En concordancia con la política ambiental de la empresa del sector textil ubicada en Bogotá D.C., donde se expresa el compromiso de esta con una gestión sostenible, ambiental, social y económicamente responsable<sup>20</sup>, se desarrolla el presente proyecto que busca mitigar la gran problemática generada por las aguas residuales no reutilizables en el proceso, afrontando el reto que tiene la empresa de mejorar los parámetros de vertimiento exigidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la Resolución 0631 del 2015.

---

<sup>15</sup> IRIBARREN, Gabriel. Tendencias globales del sector textil blog Gabriel Farias. [En línea]. 2016. [11 de septiembre de 2019] disponible en: <https://gabrielfariasiribarren.com/tendencias-globales-del-sector-textil/>.

<sup>16</sup> MARTINS, J. L., GONZAGA, A., y SANTOS, J. *Informe del sector textil*. No. 71. Elsevier España, [en línea]. 31 de enero de 2018. [11 de septiembre de 2019]. Disponible en <http://www.saladeprensainexmoda.com/informe-textil-y-confeccion-noviembre-2018/>

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p. 11.

<sup>18</sup> BUSCIO, V, et al. Reuse of textile wastewater after homogenization-decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes, *Chemical Engineering Journal*. 2014. p. 122-128.

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p. 7.

<sup>20</sup> PEREZ, Hanoj et al. Balance social de empresa del sector textil. [en línea]. Febrero 2018. [10 de noviembre de 2019]. Disponible en [https://issuu.com/empresatextiltoda/docs/balance\\_social\\_empresadelsectortextil.\\_2016](https://issuu.com/empresatextiltoda/docs/balance_social_empresadelsectortextil._2016). p.42

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una empresa del sector textil.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar el proceso realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).
- Seleccionar alternativas de mejora para el proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Determinar las especificaciones técnicas para la mejora del proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Realizar el análisis de costos de la propuesta de mejora del proceso de la PTAR.

# 1. MARCO DE REFERENCIA

## 1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Aguas residuales. Son aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas y vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado, Estas se encuentran clasificadas en industriales que se generan a partir de procesos productivos provenientes de actividad minera, agrícola, energética, agro industrial entre otros, la segunda generada por vía domestica provenientes de zonas residenciales y comerciales que contienen desechos fisiológicos entre otros residuos provenientes de la actividad humana y por ultimo las aguas municipales las cuales son una mezcla de aguas domesticas con aguas de drenaje pluvial o de origen industrial previamente tratado y permitido<sup>21</sup>.

1.1.2 Contaminantes del agua. A continuación, se enuncia los principales contaminantes de las aguas residuales

1.1.2.1 Agentes patógenos. Son entes biológicos dentro de los cuales están bacterias, virus, parásitos u otros organismos lo cuales provienen de los desechos de carácter orgánico.<sup>22</sup>

1.1.2.2 Sustancias químicas orgánicas. Son aquellas sustancias químicas que contienen carbono las cuales pueden permanecer en el agua durante un largo periodo de tiempo.<sup>23</sup>

1.1.2.3 Sustancias químicas inorgánicas. Se trata de ácidos, sales o metales tóxicos, como el mercurio o el plomo.<sup>24</sup>

1.1.2.4 Desechos orgánicos. Son el conjunto de residuos orgánicos entre los cuales contiene aceites, grasas, proteínas, entre otros.<sup>25</sup>

---

<sup>21</sup> ORGANISMO DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN AMBIENTAL – OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales. 1 edición. [en línea]. Lima, Perú. 2014. [Consultado 10 de septiembre de 2019]. Disponible en [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)

<sup>22</sup> PULIDO, Sandra, et al. Origen y Características de las aguas residuales. [en línea]. Bogotá D.C. [Consultado 22 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>

<sup>23</sup> Ibid. parr.3

<sup>24</sup> Ibid. parr.4

<sup>25</sup> Ibid. parr.5

1.1.2.5 Nutrientes vegetales inorgánicos. Son nitratos y fosfatos (nitrógeno y fósforo), sustancias solubles en agua y que las plantas necesitan para su desarrollo.<sup>26</sup>

1.1.2.6 Sedimentos o materias suspendidas. Partículas insolubles de suelo que enturbian el agua su turbidez provoca la vida de algunos organismos y la fotosíntesis de las plantas <sup>27</sup>

1.1.2.7 Sustancias radiactivas. Isótopos radioactivos solubles que pueden estar presentes en el agua, derivados de la energía nuclear y de la actividad de centrales termonucleares, perjudiciales para la salud del hombre y de los seres vivos.<sup>28</sup>

1.1.2.8 Metales pesados. La presencia en las aguas residuales de metales pesados tales como plomo, cadmio, selenio, cromo, cobre, etc.<sup>29</sup>

1.1.3 Tratamientos de aguas residuales. Conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es que a través de diferente quipos y procesos se elimine total o parcialmente la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales, con el objetivo de obtener aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, ya sea de recicló o de vertimiento, donde en este último cumpla con los parámetros establecidos por la ley<sup>30</sup>.A continuación se enuncia cada una de las etapas del tratamiento de aguas residuales.

1.1.3.1 Pretratamiento. Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización. Su objetivo principal es remover sólidos gruesos para evitar atascos, abrasión y daños a tuberías, bombas, equipos y a otros elementos del proceso.<sup>31</sup>

1.1.3.2 Tratamiento primario. Tiene como objetivo remover la mayor parte de la materia orgánica suspendida decantable, con capacidad de remoción entre el 25% y el 50% de la DBO y desde el 70% hasta el 80% de los sólidos suspendidos<sup>32</sup>

---

<sup>26</sup> Ibid. parr.6

<sup>27</sup> Ibid. parr.7

<sup>28</sup> Ibid. parr.8

<sup>29</sup> Ibid. parr.9

<sup>30</sup> LOZANO, Antonio. Curso fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales.2012. p.96

<sup>31</sup> Ibid., p. 36

<sup>32</sup> Ibid., p. 37

1.1.3.3 Tratamiento secundario. Se emplea para eliminar la contaminación orgánica, remover materia orgánica soluble y suspendida y eliminar patógenos y otros elementos contaminantes. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia de remoción de la DBO entre el 85% al 95. 2.<sup>33</sup>.

1.1.3.4 Tratamiento terciario . Se utiliza técnicas de ambos tipos de tratamiento con la función de pulimento en la reducción de la materia orgánica, mejorando alguna de sus características hasta el punto de lograr agua limpia competente para el abastecimiento de necesidades agrícolas, industriales, e incluso para potabilización o simplemente para cumplir con los parámetros de vertimientos.<sup>34</sup>

El Cuadro 1, permite evidenciar los procesos representativos para cada etapa de los tratamientos descritos anteriormente.<sup>35</sup>

**Cuadro 1.** Tipos de tratamiento en aguas residuales

<b>Tratamiento</b>	<b>Operación unitaria</b>
Pretratamiento	Eliminación de sólidos gruesos (rejillas)
	Trituración de sólidos (trituradores)
	Eliminación de arenas y gravilla (desarenador)
	Eliminación de aceites y grasas (Desengrasador)
	Pre aireación (Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico)
	Igualación u homogenización (efluentes industriales)
	Neutralización (efluentes industriales, especialmente)
Tratamiento Primario	sedimentación y filtración.
	Sedimentación primaria.
	Precipitación química.
	Oxidación química.
	Coagulación
	Floculación
	Flotación

<sup>33</sup> Ibid., p. 38

<sup>34</sup> Ibid., p. 38

<sup>35</sup> Ibid., p. 38

**Cuadro 1. (Continuación)**

Tratamiento secundario	Reacción biológica aerobia
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos activados</li> <li>• Filtros</li> <li>• Percoladores</li> <li>• Biodiscos</li> </ul>
Tratamiento terciario	Reacción biológica anaerobia
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UASB (reactor anaerobio de flujo ascendente)</li> <li>• RAP (reactor anaerobio de flujo a pistón)</li> </ul>
	Adsorción
	Intercambio iónico
	Filtración
Lagunas	
Desinfección	

**Fuente:** elaboración propia, con base en LOZANO, Antonio. Curso fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales.2012. p.94-96

#### 1.1.4 Procesos de tratamiento de aguas residuales.

1.1.4.1 Coagulación-floculación. Se basa en la adición de polielectrolitos o floculantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio), que forman flóculos con las moléculas de colorante facilitando su eliminación por decantación. Las eficacias de eliminación son altas, pero en el proceso se generan lodos que deben ser tratados. Los mejores rendimientos se logran al aplicar un exceso de coagulante, aunque esto puede aumentar la concentración de contaminante en el efluente.<sup>36</sup>

1.1.4.2 Proceso Fenton. Se oxida el colorante con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), en condiciones ácidas. El agente responsable de la oxidación es el radical hidroxilo, el cual es altamente reactivo y se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno en un medio ácido. Los radicales hidroxilo oxidan el tinte, y el compuesto formado precipitando con el ion férrico y compuestos orgánicos. Las ventajas de esta alternativa son varias: se consiguen altas velocidades de decoloración si las concentraciones de los reactivos implicados son elevadas, no se forman compuestos clorados como en

<sup>36</sup> TUSET, Sergio. Tratamiento para la eliminación del color en aguas residuales de la industria textil. Condorchem Envitech. [en línea]. 27 noviembre 2013. [Consultado 07 de enero de 2020]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-para-la-eliminacion-del-color-en-aguas-residuales-de-la-industria-textil/>

otras técnicas oxidantes y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo. Sin embargo, sus principales desventajas son los costes asociados al tratamiento de lodos (se genera una gran cantidad de lodos poco densos y, por consiguiente, difíciles de decantar) y a los costes de los reactivos (se requiere la adición continua y estequiométrica de Fe(II) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).<sup>37</sup>

1.1.4.3 Ozonización. Se destruyen las moléculas de colorante en base a la elevada capacidad oxidante del ozono. La reacción de oxidación es rápida, se pueden tratar altos caudales, no se generan residuos ni lodos y se obtiene un efluente incoloro y con baja DQO. Sin embargo debe comprobarse la toxicidad del efluente, pues en algunos casos los compuestos generados tienen mayor carácter tóxico que los colorantes de partida. Otra gran desventaja de la ozonización es el corto tiempo de vida media del ozono, en torno a 20 minutos, lo cual repercute significativamente en el coste del proceso. Se ha observado que cuando se complementa la producción de ozono con la adición de peróxido de hidrógeno, se consigue un incremento significativo tanto en la velocidad como en el rendimiento de eliminación.<sup>38</sup>

1.1.4.4 Tecnología de membranas. Permite una separación efectiva de las moléculas de colorante y otros compuestos de tamaño mayor al del poro de la membrana seleccionada. Principalmente se emplean membranas de ósmosis inversa y nanofiltración. Mediante este procedimiento es posible tratar grandes volúmenes de afluente de forma continua y con un alto grado de separación. Los efluentes son de una calidad excelente y en la mayoría de los casos permiten la reutilización del mismo. Las principales desventajas de estas técnicas son la generación de un residuo con una alta concentración de contaminante y la dificultad y coste de sustitución de las membranas.<sup>39</sup>

1.1.4.5 Adsorción. Se basa en la retención física de las moléculas de colorante en la superficie del adsorbente que se utilice. La eficacia del proceso de adsorción está influenciada por una gran variedad de parámetros, entre ellos la interacción entre el colorante y el adsorbente, la superficie específica de éste, el tamaño de la molécula de colorante, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto. Así pues, es fundamental el tipo de adsorbente elegido. Un adsorbente frecuentemente utilizado es el carbón activo, aunque también se emplean otros adsorbentes inorgánicos. Los procesos de adsorción generan efluentes de alta calidad, aunque presentan una serie de desventajas que los hace no competitivos para el tratamiento de efluentes coloreados: son procesos lentos; no selectivos, de manera que hay una competición entre las moléculas de tinte y otros compuestos presentes en el efluente; no

---

<sup>37</sup> TUSET. Sergio. Op. Cit. parr. 6

<sup>38</sup> TUSET. Sergio. Op. parr. 7

<sup>39</sup> TUSET. Sergio. Op. parr. 8

destructivos, generándose un residuo que debe ser eliminado; la desorción es un proceso difícil y costoso y, por último, los adsorbentes suelen ser caros.<sup>40</sup>

1.1.4.6 Técnicas electroquímicas. Se basan en la hidrólisis del colorante a través de agentes secundarios generados electrolíticamente mediante la aplicación de un potencial. Los procesos son limpios, operan a baja temperatura y en muchos casos no requieren la adición de productos químicos a las aguas residuales. No obstante, su alto consumo de energía y la generación de compuestos secundarios por reacciones paralelas disminuyen la potencialidad del método.<sup>41</sup>

1.1.4.7 Procesos biotecnológicos. La aplicación de microorganismos a la degradación de aguas que contienen tintes sintéticos es una opción interesante por las ventajas derivadas del tratamiento biológico, ya que son procesos relativamente económicos y pueden permitir la degradación parcial o total de los componentes iniciales. Aunque mediante el proceso convencional de lodos activos, aerobio, no se degrada el colorante y el bajo rendimiento de eliminación se atribuye a la adsorción sobre los lodos. Mediante procesos anaerobios se consiguen elevados rendimientos de eliminación para una gran variedad de colorantes, aunque la cinética del proceso es lenta. Por otro lado, se están desarrollando sistemas en los que el colorante es degradado mediante la acción de enzimas producidas por hongos ligninolíticos en cultivos in vivo e in vitro. Son procesos selectivos en los que se alcanzan rendimientos elevados. Sin embargo, no son procesos económicos y se están desarrollando para su aplicación en continuo, recuperando las enzimas utilizadas<sup>42</sup>

1.1.5 Parámetros en aguas residuales.

1.1.5.1 Relación DQO/DBO. Indica el grado de biodegradabilidad del vertido.<sup>43</sup>

1.1.5.2 DBO (Demanda Biológica de Oxígeno). Es la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable durante cinco días y a 20°C y corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica. El ensayo dura entre 5 y 27 días, siendo generalmente el análisis a los 5 días el más común. El análisis de DBO se basa en medir el consumo de oxígeno por una población bacteriana. El método de análisis normativo se basa en la realización de diferentes diluciones de la muestra de agua (método de dilución), para ello se debe preparar el agua de dilución en frascos de incubación que son inoculados y se requiere la

---

<sup>40</sup> TUSET. Sergio. Op. Cit. parr. 9

<sup>41</sup> TUSET. Sergio. Op. Cit. parr. 10

<sup>42</sup> TUSET. Sergio. Op. Cit. parr. 11

<sup>43</sup> LÓPEZ, Víctor y CRESPI, Martín. Gestión de los efluentes de la industria textil. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña. [En línea]. Septiembre 2015. [Consultado 07 de enero de 2020]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87574/Gesti%C3%B3n%20efluentes%20textiles%20Num18.pdf>

preparación de blancos. También se pueden aplicar métodos instrumentales donde se hace un seguimiento del consumo de oxígeno, como son el método manométrico o el método espirométrico. <sup>44</sup>

1.1.5.3 DQO (Demanda Química de Oxígeno). Cantidad de oxígeno (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. <sup>45</sup>

1.1.5.4 Carbono orgánico total. Mide el contenido de carbono orgánico (mg C/l) del agua. Se trata de una medición instrumental que se lleva a cabo con un analizador de TOC. <sup>46</sup>

1.1.5.5 Materias en suspensión. Todas las sustancias suspendidas en el agua y que no decantan de forma natural (mg/l). La determinación de MES se lleva a cabo según un método de análisis de sólidos en suspensión por medio de la filtración de un volumen de muestra de agua conocido, utilizando un aparato de vacío, a través de un filtro de fibra de vidrio. Posteriormente se seca el filtro a  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y se determina la masa del residuo retenido en el filtro mediante pesada. <sup>47</sup>

1.1.5.6 Conductividad (salinidad). Medida del contenido de sales solubles del agua. Indicador del incremento de iones en el agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La conductividad eléctrica depende de la concentración y naturaleza de los iones y de la temperatura y viscosidad de la solución. <sup>48</sup>

1.1.5.7 Color, Determinación cuantitativa por comparación visual con patrones. La presencia de color en el agua supone un impedimento en el paso de luz al acuífero y supone un desagradable efecto visual. <sup>49</sup>

1.1.5.8 Materias inhibidoras. Medida del grado de toxicidad del agua por inhibición de los procesos biológicos. Análisis con bacterias fluoro luminiscentes del tipo *Photobacterium phosphoreum*. La toxicidad se expresa como concentración de agente contaminante que produce la reducción del 50% de la luminiscencia inicial (EC50). <sup>50</sup>

1.1.5.9 Contenido de nutrientes (nitrógeno [N] y fósforo [P]). Estos compuestos, conjuntamente con la materia carbonácea o DBO indican si las aguas residuales

---

<sup>44</sup> *Ibíd.*, p. 11.

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 11.

<sup>46</sup> *Ibíd.*, p. 12

<sup>47</sup> *Ibíd.*, p. 12

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 12

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 13

<sup>50</sup> *Ibíd.*, p. 13

tienen la adecuada proporción de nutrientes como para facilitar la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales.<sup>51</sup>

1.1.5.10 Nitrógeno. Medida conjunta del contenido de nitrógeno en el agua constituido por la suma del N orgánico y el N amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). No incluye el contenido de nitratos y nitritos. La determinación se lleva a cabo según la norma UNE EN 25663 donde se mineraliza el contenido de nitrógeno por digestión con ácido sulfúrico, para formar sulfato amónico, a partir del cual se libera el amonio, que se destila y se determina a continuación mediante una valoración. La determinación de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) puede llevarse a cabo también por otros métodos analíticos como la cromatografía iónica o con el uso de un electrodo selectivo.<sup>52</sup>

1.1.5.11 Fósforo total. Medida global del contenido de fósforo del agua constituido por la suma de compuestos fosforados orgánicos e inorgánicos (fosfatos). Los iones ortofosfato reaccionan con una solución ácida que contiene iones molibdato y antimonio para formar un complejo que una vez reducido con ácido ascórbico da lugar a un complejo de intensa coloración azul cuya absorbancia es medida con un espectrofotómetro. Los iones ortofosfato también pueden analizarse por cromatografía iónica y mediante un electrodo selectivo.<sup>53</sup>

1.1.5.12 Tensioactivos. Compuestos aportados al agua por el uso de detergentes. Dan lugar a la formación de espumas apreciables en los cursos de agua y que pueden generar problemas operativos en los sistemas de depuración. Se distinguen dos procedimientos diferentes en función de si se trata de tensioactivos aniónicos o no iónicos. Para los tensioactivos aniónicos se forma una sal coloreada por reacción con azul de metileno. Seguidamente se extrae la sal con cloroformo. Se separa la fase orgánica y finalmente se mide la absorbancia de la muestra con un espectrofotómetro. Los tensioactivos no iónicos, el tensioactivo se extrae por medio de una corriente de aire y es recogido en acetato de etilo. Seguidamente se hace precipitar con el reactivo de Dragendorff que posteriormente se elimina para medir la absorbancia de la muestra por espectrofotométrica.<sup>54</sup>

1.1.5.13 Contenido de gérmenes. Está conformado por *Estreptococos*, *Coliformes fecales*, *Salmonellas*, *Ascaris*, *Trichuris*, *Amebas*, etc. Su presencia permite evaluar el peligro a la salud debido a la contaminación biológica.<sup>55</sup>

---

<sup>51</sup> *Ibíd.*, p. 13

<sup>52</sup> *Ibíd.*, p. 13

<sup>53</sup> *Ibíd.*, p. 13

<sup>54</sup> *Ibíd.*, p. 15

<sup>55</sup> *Ibíd.*, p. 15

## 1.2 MARCO LEGAL

1.2.1 Resolución 0631 de 2015. El Ministerio de Medio Ambiente de Colombia enuncia la Resolución dictaminada para el tratamiento de aguas y se define a continuación por la misma en el artículo número 1, objeto y ámbito de aplicación así: “Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Igualmente, se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios, de conformidad con el artículo 18 de la presente resolución”.

**Tabla 1.** Resolución 0631 de 2015-vertimiento aguas textiles en alcantarillado

PARÁMETRO	VALORES LÍMITES PERMISIBLES PARA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS TEXTILES
pH	5,00 a 9,00 Unidades de pH
DQO	600,0 mg/L O <sub>2</sub>
DBO	300,0 mg/L O <sub>2</sub>
Sólidos Suspendidos Totales	75,0 mg/L
Sólidos Sedimentables	3,00 mg/L
Grasas y Aceites	30,0 mg/L
Fenoles Totales	0,20 mg/L
Tensoactivos	Análisis y Reporte
Ortofosfatos	Análisis y Reporte
Fósforo Total	Análisis y Reporte
Nitratos	Análisis y Reporte
Nitritos	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal	Análisis y Reporte
Cianuro Total	0,10 mg/L
Cloruros	1200 mg/L
Fluoruros	5,0 mg/L
Sulfatos	250,0 mg/L
Sulfuros	1,00 mg/L
Acidez Total	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	Análisis y Reporte
Dureza Total	Análisis y Reporte
Color Real	Análisis y Reporte

**Fuente:** COLOMBIA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015. (17 de marzo de 2015) Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. En Diario Oficial 49.486 de 18 de abril de 2015. p 1- 50

Esta Resolución servirá de guía para la determinación de los parámetros que deben cumplir los vertimientos del agua residual y así ser una guía para comparar los valores con los resultados de la PTAR.

1.2.2 Decreto 1180 de 2003. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales, y el cual servirá de referencia para el cumplimiento y el conocimiento de la licencia ambiental otorgada a la empresa del sector textil estudiada en el presente trabajo.

1.2.3 Resolución 2086 de 2010. Del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, por el cual se adopta la metodología para la tasación de multas consagradas en el numeral 1ª del artículo 40, de la ley 1333 del 21 de julio de 2009 y se toman otras determinaciones, Siendo un referente de las posibles sanciones que se otorgan en el incumplimiento de la resolución 631 de 2015, de hasta 5000 (cinco mil) salarios mínimos legales vigentes.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 LA EMPRESA

La empresa del sector textil, ubicada en Bogotá D.C. es una compañía especializada en la producción y distribución de productos textiles a través de marcas reconocidas nacional e internacionalmente, maneja los segmentos de moda formal, informal y juvenil por medio de la venta en tiendas propias.<sup>56</sup> Siendo una multinacional con presencia en más de 400 tiendas a nivel nacional e internacional

De acuerdo a la política ambiental de la empresa del sector textil, donde se expresa el compromiso de esta con una gestión sostenible, ambiental, social y económicamente responsable, buscando el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible que plantean garantizar una protección duradera del planeta y sus recursos naturales<sup>57</sup>, se publicó un informe de sostenibilidad en el año 2017 donde se consignan los avances en tema de reducción del consumo energético e hídrico evidentes y que han sido un foco de importancia para el desarrollo de las actividades industriales<sup>58</sup>, sin embargo, las aguas de vertimiento siguen representando una gran problemática debido a la naturaleza de estos efluentes, por lo que actualmente la empresa del sector textil centra sus esfuerzos en recuperar la mayor cantidad de agua residual para su reutilización en diferentes procesos industriales como lo es oxidación con ozono, en una planta de recuperación de aguas residuales (PRAR),<sup>59</sup> mientras que el agua no reutilizable se direcciona a la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), para ser vertida conforme a la norma. Siendo estos también, un reto para la empresa del sector textil debido a que los parámetros exigidos tienen actualmente valores al límite de lo permitido por la norma.

Gracias al crecimiento de la industria textil y al compromiso de la empresa del sector textil con el desarrollo sostenible y con el fin de certificarse en la ISO 14001 de gestión ambiental y energética,<sup>60</sup> es de gran importancia mejorar los parámetros de vertimiento de las aguas residuales que se generan conforme a la normativa actual vigente en Colombia, la cual es establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la Resolución 0631 del 2015 donde se instauran los parámetros y límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realicen

---

<sup>56</sup> ISI Emerging Markets Group Company. EMIS university, Compañías. [en línea]. 2019. [Consultado 06 de enero de 2020]. Disponible en: [www.emis.com](http://www.emis.com)

<sup>57</sup> PEREZ, Hanoj, et al. Balance social de empresa textil LTDA 2016. Op. Cit., p. 36.

<sup>58</sup> PEREZ, Hanoj, et al. Informe de sostenibilidad de empresa textil LTDA 2017. [en línea]. Mayo 2019. [Consultado 11 de septiembre de 2019]. Disponible en: [https://issuu.com/empresatextilltda/docs/final\\_info\\_empresatextil\\_sostenibilidad\\_d.2019](https://issuu.com/empresatextilltda/docs/final_info_empresatextil_sostenibilidad_d.2019). p. 47.

<sup>59</sup> Ibid., p. 47

<sup>60</sup> Ibid., p. 20.

vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN

La tintorería de la empresa del sector textil opera 7 días a la semana 24 horas, el orden de producción depende de la demanda de productos, sin embargo, se procura trabajar con distribuciones semanales, separando así las gamas claras de las gamas oscuras para la producción. Los equipos encargados de realizar el proceso de teñido son denominados SCLAVOS, la tintorería cuenta con 14 equipos de diferente capacidad, donde el equipo más grande tiene una capacidad de procesamiento de 1200 kg de tela por lote y el más pequeño de 10 kg por lote, por lo tanto, la tintorería puede procesar 3700 kg de tela al tiempo.

**Figura 1.** Equipo de tintura textil



**Fuente:** SCLAVOS. Way of dyeing [Sitio web]. Unión Europea: Equipo de teñido. [20 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/3eaWnkX>

El máximo consumo de agua de la planta se puede calcular teniendo en cuenta que cada equipo se llena con el 80% de su capacidad real y considerando la relación de agua durante el proceso que es de 60 litros de agua por cada kilogramo de tela procesada, de esta manera si se introducen 500 kg de tela para tinte, se agregan 30000 L de agua.

Se determina el consumo máximo de agua posible de la tintorería si todos los equipos operaran con su capacidad máxima y teniendo en cuenta que los lotes de teñido tienen un tiempo de residencia de aproximadamente 5 horas, como se establece a continuación:

**Ecuación 1.** Tela procesada

$$3700 \text{ kg de tela} * 0,8 = 2960 \text{ kg de tela}$$

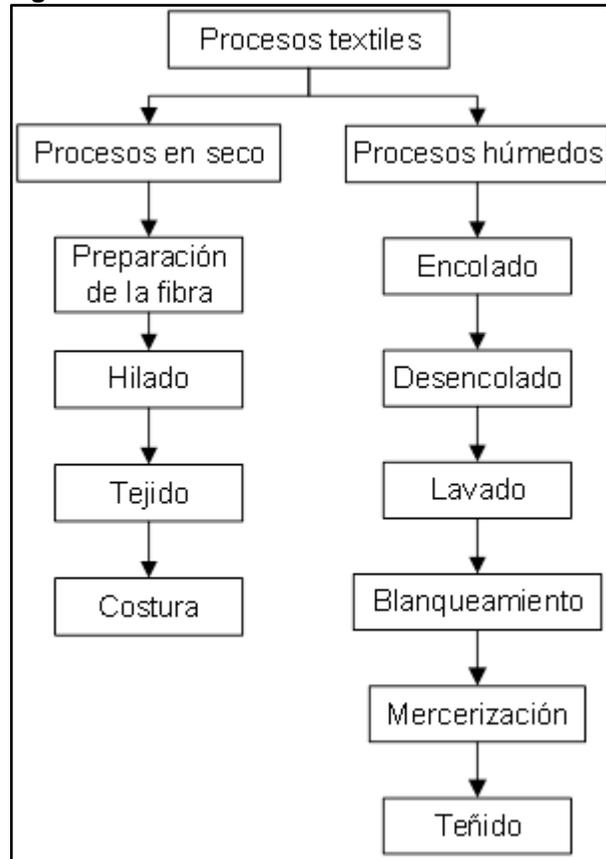
**Ecuación 2.** Consumo de agua en tintorería

$$2960 \text{ kg de tela} * 60 \text{ L de agua} = \frac{177600 \text{ L de agua}}{5 \text{ horas de operación}}$$

Por lo tanto de la Ecuación 1 y la Ecuación 2, se puede concluir que el agua máxima de consumo en la tintorería es 35520 L/h o 35,520 m<sup>3</sup>/h, volumen que finalmente se debe reflejar en la capacidad de tratamiento de la PTAR.

La Figura 2 evidencia los procesos comúnmente realizados para la fabricación de productos textiles, los cuales son descritos posteriormente.

**Figura 2.** Procesos textiles



**Fuente.** elaboración propia, con base en SREBRENKOSKA, Vineta, et al. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. International Scientific Conference. 2014.

2.2.1 Procesos en seco. Todos ellos realizados por el personal operativo de la planta de producción, genera residuos sólidos en su mayoría conformado por empaques plásticos, retazos de tela y conos de hilos, Srebrenkoska señala los procesos en seco que se realizan en la industria textil, como se mencionan a continuación.

2.2.1.1 Preparación de la fibra. Conjunto de operaciones dirigidas a la adecuación y regularización de las fibras (estirado, limpieza, cardado, peinado) para conformar una mecha o cinta que se emplea posteriormente para el hilado.<sup>61</sup>

2.2.1.2 Hilado. Consiste en consolidar fibras para obtener un elemento de características específicas en cuanto a elasticidad, resistencia y flexibilidad.<sup>62</sup>

2.2.1.3 Tejido. Conjunto de operaciones que se ejecutan sobre hilos e hilazas, necesarias para la obtención de los tejidos. Existe tejido plano o de punto.<sup>63</sup>

2.2.1.4 Costura. Unión de recortes de tela para formar prendas.<sup>64</sup>

2.2.2 Procesos húmedos. Estos procesos ocurren en un equipo de teñido por lotes, de esta manera se añaden determinados productos químicos, agua y la tela; tras un tiempo de residencia se realiza el descargue del lote.<sup>65</sup>

2.2.2.1 Encolado. Se realiza para modificar las características del hilado con el fin de mejorar su resistencia a la tracción o suministrarle "cuerpo" a la tela; el proceso consiste en sumergir la tela en variados productos químicos que permiten el cambio de sus propiedades.<sup>66</sup>

2.2.2.2 Desencolado. Se utiliza almidón, glucosa, resinas, grasas y ceras; con el fin de eliminar las impurezas externas y lograr una buena humectación, mejorar el proceso de tintura y el acabado.<sup>67</sup>

2.2.2.3 Lavado. Son operaciones conectadas a tratamientos clave y se utilizan para remover las materias insolubles del tejido.<sup>68</sup>

2.2.2.4 Blanqueamiento. (Bleaching) consiste en la aplicación de agentes blanqueadores como hipoclorito de sodio (NaClO) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

---

<sup>61</sup>SREBRENKOSKA, Vineta, et al. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. International Scientific Conference. 2014..

<sup>62</sup> Ibid. p. 10.

<sup>63</sup> Ibid. p. 10.

<sup>64</sup> Ibid. p. 10.

<sup>65</sup> Ibid. p. 10.

<sup>66</sup> Ibid. p. 10.

<sup>67</sup> Ibid. p. 10.

<sup>68</sup> Ibid. p. 10.

en un medio con hidróxido de sodio (NaOH) con el fin de preparar el producto para el proceso de teñido.<sup>69</sup>

2.2.2.5 Mercerizar. Es un tratamiento para hilos y tejidos de algodón que mejora el brillo y la humectabilidad de la tela; se lleva a cabo añadiendo soda caústica, bajo condiciones de presión y baño de temperatura entre 15-20°C.<sup>70</sup>

2.2.2.6 Teñido. Consiste en poner una solución colorante en contacto con el textil con el fin de brindar a la tela color, matiz y brillo. Este proceso es crítico ya que el color de la tela debe ser permanente y determinará la calidad del producto textil.<sup>71</sup>

2.2.3 Otros procesos. Estampado y acabados que definen la finalización del proceso.

## 2.3 PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO

La tintura es una modificación físico-química del sustrato, en este caso es fibra que puede ser de origen natural (vegetal, animal, mineral) y de origen químico (de polímeros naturales o de polímeros sintéticos), que se realiza para que la luz reflejada provoque una percepción del color. Los productos que provocan dichas modificaciones son llamados colorantes.<sup>72</sup> Algunos productos químicos comunes que son añadidos durante el proceso, para asegurar una tintura adecuada se enuncian en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Productos químicos en la tintorería.

PRODUCTOS	SUBCLASE	APLICACIÓN
Igualadores/retardantes	Aniónico	Empleo conforme a clase de colorante y fibra
	Catiónico	
Dispersantes	Diferentes estructuras químicas	Tintura de fibras sintéticas con colorantes dispersos – celulosa/ colorantes sulfurosos
Carriers	Diferentes estructuras químicas	Tintura de fibras sintéticas con colorantes dispersos
Antirreductores	p-nitrobenzeno sulfonado	Tintura de celulosa con colorantes reactivos
Fijadores	Aniónico	Fijación de colorantes ácidos en poliéster o poliamida
	Catiónico	

<sup>69</sup> Ibid. p. 10.

<sup>70</sup> LOCKUAN, Eduardo. La industria textil y su control de calidad. Creative Commons atribución, 2012. 72-106 p

<sup>71</sup> Ibid. p. 10.

<sup>72</sup> SALEM, Vidal. Tingimento Têxtil. Sao pablo, Brasil: Blucher, 2010. 43 p

**Cuadro 2.** (Continuación)

PRODUCTOS	SUBCLASE	APLICACIÓN
Reductores	Base sulfuros	Tintura con colorantes sulfurosos
	Base dextrosa	
Oxidantes	No aplica	Tintura con colorantes sulfurosos
Anti migrantes	No aplica	Procesos continuos
Antiespumantes	No aplica	Procesos continuos o por agotamiento
Agente de lavado posterior	No iónicos	Jabonado de colorantes reactivos
Secuestrantes	Diferentes estructuras químicas	Diferentes clases de colorantes

**Fuente:** SALEM, Vidal. Tingimento Têxtil. Sao pablo, Brasil: Blucher, 2010. 57 p.

La etapa inicial del proceso de teñido, en la empresa del sector textil, consiste en preparar la tela, el tejido que puede ser de diversos materiales como algodón, licra, poliéster, etc. Inicialmente es un recorte de tela con grandes dimensiones y de coloración blanca, gracias a un pretratamiento ajeno a los procesos realizados en la empresa del sector textil; con el fin de que la tela adquiera adecuadamente el colorante aplicado y los procesos de acabado textil, se aplican productos de preparación junto con agua a 35°C. En el Cuadro 3 se presentan dichos productos y sus funciones.

**Cuadro 3.** Productos para preparación de la tela

Nombre comercial	Función
Casditrol	Jabón para remover impurezas y anti quiebre
Casdzyme	Secuestrante para fijar el color de los tintes
Ultravon	Humectante para romper la tensión superficial entre el agua y la fibra

**Fuente:** elaboración propia

El proceso de preparación varía con respecto a la tela y los tintes aplicados, en promedio se estima que dicho proceso ocurre en una hora, dentro del equipo de tintura (Sclavo). Posteriormente se añade al equipo los tintes juntos con una serie de productos que son auxiliares de teñido, expuestos en el Cuadro 4, y se eleva la temperatura del proceso progresivamente hasta 130°C asegurando que el tinte se adhiera adecuadamente a la tela.

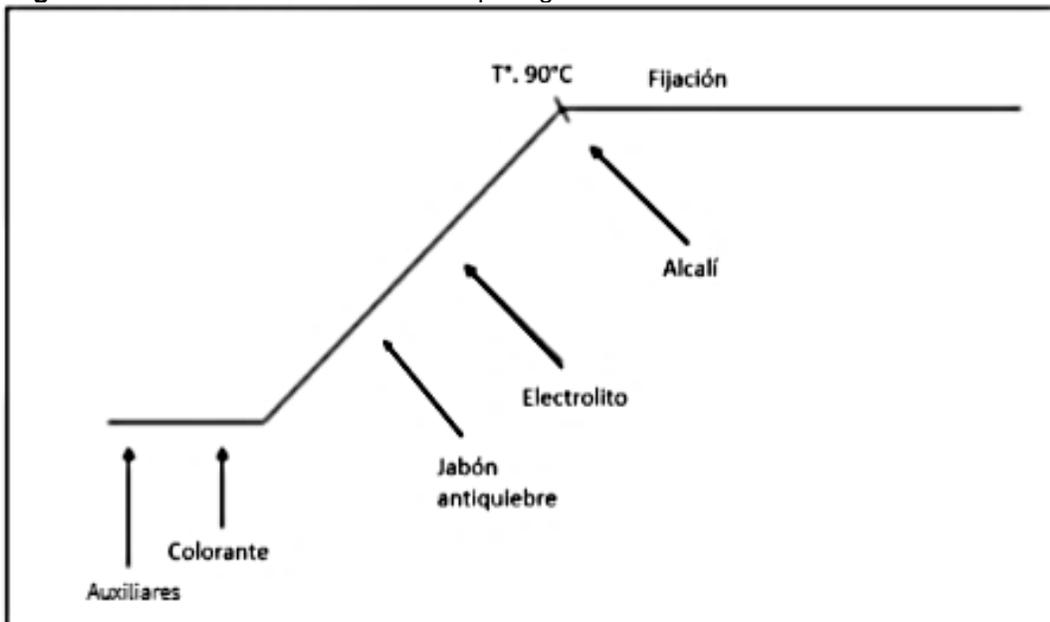
**Cuadro 4.** Auxiliares de teñido

Nombre comercial	Función
Colorante reactivo	Provocar percepción de color
Sulfato de sodio	Electrolito para mejorar la sustentividad
Carbonato de sodio	Álcali facilita la fase de fijación donde ocurre la reacción colorante y fibra
Soda cáustica	Aumenta el pH para adecuar condiciones de teñido
Casditrol	Jabón para remover impurezas y anti quiebre

Fuente: elaboración propia

El proceso de teñido tiene una duración aproximada de 4 horas y finalmente la temperatura debe ser controlada para que llegue a 90°C después de su punto máximo, todo esto depende de la coloración deseada y de la tela en proceso, posteriormente se realiza una descarga del agua en el equipo y se realiza un lavado de la tela con ácido acético para neutralizar el pH de la tela y con productos suavizantes. La Figura 3 describe el proceso tradicional de tintura por agotamiento con colorantes reactivos calientes, como ocurre en la empresa del sector textil.

**Figura 3.** Proceso tradicional de tintura por agotamiento con colorantes reactivos



Fuente: SALEM, Vidal. Tingimento Têxtil. Sao pablo, Brasil: Blucher, 2010. 197

### 3. DIAGNÓSTICO

#### 3.1 GENERALIDADES SOBRE LA PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), consta con una capacidad de 30 m<sup>3</sup>/h y con un área instalada de 165 m<sup>2</sup>, actualmente, se constituye de un sistema de pre tratamiento, tratamiento primario y un tratamiento terciario, de los cuales su efluente se direcciona al alcantarillado y a partir de muestreos se registra la calidad de los parámetros asociados a la norma 0631 del 2015.

#### 3.2 TIPOS DE TRATAMIENTOS REALIZADOS EN LA PTAR

3.2.1 Pretratamiento. El pretratamiento está compuesto por dos equipos, el primero un filtro box (tamiz vibratorio) con tamaño de malla 60 que se encarga de eliminar los residuos sólidos que son desprendidos de la tela o de los químicos a lo largo del proceso de tintura y lavado como motas, retazos, trazas de piedras pomes, entre otros y el cual es un proceso necesario, especialmente cuando las aguas residuales no tratadas llevan cantidades altas de sólidos en suspensión, flotantes o residuos; y el segundo, una torre de enfriamiento, la cual tiene como objetivo ajustar la temperatura de la corriente que ingresa al tratamiento primario.

3.2.2 Tratamiento primario. Después del pretratamiento la PTAR cuenta con un equipo, DAF, el cual realiza la remoción de sólidos, grasas y aceites por medio de un sistema de flotación de aire disuelto permitiendo así una disminución en parámetros como sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, color, Demanda química de oxígeno (DQO), aunque su principal función es la eliminación de lodos de la corriente de agua residual.

3.2.3 Tratamiento secundario. Como ultimo tratamiento realizado en la PTAR, está el sistema de filtros compuesto por dos filtros de arena y dos de carbón los cuales retiran carga orgánica, partículas de tamaño en micras y cloro, finalizando así el proceso por completo de la planta y enviando la corriente de salida para vertimiento al alcantarillado como la norma 0631 lo establece.

3.2.4 Tratamiento de lodos. A los lodos obtenidos se les realiza un proceso de mezclado que permite su homogenización después del proceso del DAF para luego ser enviados a un tornillo prensa, que remueve parte de la humedad de estos, y posteriormente es dispuestos por una empresa de residuos ambientales.

#### 3.3 FUENTES DE SUMINISTRO A LA PTAR

3.3.1 Lavado. El lavado de las prendas se realiza con una mezcla de agua y jabón

industrial, el agua resultante de este proceso se dirige a un tratamiento por ozonización con el fin de disminuir la carga de la misma para ser almacenada y reutilizada posteriormente en el lavado de otras prendas; finalmente el agua que no muestra disminución de carga contaminante o no resulta viable para ser reutilizada, se direcciona a la PTAR para ser tratada.

3.3.2 Teñido. El teñido de las prendas ocurre mediante un proceso por lotes, los textiles se añaden a un tanque jet de teñido junto con sales, tintes y productos químicos. La separación de lotes se determina por la tonalidad de las prendas (negros, oscuros, medios, claros y blancos) de esta manera el agua que se descarga se evalúa para determinar su utilidad y se redirecciona a la PTAR.

#### 3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE LA PTAR

3.4.1 Cárcamos y Tanque de subterráneo. Tanque de almacenamiento, el cual se encuentra en el inicio del proceso y se encarga de almacenar el agua que llega de los diferentes procesos de tintorería y lavado, este tanque maneja una capacidad de 30 m<sup>3</sup> con una temperatura del agua que permanece en este entre 60 y 90°C; mientras que los cárcamos solo conducen el agua hacia este tanque.

3.4.2 Filtro box. Este equipo consiste en una filtración en la cual se ingresa agua residual cargada con materia sólida gruesa (mota de tela) y se obtiene agua libre de estos sólidos ya que por su tamaño pueden interferir en el flujo de la corriente, el funcionamiento de las bombas y los tratamientos posteriores. Este funciona por vibración eléctrica, la cual tiene un tamiz de malla 60 que genera retención de sólidos en la rejilla que por vibración son recolectados en canecas, obteniendo 2300 kg de residuos sólidos por día en promedio, los cuales son dispuestos en canecas de 55 galones que se almacenan para ser enviadas a una empresa de tratamiento de residuos sólidos.

3.4.3 Tanque pulmón. Tanque de flujo continuo que se encuentra en el proceso después del tamiz, este se encarga de generar un flujo continuo del tamiz a las torres de enfriamiento permitiendo así tener un mayor control del flujo que se envía a las torres y además generar un enfriamiento al ambiente.

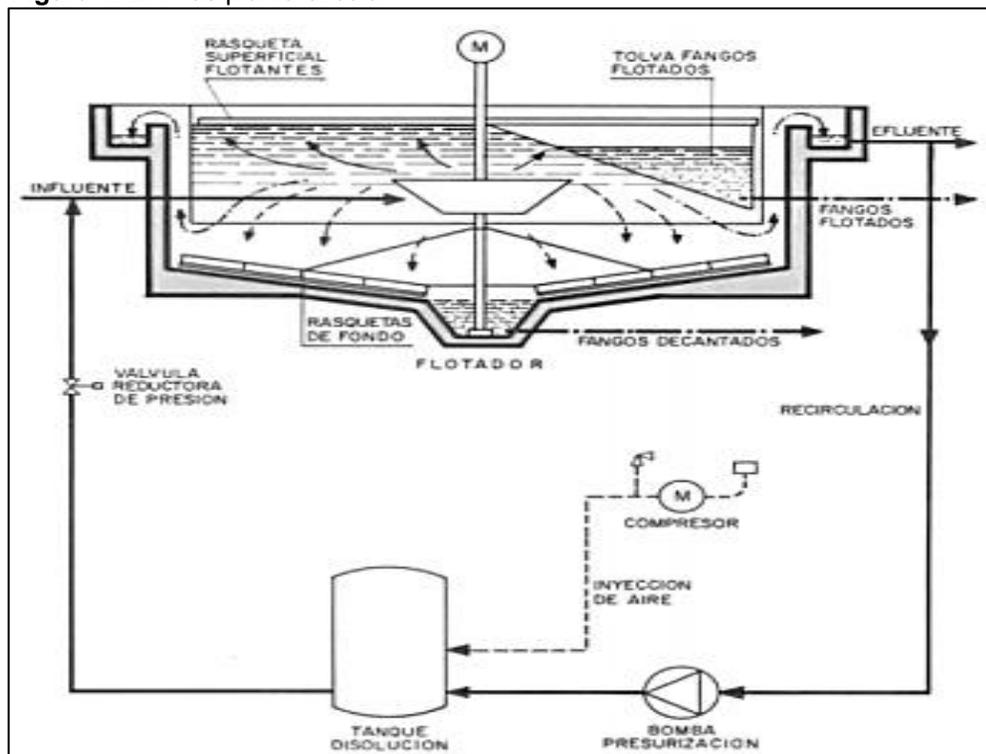
3.4.4 Torres de enfriamiento. Se tienen dos torres de enfriamiento que generan una diferencia de temperatura entre 6 y 10 grados centígrados con el fin de permitir una mayor eficiencia en el proceso primario que ocurre en el DAF.

3.4.5 Ecuador. Tiene como objetivo homogenizar el agua residual, de agitación para hacer una dosificación mediante bombeo al sistema de tratamiento con un caudal constante y una carga regular así mismo, el tanque cuenta con una flauta de homogenización ya que se tiende a generar sedimentos en este proceso.

3.4.6 DAF. El sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) tiene como objetivo retirar materiales no diluidos como sólidos suspendidos, aceites, grasas y partículas floculadas y coaguladas con menor densidad a la del agua, así como la remoción de algo de materia biodegradable, relacionada con el parámetro de DBO. El principio de trabajo de este se basa en un sistema de aireación para la clarificación de efluentes, el cual, a partir de un presurizador, donde como se muestra en la Figura 4, parte del efluente ya tratado se recircula para ser mezclado con microburbujas de aire, las cuales se dosifican en cuatro puntos diferentes, tres ubicados a lo largo del equipo en la parte inferior de este y el cuarto en la corriente principal, justo antes de entrar al DAF promoviendo así la separación de las partículas.<sup>73</sup>

Este proceso tiene la adición de cuatro componentes importantes que complementan el proceso, el primero, un regulador de pH, que favorece las condiciones de trabajo del equipo y los demás, que corresponden al decolorante, el coagulante y el flocluyente. el DAF maneja una capacidad de 30 m<sup>3</sup> y tiene un tiempo de permanencia del efluente de 60 minutos en condiciones óptimas, donde se genera una corriente en contra flujo respecto al barrido que se realiza de los lodos.

**Figura 4.** DAF de planta circular



**Fuente:** Inditex, flotación por aire disuelto, 2013

<sup>73</sup> Ibid, p. 4.

### 3.4.7 Filtros.

3.4.7.1 Filtros de carbón activado. Los filtros con lechos de medios granulares pueden utilizar arenilla, lodo y limo; permiten remover micropartículas y macropartículas (10-1000  $\mu\text{m}$ ) del agua residual,<sup>74</sup> cada filtro de 15  $\text{m}^3$  formado por un lecho de carbón poroso en su interior, se encarga de atrapar y adsorber los contaminantes orgánicos y cloros del agua. La corriente de agua ingresa a presión para generar un tiempo de contacto suficiente entre el medio filtrante, carbón activado, y el agua residual y así este pueda adsorber eficientemente. Cuando se satura el filtro, que en promedio ocurre cada cuatro horas, se realiza un retro lavado que dura aproximadamente dos horas por filtro con agua obtenida del proceso de la misma PTAR, cuando este pierde sus propiedades de adsorción se sustituye por uno nuevo.

3.4.7.2 Filtros de arena. La filtración se da por medio de un lecho de arena antracita, que permite remover sólidos en suspensión, sustancias coloidales y la reducción de bacterias presentes.<sup>75</sup> Cuenta con una capacidad de 15  $\text{m}^3$  cada uno, la corriente de agua entra en el filtro de arena y se distribuye bajo el lecho mientras va fluyendo por medio del lecho saliendo una carga de agua limpia del material que se ha quedado retenido en el lecho de arena.

3.4.8 Espesador. Tiene como función mezclar y nivelar el contenido de lodos y aguas proveniente de los residuos obtenidos a la salida del DAF generando una corriente homogénea para así poder obtener mejores resultados al enviar estos lodos al filtro prensa.

3.4.9 Tornillo prensa. El filtro prensa consiste en el drenaje de la humedad presente en los lodos, y genera una torta con menor peso y volumen, reduciendo el porcentaje de agua por medio de presurización del lodo. Finalmente, los lodos con baja humedad se desechan como residuos sólidos; proceso que está a cargo de una empresa externa, mientras que la corriente de agua removida de este proceso es retroalimentada en el DAF.

## 3.5 DESCRIPCIÓN OPERATIVA DE LA PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales opera 24 horas, siendo 20 efectivas, los 7 días de la semana, teniendo en cuenta que la planta se apaga cuando los niveles de agua para tratamiento son bajos ya que los tanques de almacenamiento

---

<sup>74</sup> CARBOTECNIA. Filtración de lecho profundo. Centro de aprendizaje. México D.F. [En línea] 2020. [Consultado 13 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtros-de-lecho-profundo-medios-granulares/filtros-de-lecho-profundo/>

<sup>75</sup> Compañía Estadual de Tecnología de Saneamiento Básico e de Controle de Poluição das Águas (CETESB). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Manual de capacitación para operadores. Lima, 2002.

retienen el agua, y un domingo cada tres meses, donde se realiza mantenimiento preventivo, además ocasionalmente según el historial, la planta se detiene por problemas de mantenimiento, como daños en bombas, limpieza de la malla del filtro box, retención en el proceso de tintorería, niveles bajos en el tanque de homogenización, falta de insumos químicos, problemas eléctricos y colmatación del DAF.

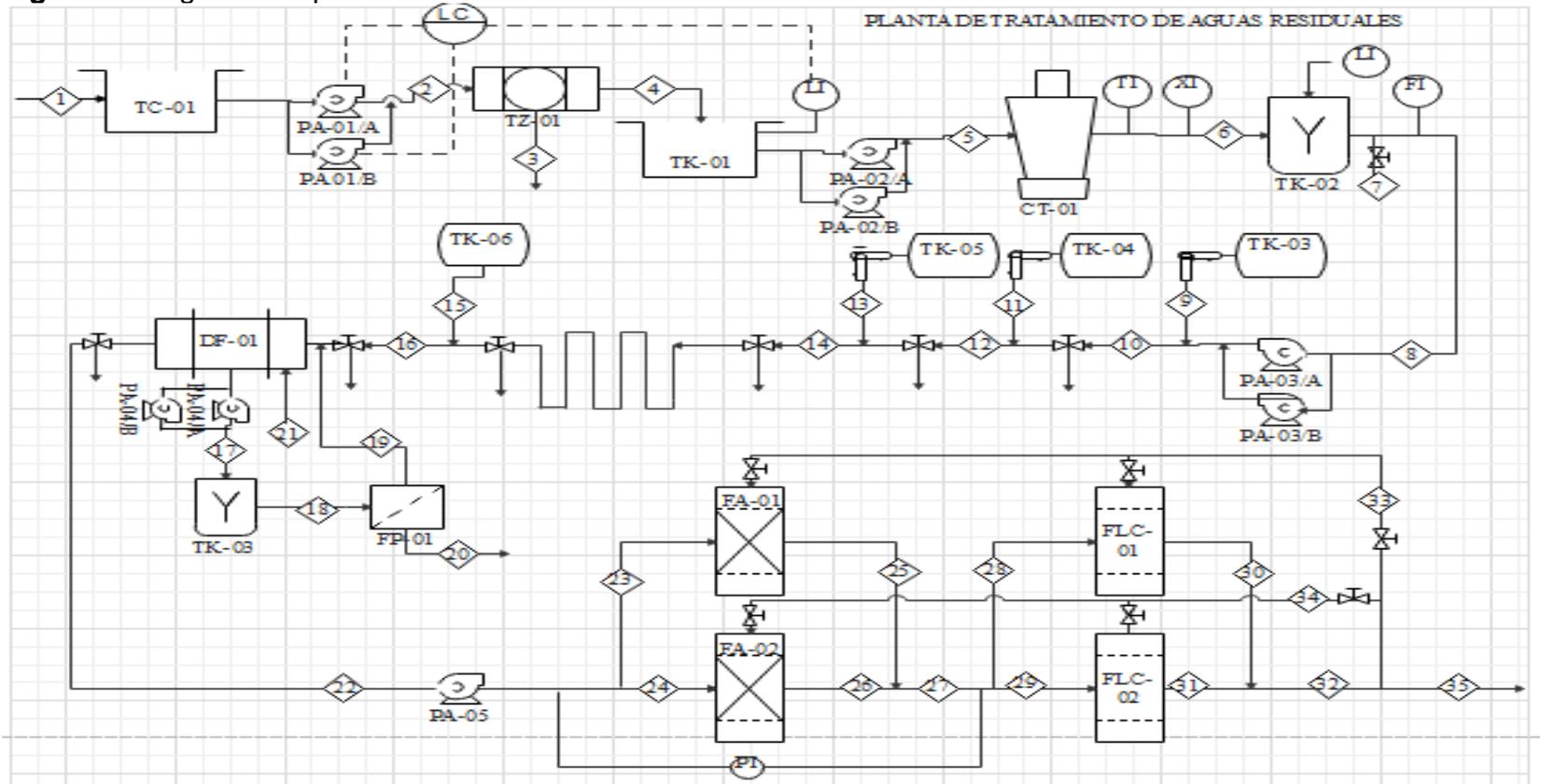
El proceso de mantenimiento de los equipos se maneja de una forma correctiva es decir depende del tiempo de saturación de cada equipo y no se presenta un cronograma de mantenimiento preventivo para cada equipo, por lo que se genera continuos retrasos del proceso.

La caracterización de las muestras se realiza 12 veces al día, desde las 7 de la mañana cada dos horas en tres puntos: corriente de salida del ecualizador, corriente de salida del DAF y vertimiento, dichas caracterizaciones se realizan en el laboratorio propio de la empresa del sector textil, las pruebas son realizadas por personal técnico con conocimiento en técnicas analíticas.

Al proceso entran dos corrientes proveniente de dos zonas diferentes, tintorería y lavado que son unificadas en un tanque subterráneo de almacenamiento, de este tanque se envía por medio de una bomba a un tamiz vibratorio que retira los residuos sólidos (motas, retazos y demás) y el cual genera dos corrientes, una residual que se dispondrá como residuos sólidos, y una segunda corriente principal que continuará el proceso en el tanque pulmón de flujo continuo que envía la corriente a dos torres de enfriamiento generando una disminución de temperatura. Cuando la corriente ya se encuentra entre 30 y 40 grados Celsius es enviada al ecualizador para posteriormente ser bombeada hacia el DAF, donde se añaden cuatro componentes, los tres primeros que corresponden al coagulante, regulador de pH y decolorante, añadidos en el tramo inicial de la tubería con el fin de pasar por un serpentín para aumentar la velocidad del fluido y generar choques, creando así una mayor turbulencia para la interacción del coagulante con el agua; el cuarto componente que corresponde al floculante es añadido en el tramo final de tubería, para así finalmente entrar al DAF. De este equipo se obtienen dos corrientes la primera que contiene los lodos del proceso, los cuales serán enviados a un tanque espesador para posteriormente ser desecados en el tornillo prensa y finalmente se dispondrán en canecas; la segunda corriente, corriente de interés, es enviada a un sistema de filtros compuesto por filtros de arena inicialmente y seguida de filtros de carbón activado que dan fin al proceso, de esta manera se obtiene la corriente de salida, dispuesta en el alcantarillado de la zona según las normas establecidas.

A partir de esta descripción operativa se realiza un diagrama de procesos, no existente en la PTAR, que se grafica por medio del programa EDraw Max, en su versión de prueba de la compañía Wondershare Technology Group Co. Ltd como se evidencia en la Figura 5 acompañada del Cuadro 5, que enuncia los equipos.

Figura 5. Diagrama de procesos de la PTAR



IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES																																				
<b>CORRIENTES (m<sup>3</sup>/día)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
<b>T (°C)</b>	80	80	-	75	75	30-40	30-40	30-40	-	30	-	30	-	30	-	30	-	-	CALC	CALC	7,6	-	142	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	14,2	6	6	130
<b>pH</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	-	7	-	7	-	7	-	7	-	7	-	-	-	7	7	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
<b>IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES</b>	Effluente de la tritoria	Effluente de la tritoria	Sólidos gruesos	Agua de proceso	Agua de proceso	Agua de proceso	Tomamuestra	Agua de proceso	Regulador de pH (CLAREX)	Agua de proceso neutralizada	Decolorante (EXRO 690)	Agua de proceso decolorada	Coagulante (EXRO 616)	Agua de proceso	Floculante (EXRO 663)	Agua de proceso	Lodos de Coagulación	Lodos espesados	Agua para remoción de lodos	Lodos para desecho	Burbujas de aire para DAF	Agua de proceso	Comente de retrilavado	Comente de retrilavado	Ventimiento											

Fuente: elaboración propia en EDraw Max (versión de prueba)

**Cuadro 5.** Listado de equipos del diagrama de proceso de la PTAR

<b>Código</b>	<b>Equipo</b>
TC-01	Tanque subterráneo
PA-01/A	Bomba centrífuga
PA-01/B	Bomba centrífuga auxiliar
TZ-01	Tamiz vibratorio
TK-01	Tanque pulmón
PA-02/A	Bomba centrífuga
PA_02/B	Bomba centrífuga auxiliar
CT-01	Torre de enfriamiento de tiro inducido
TK-02	Tanque de homogeneización
TK-03	Tanque de almacenamiento
TK-04	Tanque de almacenamiento
TK-05	Tanque de almacenamiento
TK-06	Tanque de almacenamiento
DF-01	DAF
TK-03	Espesador
FP-01	Tornillo prensa
FA-01	Filtros de arena
FA-02	
FLC-01	Filtros de carbón activado
FLC-02	

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.6 ANALISIS DE DATOS Y PROCESO

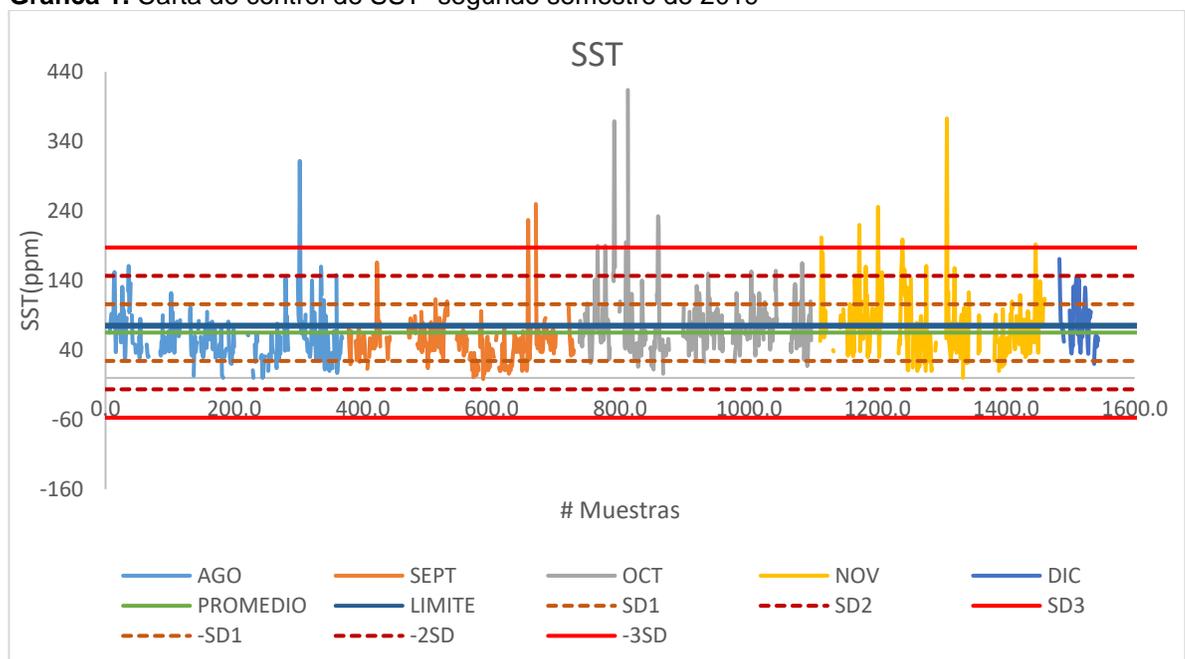
Con base en el registro de los parámetros tomados diariamente en laboratorio de la PTAR en tres puntos del proceso (agua cruda, salida del DAF y vertimiento) durante el segundo semestre de 2019 que comprende desde el primero de agosto de 2019 hasta el 15 de diciembre de 2019 y de los procesos previamente descritos del funcionamiento de la PTAR se realiza un análisis para identificar las oportunidades de mejora existentes.

3.6.1 Cartas de control. Las cartas de Shewhart son una metodología empleada para determinar la variabilidad en la calidad de un producto, o en este caso la variabilidad de los datos de vertimiento. Esta metodología permite diferenciar las causas asignables de las causas no asignables cuando los parámetros se encuentran fuera de lo común, el análisis cronológico de gráficas permite identificar estadísticamente problemas en el desarrollo de un proceso u obtención de un

producto.<sup>76</sup>

Las cartas de control se realizaron con los registros de parámetros del punto de vertimiento. Los espacios presentados en las gráficas de las cartas que impiden la continuidad de las líneas de comportamiento de datos, resultan de la ausencia de algunos datos en las plantillas, los datos ausentes no fueron tomados por razones operativas. Para el desarrollo de las cartas de control se tuvo en cuenta el límite establecido por la resolución 0631 de 2015, el promedio de los datos obtenidos y las desviaciones obtenidas por el método. De las figuras 5 a la 12 se exponen los resultados obtenidos para los parámetros que son medidos en la PTAR.

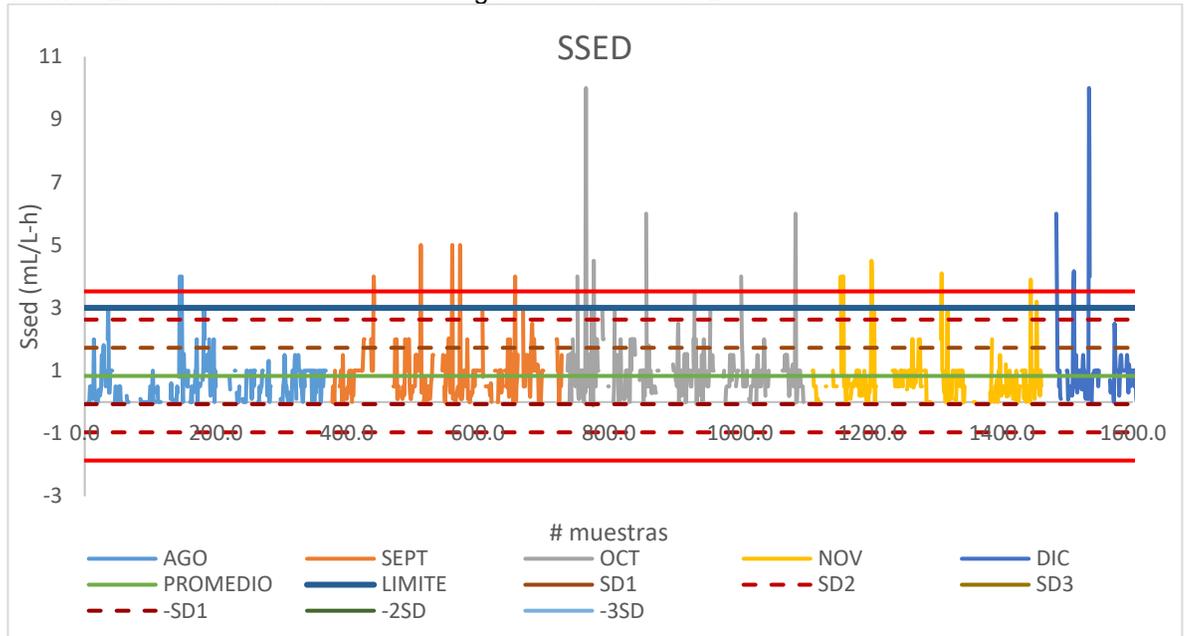
**Gráfica 1.** Carta de control de SST- segundo semestre de 2019



**Fuente:** elaboración propia.

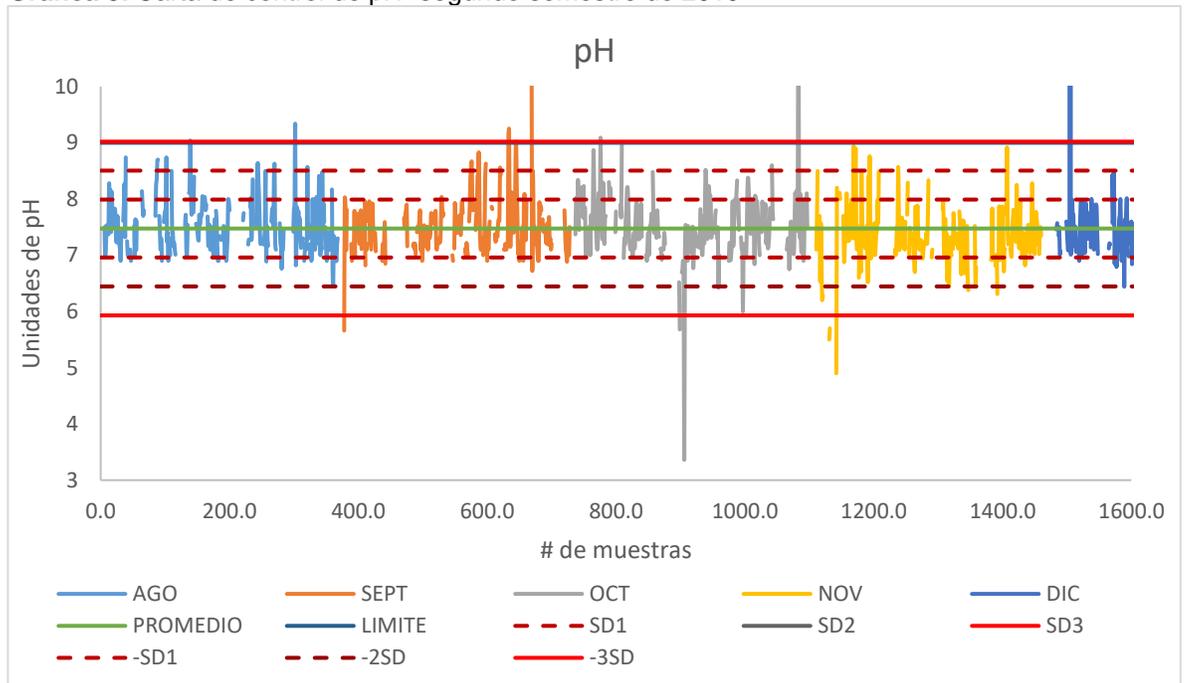
<sup>76</sup> Montoya, Nohora, Correa, Juan Cartas de Control Estadístico de Procesos en el Monitoreo de la Mortalidad Perinatal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2008.

**Gráfica 2.** Carta de control de Ssed- segundo semestre de 2019



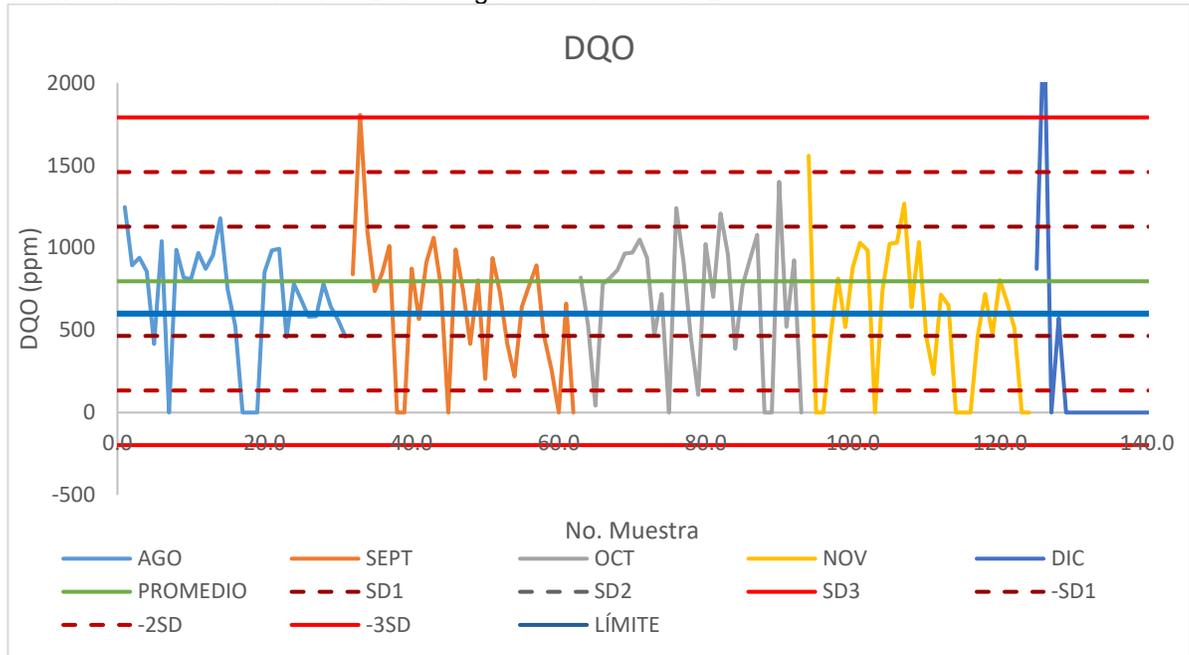
Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 3.** Carta de control de pH- segundo semestre de 2019



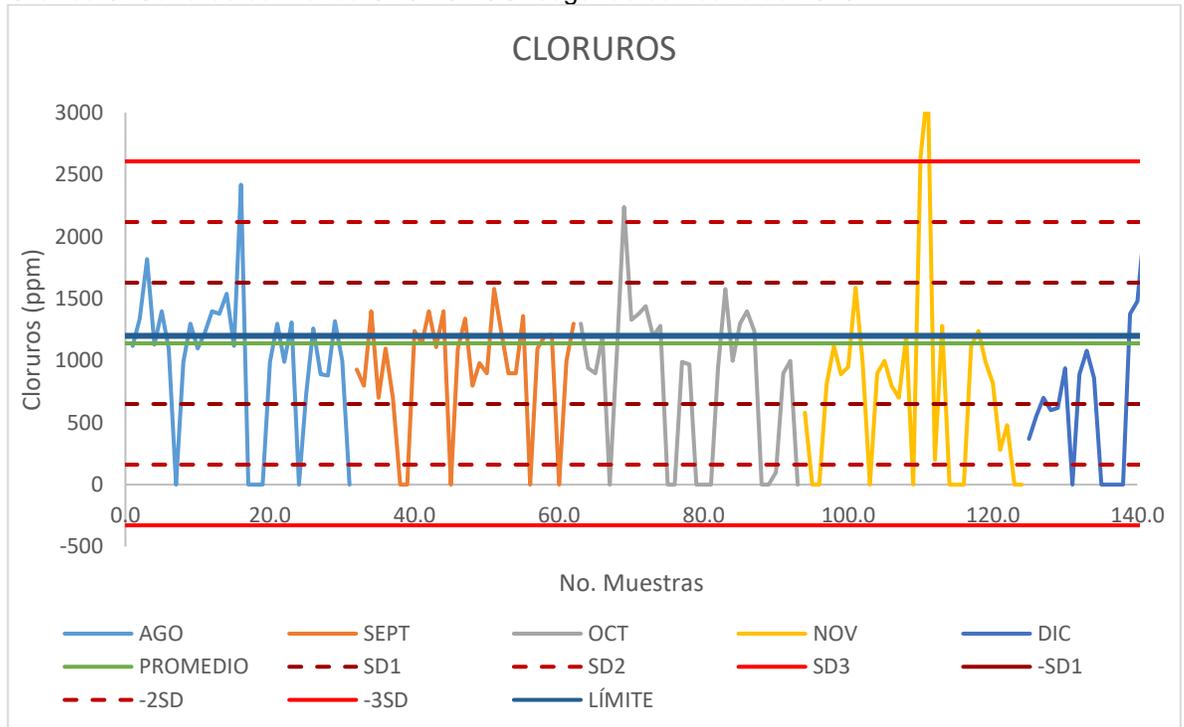
Fuente: elaboración propia. \*El control de pH contiene dos límites establecidos por la resolución 0631 del 2015.

**Gráfica 4.** Carta de control de DQO- segundo semestre de 2019



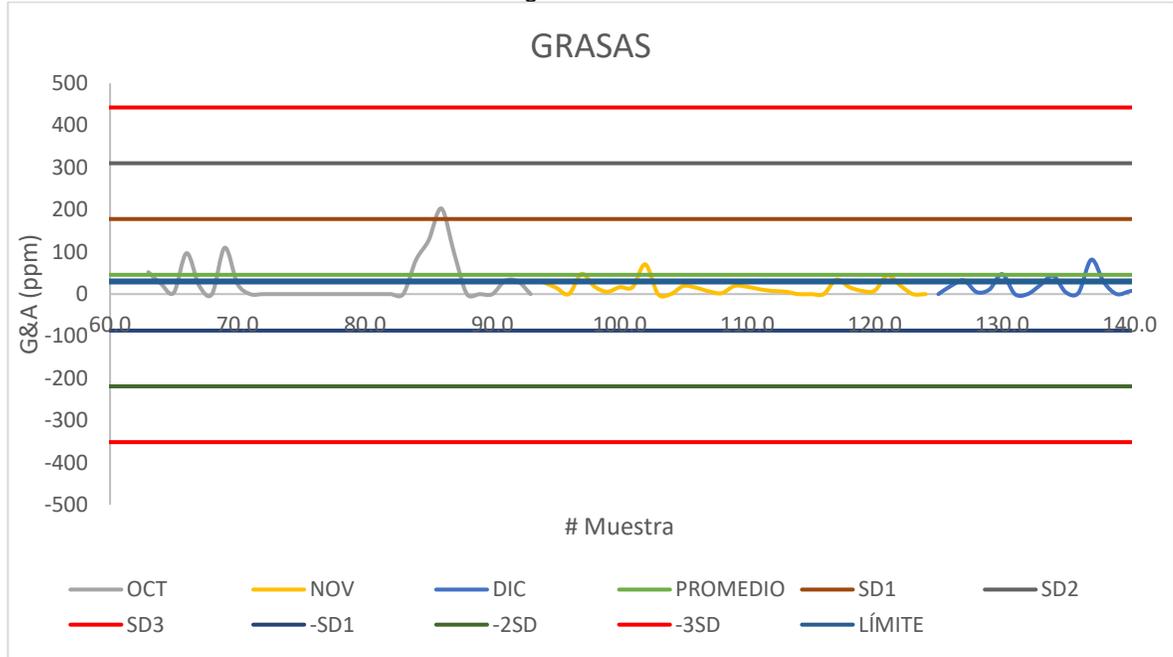
Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 5.** Carta de control de CLORUROS- segundo semestre de 2019



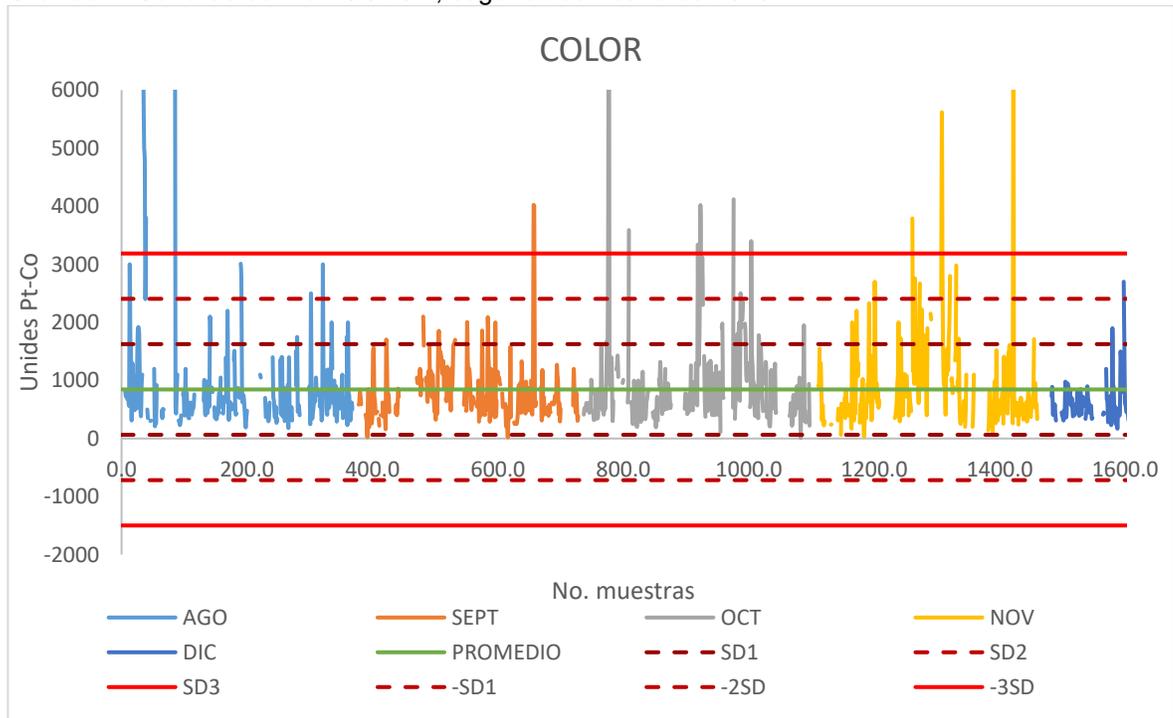
Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 6.** Carta de control de GRASAS- segundo semestre de 2019



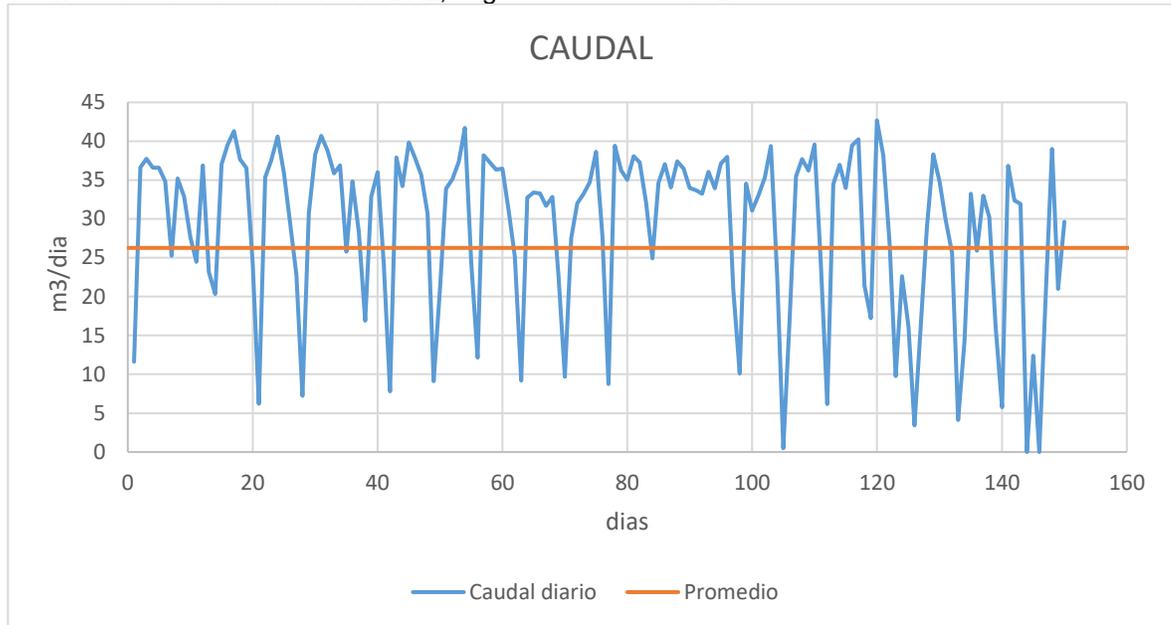
Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 7.** Carta de control- COLOR, segundo semestre de 2019



Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 8.** Carta de control CAUDAL, segundo semestre de 2019



**Fuente:** elaboración propia

3.6.1.1 Análisis de las cartas de control. Las cartas de control permiten determinar la estabilidad y capacidad de un proceso; por este motivo un dato fuera de los límites de control superior e inferior es una señal de falta de control y en este caso una señal de un error operativo por parte de la PTAR. Si los puntos caen dentro de los límites  $3\sigma$  y  $-3\sigma$ , en principio, se considera que el proceso está en estado controlado. Sin embargo, debe señalarse, que el estado controlado en el gráfico se da cuando los puntos están dispersos al azar entre los límites de control.<sup>77</sup>

Mediante un análisis numérico de los datos, se puede concluir que los datos cumplen con los porcentajes idóneos establecidos por la metodología, de esta manera, como se muestra en la Tabla 2 más del 68% de todos los datos obtenidos en cada uno de los parámetros se encuentran dentro del primer tercio ( $2\sigma$ ) de las cartas de control, más del 95% de todos los datos obtenidos en cada uno de los parámetros se encuentran dentro del segundo tercio ( $4\sigma$ ) de las cartas de control; sin embargo 2% de los parámetros de cloruros, color, Ssed y grasas y aceites se encuentran por fuera del tercio ( $6\sigma$ ), aun cuando la metodología indica que lo ideal es que solo el 1% de los datos se encuentren fuera de este rango que determina los límites de control superior e inferior.

En las cartas de control realizadas se presentan las siguientes anomalías:

<sup>77</sup> Mustafa, Ana María, Rodríguez, Norma L. y Chauvet, Susana. Control de calidad: Cartas de control por variables. Catamarca. Argentina. : congreso regional de ciencia y tecnología NOA 2002.

- Puntos por fuera de los límites de control: anomalía que se presenta para el análisis de los parámetros exceptuando grasas y aceites.
- Varios puntos cerca de la línea de control: en la mayoría de los casos los puntos son cercanos al límite de control superior, esta tendencia indica la necesidad de atención en las operaciones de la PTAR.
- Dientes de sierra: se evidencia alta variación entre datos continuos, esto se presenta en el análisis de todos los parámetros evaluados e indica la ausencia de control efectivo.

La Tabla 2 muestra los porcentajes de los datos que se encuentran en cada tercio para los parámetros de vertimiento en el segundo semestre de 2019.

**Tabla 2.** Porcentajes en los cuartiles

<b>Parámetros</b>	<b>2Σ</b>	<b>4Σ</b>	<b>6Σ</b>
SST (ppm)	82%	98%	99%
Ssed (mL/L-h)	93%	97%	98%
DQO (ppm)	83%	98%	99%
G&A (ppm)	100%	100%	98%
Temperatura (°C)	72%	97%	99%
Color (Un Pt-Co)	94%	98%	98%
Cloruros (ppm)	87%	97%	98%
pH (Un)	100%	100%	100%

**Fuente.** elaboración propia

Así mismo se realizó un análisis de datos para determinar el porcentaje de los parámetros que superan los límites de vertimiento establecidos por la norma 0631 del 2015, como se evidencia en las gráficas y se resume en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Datos fuera de norma.

<b>Parámetros</b>	<b>Porcentaje fuera de norma (%)</b>
SST	26,55
Ssed	2,88
DQO	77,04
G&A	27,37
Temperatura	N/A
Color	N/A
Cloruros	41,96
pH	0,89

**Fuente:** elaboración propia

Gracias a las cartas de control se pudo determinar que los parámetros críticos de interés son: sólidos DQO, G&A, SST y cloruros; igualmente se determinó que no existen ciclos en el comportamiento de los parámetros, por el contrario, las mediciones en el vertimiento son dispersas en todos los casos. Algunas problemáticas observadas en el diagnóstico, para ahondar en la investigación, se pueden resumir en, la baja eficiencia de los procesos, el mantenimiento del proceso y la ausencia de instrumentación en algunos puntos, así como el subdimensionamiento de la PTAR.

Por otro lado, se determina el porcentaje de biodegradabilidad de la carga orgánica, con base en datos tomados mensualmente por una empresa de análisis de aguas para el primer semestre del 2019. Obteniéndose una relación DBO/DQO aproximada debido al tamaño de la muestra que toma un rango de valores entre 0,49 a 0,69, lo cual indica que el agua de la PTAR no es altamente biodegradable y por tanto se deben usar tratamientos físico-químicos para lograr un alto porcentaje de remoción de DQO.

3.6.2 Correlación de datos. Se realizó un análisis estadístico con el programa XLSTAT (versión de prueba) de Excel, el cual permitió identificar la correlación existente entre los parámetros de vertimiento que son de interés para el proyecto. Se establecieron dos grupos de correlación de datos debido a la frecuencia de toma de parámetros en la PTAR, ya que los presentados en la Tabla 4 se toman cada dos horas diariamente en el punto de vertimiento, mientras que para los presentados en la Tabla 5, se realiza una toma diaria.

Los coeficientes de relación fueron obtenidos por medio del método de correlación de Spearman, el cual mide la relación monótona entre dos variables continuas u ordinales, es decir la tendencia a que las dos variables se muevan en la misma dirección relativa, mientras que el método de Pearson evalúa la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables continuas.<sup>78</sup> La Tabla 4 y Tabla 5 nos indican un resultado no concluyente sobre la significancia de correlación entre las variables, debido a que el valor p de cada relación es mayor que el nivel de significancia (Anexo A),  $\alpha=0.05$ , que corresponde a un intervalo de confianza para la diferencia del 95%, exceptuando la correlación entre los parámetros color-SST, que presentan una correlación significativa positiva y cercana a cero, lo cual describe un comportamiento monótono directo débilmente relacionado, que a su vez presenta una relación lineal baja determinada por medio del método Pearson (anexo A).

---

<sup>78</sup> Minitab Statistical Software. Soporte de Minitab 18: interpretación de resultados clave para correlación. 2019. Tomado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/perform-the-analysis/select-the-method/>

**Tabla 4.** Correlación de parámetros Ssed-color-SST

<b>Variabes</b>	<b>SST</b>	<b>Color</b>	<b>SSED</b>
SST	<b>1</b>	<b>0,089</b>	0,001
Color	<b>0,089</b>	<b>1</b>	0,055
Ssed	0,001	0,055	<b>1</b>

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 5.** Correlación de parámetros DQO-G&A-cloruros

<b>Variabes</b>	<b>G&amp;A</b>	<b>DQO</b>	<b>Cloruros</b>
G&A	<b>1</b>	0,038	-0,110
DQO	0,038	<b>1</b>	0,149
Cloruros	-0,110	0,149	<b>1</b>

**Fuente:** elaboración propia

3.6.3 Eficiencia de procesos. Para evaluar la eficiencia de los procesos de remoción de parámetros, coagulación-floculación y filtración, se evaluó con base en los porcentajes de remoción de cada uno de los equipos, DAF y filtros de arena-carbón activado, respectivamente a partir de la Ecuación 3.

**Ecuación 3.** Porcentaje de remoción

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{PEE - PSE}{PEE}$$

Donde:

PEE: Parámetro medido en la entrada al equipo

PSE: Parámetro medido en la salida del equipo

Los cálculos de remoción total se encuentran en la Tabla 6, mientras que para cada equipo se registran en la Tabla 7 y Tabla 8 presentadas a continuación.

**Tabla 6.** Remoción total del proceso

Parámetro	Porcentaje remoción (%)	Remoción específica (%)	
		DAF	FILTROS
SST	85,81	DAF	93
		FILTROS	7
Ssed	70,23	DAF	69
		FILTROS	31
DQO	45,62	DAF	83
		FILTROS	18
Color	83,53	DAF	95
		FILTROS	5
G&A	50,89	NA	

Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.** Porcentaje de remoción en DAF

Parámetro	Porcentaje remoción (%)
SST	85,24
Ssed	70,51
DQO	41,59
Color	83,08

Fuente: elaboración propia

**Tabla 8.** Porcentaje de remoción en filtros

Parámetro	Porcentaje remoción (%)
SST	23,46
Ssed	64,53
DQO	14,78
Color	16,12

Fuente: elaboración propia

Estos resultados denotan una eficiencia mejorable para remoción en parámetros como DQO en DAF mientras que se presenta una baja remoción de DQO, SST y

Ssed, para los filtros; razón por la cual, a partir de esta relación encontrada entre los equipos y la baja remoción de algunos parámetros, se busca revisar el funcionamiento de los filtros, con el fin de mejorar la eficiencia de remoción.

3.6.4 Instrumentación y mantenimiento. Durante el desarrollo del diagnóstico, las visitas a la PTAR, y la recolección de información con operarios y encargados se evidenció un aspecto importante en la falta de protocolos de mantenimiento preventivo y registro de este, exponiéndose como una oportunidad de mejora del proceso y de los equipos de la PTAR y a su vez teniendo una incidencia en los parámetros de vertimiento.

3.6.4.1 DAF. En el equipo se evidenció una alta variación en las dosificaciones de coagulante, esto se debe a tres factores importantes, el primero, la ausencia en la medición de turbidez el cual permite cuantificar la dosificación correcta de coagulante y floculante, la segunda se debe a la respuesta retardada a las alteraciones en el sistema debido a que la toma de parámetros para dosificación se hacen a nivel laboratorio y el cambio en la dosificación no es inmediato y la tercera relacionado con la medición de la conductividad, un parámetro que tiene efecto sobre la eficiencia del proceso, ya que puede generar cambios en el pH óptimo de trabajo, así como en la cantidad de coagulante y su tiempo efectivo en el proceso.

3.6.4.2 Filtros. En los filtros no se presenta un análisis por separado de los equipos, el cual no permite conocer de manera específica las fallas operacionales que se están presentando individualmente junto con esto, hay una ausencia en la medición de la diferencia de presión generada en cada uno de los filtros, parámetro necesario para conocer el grado de colmatación del equipo y el tiempo adecuado en el que se debe retro lavar el filtro. Finalmente, no se evidencia el seguimiento del estado de los mismos ni un sistema de actividades de mantenimiento preventivo relacionado con el estado del equipo, en cuanto a repuestos y recubrimientos y el estado del material filtrante, evaluándose la estratificación correcta de la arena y la necesidad de regeneración para los filtros de arena y carbón activado respectivamente. Con la ausencia de estos controles, especialmente se ven afectados los parámetros de DQO y color en el proceso de adsorción por filtros de arena y carbono debido a sus bajas remociones presentadas, que comparadas con revisión bibliográfica de procesos de adsorción con carbón activado en aguas textiles se presentan porcentajes de remoción mayores en SST, DQO y color.<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> FLORES, Nadia y YANEZ, Nelson. Depuración de material refractario de aguas residuales de una industria textil aplicando adsorción con carbón activado, a escala experimental. Tesis de grado para el título de ingeniero químico. Ecuador: Universidad de Guayaquil. Facultad de ingeniería química. 2016. p 65.

3.6.4.3 Torres de enfriamiento. Para las torres de enfriamiento, no se evalúa actualmente su eficiencia, ni su correcto funcionamiento ya que no hay presencia de actividades de mantenimiento ni se tiene un control de la disminución de temperatura que está genera.

3.6.4.4 Tornillo prensa. En la disposición de los lodos, el cual se realiza por medio de una empresa externa hay un costo elevado, el cual se debe a la remoción de humedad que presentan el tornillo prensa, el cual comparado con otras tecnologías es menos eficiente.<sup>80</sup>

3.6.4.5 Laboratorio. Aunque el mantenimiento correctivo de los equipos de laboratorio se realiza por una empresa externa especializada, no se evidencia el seguimiento de un mantenimiento preventivo efectivo, lo cual ha generado inconvenientes frecuentes en la medición de los parámetros por un tiempo prolongado cuando uno de los equipos presenta problemas, de igual manera en temas de seguridad no hay presencia de una ducha que permita dar un primer auxilio en temas de accidentes con químicos en los operarios.

Es por esto que el control de variables a partir de instrumentación, así como un seguimiento y registro de actividades de mantenimiento preventivo efectivo, es un punto clave, ya que su implementación permite medir, registrar y controlar de manera efectiva cada uno de los procesos de la PTAR, previniendo imprevistos y mejorando la respuesta a alteraciones.

3.6.5 Subdimensión de la planta. Se estima que la planta de tratamiento, opera con una capacidad inapropiada para su diseño. A partir de un análisis de caudal realizado durante los meses de julio del 2019 a diciembre de 2019, se determinaron 3 rangos diferentes de operación de la PTAR con base en el caudal del agua residual entrante. Se estableció caudal de Operación baja-media y alta equivalente a un rango de 11-19 m<sup>3</sup>/h, 20-27 m<sup>3</sup>/h y de 28-50 m<sup>3</sup>/h, respectivamente, teniendo en cuenta que un caudal bajo representa menos del 50% de capacidad de tratamiento por hora, un caudal medio representa del 50% al 90%, siendo este ultimo la capacidad nominal, la cual se encuentra entre un 80 y 90% dependiendo la especificación y características del equipo y superar su valor afecta de manera negativa la eficiencia de los procesos,<sup>81</sup> por ende la operación alta supera la capacidad recomendada de los equipos, hasta sobrepasar incluso el volumen de los mismos generando variaciones en las condiciones de operación correctas.

---

<sup>80</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquin; JÁCOME BURGOS, Alfredo & URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, tecnologías de deshidratación de fangos. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 10. [consultado 2, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2Xj03va>

<sup>81</sup> WORKCLEAN. Catálogo de productos y servicios nafa. National Air Filtration Association. Purificación para sistemas de aire acondicionado y ventilación. [en línea]. Disponible en [https://www.trspartes.com/wp-content/uploads/2018/02/Catalogo\\_Filtros\\_Workclean.pdf](https://www.trspartes.com/wp-content/uploads/2018/02/Catalogo_Filtros_Workclean.pdf)

Se determinó la moda para el valor de caudal de los datos recolectados, que definió que el caudal más común en el segundo semestre del 2019 es de 30 m<sup>3</sup>/h, caudal que se encuentra dentro de la operación de caudal alta y que sobrepasa un 5,18% de la capacidad máxima recomendada, sin embargo, no genera un cambio significativo en las condiciones de operación al no superar el volumen total de los equipos. Así mismo, se obtuvo el porcentaje de datos para cada rango de operación como se muestra en la Tabla 9, en donde se evidencia que la operación de caudal más frecuente de la PTAR es alto caudal con un 76% de la operación, lo cual permite inferir que normalmente se está trabajando con un caudal encima de lo diseñado para la PTAR, demostrando el subdimensionamiento de esta.

**Tabla 9.** Porcentaje de datos para los rangos de caudal

Comportamiento	Porcentaje de cantidad de datos (%)
Bajo caudal	3,04
Medio caudal	20,18
Alto caudal	76,79

Fuente: elaboración propia

**Tabla 10.** Porcentaje de incumplimiento de parámetros para los rangos de caudal

Caudal puntual (m <sup>3</sup> /h)	SST (%)	SSED (%)	DQO (%)	G&A (%)	Cloruros (%)
11-19	5,00	2,50	30	10,00	25,00
20-27	17,03	2,81	50	18,49	28,99
28-50	21,94	2,81	63	21,39	40,62

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, la Tabla 10 permite evidenciar un incumplimiento de los parámetros de interés, expresado en porcentajes, para cada uno de los rangos de operación, permitiendo definir que, en los parámetros de SST, Ssed, DQO, G&A y cloruros se presenta una relación directa entre el aumento de caudal y el aumento del porcentaje de incumplimiento, que se debe a que, a mayor caudal, se presenta una menor eficiencia del proceso como se evidencia en la Tabla 13; para los parámetros de DQO, G&A y cloruros se omite el análisis debido a la ausencia de caudales, sin embargo se recoge el porcentaje de incumplimiento en la Tabla 10 por medio de un promedio de caudales, que permite tener una idea del comportamiento de estos parámetros. Este análisis justifica el efecto que tiene sobrecargar el caudal del proceso para el que fue diseñado inicialmente (30 m<sup>3</sup>/h), ya que se presenta reducciones de hasta el 6,6% en la remoción final del proceso y un aumento de hasta el 33% en incumplimiento de parámetros diferenciando los rangos máximos de caudales altos y bajos.

**Tabla 11.** Análisis del DAF, Porcentaje de remoción para los rangos de caudal

Caudal puntual (m <sup>3</sup> /h)	SST (%)	SSED (%)	Color (%)
11-19	92,10	71,55	89,94
20-27	87,26	72,54	84,46
28-50	84,83	69,74	82,49

Fuente: elaboración propia

**Tabla 12.** Análisis de filtros, porcentaje de remoción para los rangos de caudal

Caudal puntual (m <sup>3</sup> /h)	SST (%)	SSED (%)	Color (%)
11-19	5,29	59,50	8,91
20-27	24,30	70,31	17,43
28-50	23,78	62,99	16,06

Fuente: elaboración propia

**Tabla 13.** Porcentaje de remoción del proceso para rangos de caudal

Caudal puntual (m <sup>3</sup> /h)	SST (%)	SSED (%)	Color (%)
11-19	89,68	73,72	89,71
20-27	87,48	74,57	84,63
28-50	85,59	68,87	83,12

Fuente: elaboración propia

Así mismo, se realizó un análisis para demostrar la disminución de la eficiencia en los equipos principales de remoción de estos parámetros. Para el DAF que es el encargado de la remoción principalmente de SST, Ssed y color se reflejó una disminución esperada de hasta el 7,62% de remoción de parámetros como se denota en la Tabla 11, sustentado en que a mayor caudal menor tiempo de residencia de floculación se presenta, reduciendo hasta el 50% de la hora estimada para el proceso. En la Tabla 12, se evidencia que los filtros no mostraron un comportamiento en tanto que, para el menor caudal se obtuvo menor porcentaje de remoción debido a la operación intermitente de estos equipos por problemas frecuentes en el mantenimiento, por la colmatación de los filtros realizados frecuentemente cuando se presentan bajos caudales, y a su vez por la baja cantidad de datos pues cuando se presentan bajos caudales no se suele tomar análisis de filtros; sin embargo se observa la disminución del porcentaje de remoción con el aumento de un caudal medio a uno alto, como se esperaría que sea su comportamiento, puesto que los filtros tienen un volumen de caudal de 30m<sup>3</sup>/h como máximo.

## 4. ALTERNATIVAS DE MEJORA

### 4.1 PUNTOS DE MUESTREO

El proceso de tratamiento tiene puntos de utilidad específicos donde ocurren los principales procesos de remoción de contaminantes y disminución de parámetros, los cuales son de interés para el presente trabajo, es por esto que se proponen cuatro principales puntos de muestreo que permiten analizar las variaciones de parámetros. El primer punto de muestreo seleccionado es la salida del tanque subterráneo, ya que permite obtener los parámetros iniciales para el análisis, así como determinar la eficiencia de las torres de enfriamiento y observar los cambios en los parámetros causados por el tanque de homogenización; como segundo y tercer punto de muestreo se determinaron las corrientes de entrada y salida del DAF, puesto que es el primer proceso primario que permite tener variación en parámetros como sólidos totales suspendidos, sólidos totales sedimentable, DQO, pH, color, entre otros y ver en qué porcentaje este tratamiento reduce los diferentes parámetros. Por último, se seleccionó el punto de muestreo de vertimiento, el cual indica puntualmente el efecto en la reducción de los parámetros en el tratamiento secundario de filtros de carbón y arena; a su vez permite definir con que valores se está disponiendo el agua y en qué porcentaje cumple con la norma de vertimientos.

El muestreo se realizó según el protocolo del instructivo para la toma de muestras de aguas residuales establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM,<sup>82</sup> su procedimiento y resultados se encuentran en el Anexo G, Sin embargo, para el análisis de los parámetros solo se tienen en cuenta los datos de los tres puntos registrados por la PTAR actualmente.

### 4.2 ALTERNATIVAS DE AGENTES COAGULANTES

Basado en los porcentajes de remoción presentados como resultado de los análisis realizados con los datos recopilados en el segundo semestre de 2019, se ve la necesidad de evaluar un coagulante diferente con el fin de llegar a obtener mayores porcentajes de remoción de parámetros, especialmente para SST, color y DQO como se evidencia en revisiones bibliográficas. Así mismo se busca integrar el decolorante y el coagulante en una sola aplicación de manera que esto se vea reflejado en una reducción de costos.

#### 4.2.1 Revisión bibliográfica.

---

<sup>82</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. [en línea]. Subdirección de hidrología-grupo laboratorio de calidad ambiental, Colombia: 10 de septiembre de 2017. [Consultado: 3, febrero, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/32osfAb>

4.2.1.1 Coagulantes en la industria. Según SALEM, cuando las fibras celulósicas son inmersas en el agua, adquieren un potencial negativo, la fibra y el colorante tienen la misma polaridad aniónica.<sup>83</sup> Por este motivo el proceso de coagulación-floculación requiere del uso de coagulantes catiónicos, que desestabilicen las cargas de los coloides existentes en el agua residual, por otro lado, los coagulantes que se utilizan con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas residuales son sales de hierro Fe (III) y aluminio Al (III) inorgánicas,<sup>84</sup> el Cuadro 6 muestra los coagulantes catiónicos más utilizados en la industria textil.

**Cuadro 6.** Coagulantes químicos de la industria textil

SALES METÁLICAS HIDROLIZADAS	SALES METÁLICAS PRE-POLIMERIZADAS	POLÍMEROS SINTÉTICOS CATIONICOS
Cloruro férrico	Policloruro de aluminio	Poliamina
Sulfato férrico	Policloruro férrico	Poli etilamina
Cloruro de magnesio	Sulfato poli férrico	Poli-DADMAC
Alumbre	Policloruro de Al-Fe	Polialquileno
	Poli sulfato de aluminio	Aminoetil poliacrilamida

**Fuente:** SUÁREZ, Joaquín; JÁCOME, Alfredo y URES, Pablo. Fichas Técnicas De Etapas De Proceso De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales De La Industria Textil. Universidad de Coruña, España: INDITEX, 2014. p. 14.

Otra aplicación son las sales metálicas pre-polimerizadas como policloruro de aluminio (PAC), clorhidrato de aluminio (ACH) y poli sulfato de aluminio (PAS), ya que presentan mejor desempeño frente a los coagulantes convencionales,<sup>85</sup> estos coagulantes pueden interactuar de manera efectiva para remover partículas en suspensión y materia orgánica, además que los coagulantes convencionales requieren alta dosificación y pueden generar turbidez en el agua debido al tamaño de los flóculos generados,<sup>86</sup> sin embargo, son económicos y en algunos casos disminuyen el pH del agua al ser sales ácidas, lo que resulta conveniente para el efluente de la tintorería que tiene un pH de 10 en su estado crudo.

<sup>83</sup> SALEM, Vidal. Tingimento têxtil. Sao pablo, Brasil: Blucher, 2010. p. 176.

<sup>84</sup> AGUILAR, et al. Tratamiento físico químico de aguas residuales coagulación-floculación. Murcia. Universidad de Murcia, servicio de publicaciones, 2002. p. 46.

<sup>85</sup> COGOLLO, Juan. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. [en línea]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2010. p. 20. [Consultado 1, mayo, 2020]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

<sup>86</sup> SINHA, Shahnawaz, et al. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. [en línea]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2004. [Consultado 1, mayo, 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15504470/>

En el Cuadro 7 se establecen algunas características de importancia en el presente estudio, para los coagulantes preseleccionados.

**Cuadro 7.** Características de coagulantes

Coagulante	Dosificación	Tipo de tinte utilizado	Rango de pH	Porcentaje remoción de color	Porcentaje remoción de DQO
Cloruro férrico	Dosificación alta (400 ppm)	Reactivo y disperso	3,5 – 7	71	40%
Sulfato férrico	Dosificación media (200 ppm)	Reactivo	7-9	90	60%
Policloruro de aluminio	Dosificación muy baja (10 ppm)	Reactivo, ácido y directo	3 a 12	75-99.9	65%
Sulfato poli férrico	Dosificación media (200 ppm)	No data	6 a 9	87-91	56-64

**Fuente:** elaboración propia, con base en SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Flotación por aire disuelto. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 15. [3, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2WeoKs8>; PEREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante - sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación- floculación de agua potable en la empresa EAF SAS esp. [en línea]. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017. p. 50. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBt>; GOLOB, Vera, et al. Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents. [en línea]. Maribor, Slovenia: University of Maribor. 2000. p 10. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBv> y SOLANKI, Meena; NATH, Shakti y SHUKLA, Kanchan. Treatment of Real Textile Wastewater Using Coagulation Technology. Bhopal, India: Maulana Azad National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering. 2013. p. 212.

Algunas ventajas y desventajas respecto a los coagulantes son:

- Cloruro férrico: Este coagulante es de bajo costo, ayuda en la remoción de sustancias orgánicas y microorganismos y es eficiente sin ayudante de floculación, sin embargo; puede presentar problemas de coloración en las aguas y es corrosivo para su manejo y almacenamiento.
- Sulfato férrico: Forma un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que las sales de aluminio, su uso es de gran popularidad, sin embargo, algunos estudios afirman que su uso está relacionado con la aparición de enfermedades

neurodegenerativas.<sup>87</sup>

- Cloruro de magnesio: No requiere ajuste de pH, ya que trabaja en un amplio rango, en el que se encuentra el agua cruda de la PTAR, sin embargo, su uso puede generar elevada cantidad de lodos.
- Alumbre: Baja remoción con respecto a otros coagulantes
- Policloruro de aluminio: Eliminación de color a bajas temperaturas y buena remoción sin embargo puede llegar a ser más costoso que los otros coagulantes.
- Sulfato poli férrico: Forma flóculos grandes y de rápida sedimentación, tiene buen efecto en la decoloración capturando microorganismos y reduciendo DBO, DQO y metales pesados, eficiente para aguas crudas con alta turbidez y bajos costos de tratamiento. Sin embargo, es corrosivo, puede presentar problemas de coloración en las aguas y requiere acondicionadores de pH.<sup>88</sup>
- Poli sulfato de aluminio: Forma flóculos grandes, rápidamente, su precio es similar al del sulfato de aluminio, opera en amplios rangos de pH, sin embargo, incrementa la alcalinidad del agua a tratar<sup>89</sup> y no existen fuentes suficientes de este coagulante en aplicaciones textiles.

4.2.1.2 Coagulante actual. El coagulante actualmente usado por la empresa del sector textil corresponde al EXRO 616, un coagulante líquido, de color amarillo, soluble en agua y catiónico, utilizado como coadyuvante en el tratamiento de aguas potables e industriales cuyos componentes están aprobados para el uso en aguas potables. Es especialmente efectivo en clarificación de aguas de fluctuante turbidez y alta coloración, trabaja sobre un rango de pH bastante amplio y forma lodos compactos y biodegradables.<sup>90</sup>

4.2.2 Selección de coagulantes. Varios autores han sugerido que los parámetros más importantes para optimizar la coagulación son el pH y la concentración de iones metálicos aplicados. Para realizar la comparación se selecciona un coagulante que puede ser de interés para futuras experimentaciones, comparado con el

---

<sup>87</sup> BECARIA, et al. Aluminum and copper in drinking water enhance inflammatory or oxidative events specifically in the brain. [en línea]. Journal of Neuroimmunology, 2006. p. 26. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2Oyqkka>.

<sup>88</sup> PEREZ, Jessica. Op. Cit. p 25

<sup>89</sup> HAASE, Dieter. Method for producing aqueous solutions of basic poly aluminum sulphate. [en línea]. European patent application, No. 366.388, 23 de octubre de 1989 [ Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/3fDL7Pv>

<sup>90</sup> EXRO, Fichas de seguridad de EXRO 616 para clarificación. Colombia, enero de 2018.

actualmente utilizado en la PTAR, EXRO 616.

4.2.2.1 Selección de criterios. Para la selección de los pesos de los criterios de la matriz, se realiza una revisión bibliografía previa de matrices de selección de coagulantes para tratamientos en aguas residuales del sector textil, donde se evidencia que los criterios más importantes están enfocados primordialmente en los porcentajes de remoción, específicamente para sólidos suspendidos y color, en un segundo plano se encuentran los criterios de versatilidad, asociados a buenas remociones a amplios rangos de pH, bajas dosificaciones, entre otros, y por último los criterios relacionados con los intereses propios de la empresa del sector textil, como costo, riesgo por manipulación, baja toxicidad al ambiente y la producción de lodos.<sup>91</sup>

A partir de la revisión, se realizó un consenso con el director de la PTAR para definir los criterios de interés para la selección del coagulante y así mismo el factor de ponderación de estos. El resultado de este proceso se evidencia en el Cuadro 9, mientras que el Cuadro 8 especifica los puntajes de evaluación asignados para la determinación del coagulante óptimo con base en bibliografía presente en el mismo.

4.2.2.2 Matriz de selección. Con base en la información presentada en el Cuadro 7, las ventajas y desventajas mencionadas y las características del agua cruda de la empresa del sector textil, se realizó una matriz de selección que permitió elegir una alternativa de coagulantes óptimos expuesta en el **Error! Reference source not found.**, donde se tienen en cuenta algunos factores como la turbidez del agua causada por partículas de materias inorgánicas, el color causado por la presencia de colorante hidrolizado generado en la reacción de tintura, el pH como función del tipo de coagulante a usar, la naturaleza del agua a tratar y la cantidad de lodo producido.

La selección de los coagulantes y los puntajes que se tienen en cuenta en la matriz, se realizó bajo la consideración de los coagulantes comúnmente utilizados en la industria textil según fuentes bibliográficas; en el caso de los puntajes asignados al criterio de buena remoción de sólidos, se le asigna un cumplimiento total a los coagulantes pre-polimerizados y un cumplimiento parcial a los coagulantes convencionales, el resto de los criterios se calificaron según información disponible en fichas técnicas y fuentes de información.

---

<sup>91</sup> PEREZ, Jessica. Op. Cit. p 45-79

**Cuadro 8.** Puntaje de evaluación

Puntaje	Comportamiento
1	No cumple
3	Cumple parcialmente
5	Cumple totalmente

**Fuente:** elaboración propia, con base en TRIANA, Edwin & BRICEÑO, Carlos. Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, se dispondrá en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. [en línea] Trabajo de grado para obtención del título de ingeniero civil. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2017. p. 13. [Consultado 3, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/30kk0UI>

**Cuadro 9.** Factor de ponderación

Característica	Factor de ponderación (%)
Buena remoción de DQO	9,8
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	12,2
Bajo costo económico	9,8
Bajo riesgo de manipulación	12,2
Alta biodegradabilidad de lodos	12,2
Alta remoción de color (colorantes reactivos)	9,8
Baja toxicidad al medio ambiente	12,2
Baja dosificación	9,8
Buena remoción de sólidos	12,2

**Fuente:** elaboración propia

**Cuadro 10.** Selección de coagulantes

Característica/ Coagulante	Cloruro férrico	Sulfato férrico	Policloruro de aluminio	Sulfato poli férrico
Buena remoción de DQO	0,29	0,49	0,49	0,49
Funcionamiento estable en un amplio rango de pH	0,61	0,37	0,61	0,61
Bajo costo económico	0,49	0,49	0,29	0,49

Bajo riesgo por manipulación	0,12	0,12	0,37	0,37
------------------------------	------	------	------	------

**Cuadro 10.** (Continuación)

Característica/ Coagulante	Cloruro férrico	Sulfato férrico	Policloruro de aluminio	Sulfato poli férrico
Biodegradabilidad de lodos	0,12	0,12	0,12	0,12
Alta remoción de color (colorantes reactivos)	0,29	0,29	0,49	0,29
Baja toxicidad al medio ambiente	0,12	0,12	0,37	0,37
Baja dosificación	0,09	0,29	0,49	0,29
Buena remoción de sólidos	0,37	0,37	0,61	0,61
<b>TOTAL</b>	<b>2,52</b>	<b>2,67</b>	<b>3,83</b>	<b>3,63</b>

**Fuente.** elaboración propia, con base en SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Flotación por aire disuelto. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 15. [3, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2WeoKs8>; PEREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante - sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación- floculación de agua potable en la empresa EAF SAS esp. [en línea]. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017. p. 50. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBt>; GOLOB, Vera, et al. Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents. [en línea]. Maribor, Slovenia: University of Maribor. 2000. p 10. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBv> y SOLANKI, Meena; NATH, Shakti y SHUKLA, Kanchan. Treatment of Real Textile Wastewater Using Coagulation Technology. Bhopal, India: Maulana Azad National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering. 2013. p. 212.

La matriz de selección, muestra el peso ponderado total para cada uno de los coagulantes estudiados, de esta manera, el coagulante seleccionado para ser evaluado experimentalmente en el agua residual de la PTAR y comparado con los porcentajes de remoción del actualmente utilizado, EXRO 616, es policloruro de aluminio debido a que presenta una eficiencia superior a la de una sal simple, buena sedimentación de flóculos, baja sensibilidad a temperatura y menor concentración del ion metálico residual<sup>92</sup> que lo hacen económico.

En el Cuadro 11 se realiza una comparación de costos entre el coagulante seleccionado y el actualmente utilizado en la PTAR junto con su decolorante, del cual se concluyó que la reducción de costos por mes al implementarse el uso del PAC, es de \$247.066/mes, añadiendo a esto un valor de \$808.321/ mes correspondiente al costo mensual del decolorante utilizado, EXRO 690, obteniendo un valor final total de \$ 1'055.387, que representa la reducción de costos por mes

<sup>92</sup> AGUILAR, Op. cit. p 46.

que se tendría al implementar el coagulante propuesto. Es importante aclarar que el bajo costo asociado al policloruro de aluminio se debe a que su dosificación tiene bases teóricas y no presenta una experimentación para el agua de la PTAR de la empresa del sector textil.

**Cuadro 11.** Costo de coagulante alternativo

<b>Criterios</b>	<b>Decolorante EXRO 690</b>	<b>EXRO 616</b>	<b>Policloruro de aluminio</b>
Precio por kilogramo 2020 (pesos COP)	\$ 6970	\$1367	\$1440***
Dosificación (ppm)	90-306*	600-1200*	10-40**
Cantidad utilizada por mes (Kg)	116	187	6
Precio mensual (pesos COP)	\$ 808.321	\$255.586	\$8.520

**Fuente:** elaboración propia, con base en ALIBAB GROUP. [sitio web]. Colombia: Alibaba.com. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <https://offer.alibaba.com/cps/jpicif1g?bm=cps&src=saf&tp1=5d8c7d436887d&tp2=5f32e2d24cbc5a00010f1661>.)\*Dosificación experimental de la PTAR. \*\*Las dosificaciones mencionadas para el policloruro de aluminio son basadas en fuentes bibliográficas- Cuadro 7. Características de coagulantes, puesto que la dosificación debe definirse con base en experimentos realizados, \*\*\* El precio por kilogramo del policloruro de aluminio fue tomado de

#### 4.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO COMPLEMENTARIO

4.3.1 Revisión bibliográfica. Como resultado de los análisis numéricos realizados con los datos recopilados en el segundo semestre de 2019, se evidenció la necesidad de realizar un proceso adicional para perfilar y remover contaminantes de interés como DQO y DBO; a partir de este enfoque se busca revisar que otros parámetros podrían verse afectados de manera positiva para finalmente cumplir con el objetivo deseado.

Teniendo en cuenta la revisión, se examinan dos de los procesos de remoción más comunes para remoción de DQO Y DBO, trabajados en la industria textil (Ozonización y Fenton) y una alternativa diferente (adsorbentes no convencionales). En el Cuadro 12 se establecen las ventajas y desventajas de estos métodos y además en la Tabla 14 se recopilan, según bibliografía, los porcentajes de remoción de algunos parámetros para los tratamientos propuestos.

**Cuadro 12.** Ventajas-desventajas procesos

Parámetro	Ventajas	Desventajas
Adsorbentes no convencionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin consumo de energía.</li> <li>• Ausencia de elementos electromecánicos</li> <li>• Fácil adaptación y uso</li> <li>• Alta disponibilidad-bajo costo</li> <li>• Mantenimiento adaptable a variaciones de carga.</li> <li>• Fácil disposición final y alta degradabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendimiento menor que en los sistemas convencionales.</li> <li>• Mayor superficie que en los sistemas convencionales.</li> <li>• Gastos en la compra de absorbentes por necesidad de reposición, debido a las operaciones de limpieza</li> <li>• Aplicaciones no avanzadas.</li> </ul>
Ozonización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materia prima (aire u O<sub>2</sub>) asequible.</li> <li>• Posee un poder de oxidación elevado y requiere un corto tiempo de reacción</li> <li>• Oxida el hierro y el manganeso o sulfuros.</li> <li>• Destruye y elimina algas y bacterias.</li> <li>• Reacciona y elimina la materia orgánica siendo posible su total mineralización.</li> <li>• Requiere poco espacio.</li> <li>• Elimina olores desagradables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es tóxico y costoso</li> <li>• La instalación puede ser compleja. se requiere la instalación de equipos de destrucción de ozono sobrante</li> <li>• Puede producir aldehídos, cetonas y bromatos indeseados</li> <li>• Requiere de equipos de mezclado especiales por su baja solubilidad en agua</li> <li>• No oxidará algunos compuestos orgánicos refractarios (oxidación de forma demasiado lenta no significativo), no elimina minerales disueltos y sales.</li> </ul>
Fenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los reactivos utilizados son abundantes y de fácil manejo</li> <li>• Los reactores utilizados son sencillos de operar</li> <li>• No precisa de fuente de energía para producir radicales OH<sup>-</sup></li> <li>• Condiciones de presión y temperatura ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En ocasiones, no se consigue la mineralización completa del contaminante el hierro puede contaminar el medio receptor y causa corrosión.</li> <li>• Requiere de un ajuste de pH antes y después del tratamiento.</li> <li>• Requiere de un tratamiento posterior para eliminar el hierro residual en el efluente</li> <li>• Formación de complejos de hierro estable.</li> </ul>

**Fuente:** elaboración propia, con base en INDITEX. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. [en línea]. Coruña,

España: septiembre de 2015. [Consultado 10, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBA>; RUBIO, Ainhoa; CHICA, Edwin & PEÑUELA Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. [en línea] Trabajo de grado para obtención de título de pregrado. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica: 20 de junio de 2014. p. 15. [ Consultado 10, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBB> y GANDARILLAS, Jaime. Lechos de turba. módulo gestión de aguas residuales y reutilización. [en línea]. Trabajo de grado para obtención de Máster en Ingeniería y Gestión del Agua. Madrid: Escuela de organización industrial: 2016. p. 10 de 14 [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: [www.static.eoi.es](http://www.static.eoi.es).

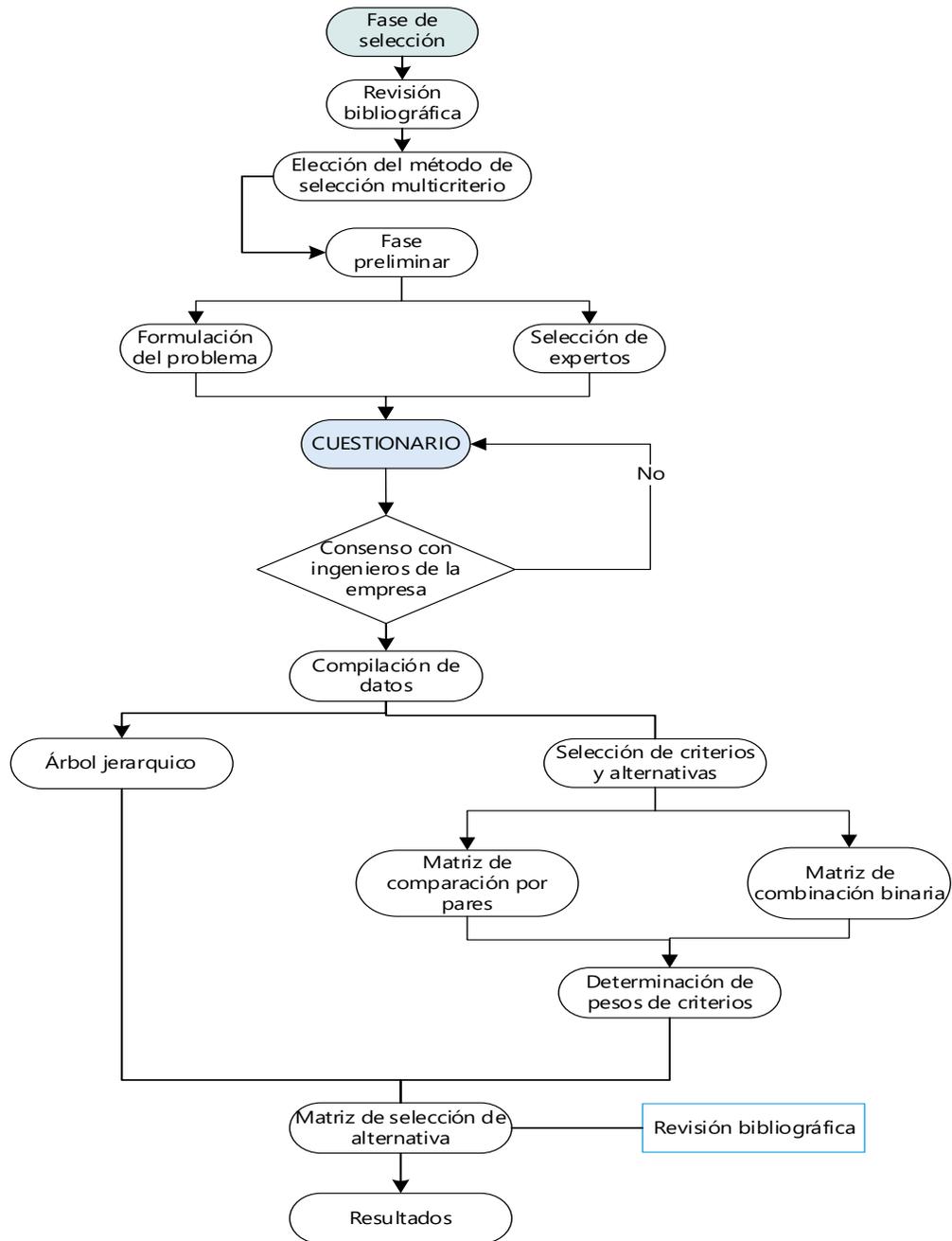
**Tabla 14.** Remoción de diferentes procesos en aguas residuales textiles

Parámetro	Biofiltros	Ozonización	Fenton
DQO	70-80%	92%	96 %
DBO	60-90%	No registra	80-95%
SÓLIDOS	70-98%	86%	No registra
COLOR	80-98%	90%	94%
CLORUROS	No registra	No registra	29,62%
TURBIDEZ	60-90%	No registra	99,91%

**Fuente:** elaboración propia, con base en MELGACO, Rosa. DE LA CRUZ, Patricia. CARDENAS, Cyntia & VALLADORES, María. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. [en línea]. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Medellín: 21 de diciembre de 2016. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: <https://url2.cl/ZbrTa>; SALAS, G. Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fentón) de aguas residuales de la industria textil. [en línea]. Revista Peruana de Ingeniería Química, Vol. 13, Perú: 2010. p. 32. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBV> y SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Reacciones Fenton. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 5. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBT>.

4.3.2 Selección de tratamiento adicional. Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, la identificación de los intereses de la empresa del sector textil y las necesidades puntuales de la PTAR para el cumplimiento con la norma 0631 del 2015, se realiza una matriz de selección que permite elegir entre distintas alternativas de tratamiento. La matriz de selección, se realiza con base en un método de toma de decisión multicriterio, seleccionado a partir del proceso que se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Árbol de proceso



**Fuente:** elaboración propia, con base en CUENCA, Marco Antonio. Selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas. Tesis doctoral Departamento de física aplicada. Universidad técnica de valencia. España. 2015.

4.3.2.1 Métodos multicriterio aplicables a aguas residuales del sector textil. Para el método de desarrollo de la matriz, se seleccionó con el seguimiento del árbol del proceso una combinación de diferentes métodos de toma de decisión multicriterio.

4.3.2.2 Fase preliminar. Como primera instancia se definió la problemática que es la raíz de la selección de la combinación de métodos y el punto de partida para dar solución por medio de la matriz. Esta problemática se centra en la selección de la tecnología más adecuada a las necesidades de la PTAR; sin dejar de lado ninguno de los factores que pueden afectar a futuro la decisión de implementar este proceso adicional a nivel industrial en la planta.

Según la teoría de los precios,<sup>93</sup> el problema del presente trabajo (seleccionar una tecnología óptima para la mejora de parámetros) se define actualmente de tipo multicriterio, porque presenta un conflicto entre múltiples criterios a evaluar para una toma de decisiones de complejidad, y a su vez este problema multicriterio se delimita como discreto,<sup>94</sup> ya que presenta un número de alternativas finitas a considerar para su solución.

Las matrices de selección suelen evaluarse mediante funciones de utilidad con atributos múltiples de Keenei y Raifa<sup>95</sup> donde se asigna un valor real de cada criterio a las diferentes alternativas permitiendo darle un atributo y a partir de este, ordenarlas y compararlas en función de los intereses y del objetivo del proyecto. Sin embargo, este método tiene un enfoque de aplicación teórico, por lo que se empleó un método que tiene como base a Keenei, pero con la ventaja de ser aplicable a supuestos prácticos como el del presente trabajo.

Dentro de los métodos a supuestos prácticos se encuentran: de puntuación directa, de superación, basados en distancia, basados en funciones de utilidad o valor y de comparación por pares;<sup>96</sup> se seleccionó el método de jerarquías analíticas perteneciente al método de comparación por pares, puesto a que conforme a la revisión bibliográfica y basándose en documentos de referencia, este nos permite medir tanto criterios tangibles, como intangibles<sup>97</sup> presentes en el proyecto, así mismo permite organizarlos de manera jerárquica, en orden de importancia dándole

---

<sup>93</sup> MILTON, Friedman. Price Theory, Chicago, American Journal of Agricultural Economics, Volume 45. p. 672-678: 1962.

<sup>94</sup> VITORIANO, B. Teoría de la decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de utilijuegos. [en línea]. Universidad de Complutense de Madrid: julio de 2007. p. 3-104. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: [https://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a\\_dt\\_UCM.pdf](https://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a_dt_UCM.pdf)

<sup>95</sup> HOWARD, Raiffa & RALPH L, Keeney Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. [en línea]. New. York: 7 de julio de 1979. p. 40. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310245

<sup>96</sup> CABELLO, A. Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones (Grado en administración y dirección de empresas). Universidad de la Rioja. |2017. p. 31

<sup>97</sup> GARCIA, A; MARTINEZ, E. & CAMPOS C. Técnicas multicriterio de ayuda a la decisión. Ed Pearson: 2013.

valores denominados pesos de utilidad y permitiendo desglosar el problema a una solución correcta, de manera simple y aplicable a la realidad.

El método seleccionado presenta en su primera fase una combinación con el método Delphi, una combinación completa que ha sido efectiva en la selección de tratamiento de aguas como se observa en la tesis doctoral “Selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas”<sup>98</sup> además de ser el método Delphi un método combinable con muchos métodos aportando favorablemente a la toma de decisiones.<sup>99</sup> Este método permite generar para la matriz de selección un soporte confiable, a partir de un panel de expertos que participa en la construcción del árbol jerárquico, los criterios, su porcentaje de importancia y las posibles alternativas. A partir de estas diferentes perspectivas se realiza un último consenso con ingenieros de la PTAR y los desarrolladores del proyecto, con el fin de enfocar la conclusión del método a los intereses y necesidades de la empresa del sector textil.

4.3.2.3 Encuesta a expertos. De acuerdo al árbol de proceso se realizó una encuesta por medio de Google Forms. Para esta se seleccionaron 5 miembros interesados en el proyecto con diferentes enfoques, experiencia y conocimiento en tratamientos de aguas residuales y diseño de plantas pertenecientes a la Fundación universidad de América y a la empresa del sector textil (El director de la PTAR, el operario más antiguo de la PTAR, un experto en tratamiento de aguas residuales y los autores del presente proyecto) con el fin de definir los criterios y soluciones del proceso de posible aplicación.

Los criterios se establecen previamente a partir de referencias bibliográficas, teniendo en cuenta factores cualitativos (Impacto ambiental (IA) y simplicidad del proceso (S)) y cuantitativos (Costo de capital (CC), vida útil (VU), costo de operación y mantenimiento (OM), área de instalación (AINS) y remoción de parámetros (RP)) para realizar la evaluación por pares. Además, en la encuesta se propone a los expertos la opción de añadir un criterio a su concepto y si recomienda algún proceso adicional como solución a la problemática como se evidencia en el Anexo C. La encuesta tiene un formato que permite la comparación de los criterios por pares, parte central del método jerarquías analíticas, donde se compara la relación de importancia entre cada criterio con los otros restantes, atribuyéndoles un valor a partir de la escala de Saaty que se muestra en el Cuadro 13.

---

<sup>98</sup> CUENCA, Marco Antonio. Selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas. Tesis doctoral Departamento de física aplicada. Universidad técnica de valencia. España. 2015

<sup>99</sup> MONTALVAN, Adelmo. et al. Industrial Multicriteria analysis for the integrated management of industrial wastewaters. [ en línea] Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba. 1 de abril de 2017. p. 56. [Consultado 28, mayo, 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3604/360450397006.pdf>

**Cuadro 13.** Escala de Saaty

<b>Escala numérica</b>	<b>Escala verbal</b>
1	Ambos criterios son de igual importancia
2	Término intermedio entre 1 y 3
3	Débil importancia de A sobre el B
4	Término intermedio entre 3 y 5
5	Importancia esencial de A sobre B
6	Término intermedio entre 5 y 7
7	Importancia demostrada de A sobre B
8	Término intermedio entre 7 y 9
9	Importancia absoluta de A sobre B

Fuente: Saaty, 1994

En el Cuadro 14 se evidencia la comparación de criterios, en donde la premisa del método establece que el valor de una relación inversa (B/A) es el inverso del valor asignado por el encuestado (A/B) por lo que las posibles combinaciones se ven reducidas como se muestra en el Cuadro 15

**Cuadro 14.** Comparación por pares

<b>A vs B</b>	
A	B
RP	CC
RP	VU
RP	OM
RP	S
RP	IAM
RP	AINS
CC	RP
CC	VU
CC	OM
CC	S
CC	IAM
CC	AINS
VU	RP
VU	CC
VU	OM
VU	S
VU	IAM
VU	AINS
OM	RP
OM	CC
OM	VU

**Cuadro 14** (Continuación)

<b>A Vs B</b>	
OM	S
OM	IAM
OM	AINS
S	RP
S	CC
S	VU
S	OM
S	IAM
S	AINS
IAM	RP
IAM	CC
IAM	VU
IAM	OM
IAM	S
IAM	AINS
AINS	RP
AINS	CC
AINS	VU
AINS	OM
AINS	S
AINS	IAM

Fuente: elaboración propia

**Cuadro 15.** Comparación por pares simplificada

<b>A vs B</b>	
A	B
RP	CC
RP	VU
RP	OM
RP	S
RP	IAM
RP	AINS
CC	VU
CC	OM
CC	S
CC	IAM
CC	AINS
VU	OM
VU	S
VU	IAM
VU	AINS

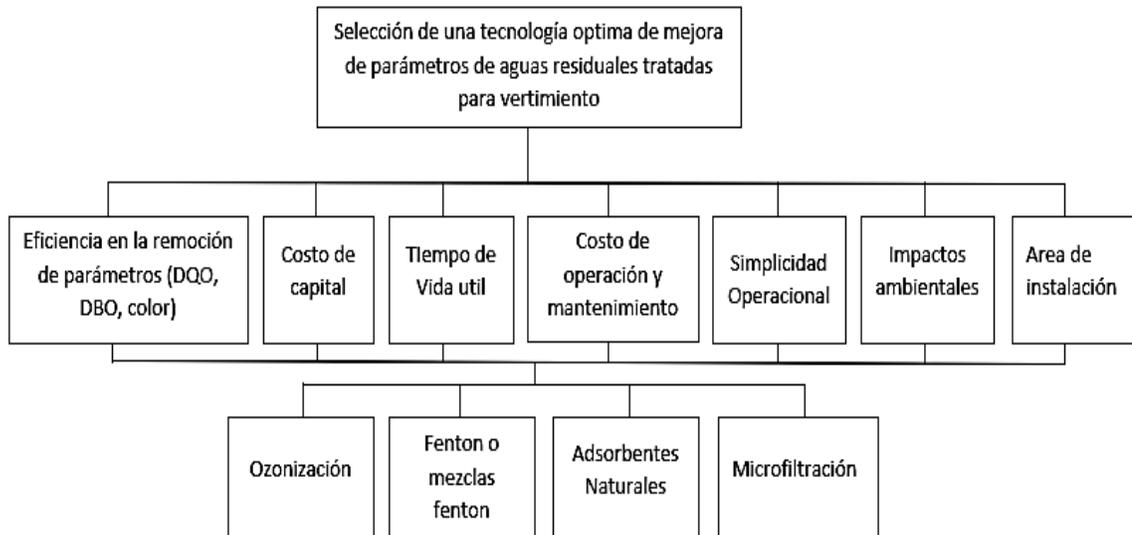
**Cuadro 15.** (Continuación)

A vs B	
OM	S
OM	IAM
OM	AINS
S	IAM
S	AINS
IAM	AINS

**Fuente:** elaboración propia

4.3.2.4 **Árbol jerárquico** Después de una socialización de las diferentes perspectivas con los ingenieros de la PTAR y las tesis, quienes finalmente definen los criterios y posibles soluciones, se realiza el árbol jerárquico del método presentado en la Figura 7. El centro del árbol explica el objetivo general del problema de decisión que se presenta en la matriz de selección, el segundo nivel muestra los criterios dependientes que definen la selección del tratamiento adicional y finalmente el tercer nivel incluye los procesos de remoción de parámetros para dar solución a la raíz del problema.

**Figura 7.** Árbol de jerarquización



**Fuente:** elaboración propia, con base en CUENCA, Marco Antonio. Selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas. Tesis doctoral Departamento de física aplicada. Universidad técnica de valencia. España. 2015

A continuación, se describe el contenido de cada uno de los criterios y soluciones.

- **Eficiencia de la remoción de parámetros:** Las aguas residuales deben tratarse buscando el cumplimiento de la Resolución 631 del 2015 de vertimientos, aunque la evaluación se centra los parámetros DQO, DBO y color, la manera en que otros

parámetros se vean afectados positivamente también será de importancia para el criterio.

- Costo de capital: Este criterio está integrado por costos de los equipos de adquisición, así como el costo de su instalación y el acople al proceso.
- Tiempo de vida útil: Este factor está determinado por la implicación que tiene la duración de los equipos respecto a la eficiencia del proceso con el pasar del tiempo de uso.
- El coste de operación y mantenimiento Este incluye los costos asociados a los diferentes equipos del proceso, tanto en operación (costo de personal, costo de energía, costo de productos químicos y adecuación adicional de la corriente) como en mantenimiento (reparaciones imprevistas, mantenimiento periódico).
- Simplicidad operacional: La elección debe tener en cuenta las necesidades de operaciones especiales en el sistema y su mantenimiento. La simplicidad operativa y bajos requerimientos de mantenimiento deben ser objetivos a evaluar, ya que la sencillez podría determinar el funcionamiento del sistema a largo plazo.
- Impactos ambientales: Se debe tomar en consideración el punto de vista de la población local afectada por las instalaciones. Este criterio se centra en las molestias que la instalación puede causar en el entorno: la producción de ruidos no deseados en los alrededores, el impacto estético o visual causado por la presencia de las instalaciones en el paisaje, los malos olores que pueden ser producidos por el tratamiento y otras emisiones no deseadas como gases o vapores deberían ser minimizados. Así mismo se evalúa el consumo de recursos naturales de cada alternativa, ya que es un parámetro de interés propio de la empresa del sector textil en concordancia con su política de sostenibilidad.
- Área de instalación: Este criterio es de vital importancia en lo que respecta a los intereses propios del diseño de la PTAR, debido a que el espacio que se tiene para un nuevo proceso no es amplio.
- Ozonización: El ozono es un agente oxidante fuerte que presenta reacciones y demanda de ozono, con compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en aguas naturales o residuales, el cual se ha convertido en una de las técnicas de tratamiento avanzado con implantación en el tratamiento de aguas residuales textiles
- Proceso Fenton: Se da por medio de la adición de sales de hierro como catalizador cuando se tiene  $H_2O_2$ , la interacción de estos dos en medio ácido genera los radicales libres  $OH^\cdot$ , este proceso se da a condiciones ambiente y en un reactor

de manera discontinua El proceso de Fenton remueve compuestos orgánicos de difícil entre los que están fenólicos, organoclorados y colorantes<sup>100</sup>

- Filtro de absorbentes no convencionales: Se caracterizan por poseer una acción adsorbente a partir de materiales naturales o residuos aprovechables, la adsorción de los tipos de contaminantes depende del material a utilizar y a su vez estos requieren una adecuación al medio para obtener el mayor rendimiento.

4.3.2.5 Selección de criterios, pesos y alternativas. Gracias a la aplicación de la encuesta desarrollada en la herramienta de Google Forms, se adquieren los resultados necesarios para la aplicación del método de jerarquías analíticas; estos resultados fueron recopilados y registrados en el Cuadro 16, el valor promedio será de utilidad para realizar la matriz de combinación binaria.

**Cuadro 16.** Recopilación de resultados

A vs B		Expertos					Media
A	B	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Valor medio
RP	CC	5,00	3,00	5,00	0,13	5,00	3,63
RP	VU	1,00	7,00	5,00	0,13	5,00	3,63
RP	OM	5,00	5,00	4,00	0,14	6,00	4,03
RP	S	1,00	7,00	9,00	0,14	8,00	5,03
RP	IAM	8,00	1,00	0,11	0,11	0,11	1,87
RP	AINS	1,00	7,00	1,00	6,00	0,33	3,07
CC	VU	1,00	9,00	1,00	0,14	3,00	2,83
CC	OM	1,00	1,00	1,00	0,13	6,00	1,83
CC	S	5,00	9,00	9,00	8,00	6,00	7,40
CC	IAM	1,00	0,14	0,11	8,00	0,11	1,87
CC	AINS	1,00	5,00	1,00	7,00	0,17	2,83
VU	OM	7,00	0,14	4,00	0,13	1,00	2,45
VU	S	1,00	5,00	1,00	6,00	1,00	2,80
VU	IAM	1,00	0,11	0,11	8,00	0,11	1,87
VU	AINS	1,00	0,33	1,00	7,00	0,11	1,89
OM	S	1,00	5,00	0,11	7,00	5,00	3,62
OM	IAM	1,00	0,14	0,11	3,00	0,13	0,88
OM	AINS	3,00	0,20	1,00	6,00	0,13	2,07
S	IAM	1,00	0,11	0,11	0,14	0,11	0,30
S	AINS	1,00	0,20	0,11	7,00	0,14	1,69
IAM	AINS	1,00	5,00	1,00	7,00	9,00	4,60

**Fuente.** Elaboración propia

<sup>100</sup> MONGE, Sarai; SILVA, Adrián & BENGEOA, Christophe. Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. [ en línea]. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales, programa CYTED. Cataluña, España: 2016. ISBN: 978-84-09-08637-5 [Consultado 28, mayo, 2020]. Disponible en: [www.cytcd.org](http://www.cytcd.org)

Posteriormente en el Cuadro 17, se muestra la matriz de combinación binaria, la cual evalúa todas las posibles combinaciones de los criterios, de esta manera se ubican en ella los promedios de los factores A Vs B obtenidos en el Cuadro 16, mientras que para las comparaciones de los factores B Vs A se otorga el valor inverso.

**Cuadro 17.** Matriz de combinación binaria

Parámetro/ Parámetro	RP	CC	VU	OM	S	IAM	AINS
RP	1,00	3,63	3,63	4,03	5,03	1,87	3,07
CC	0,28	1,00	2,83	1,83	7,40	1,87	2,83
VU	0,28	0,35	1,00	2,45	2,80	1,87	1,89
OM	0,25	0,55	0,41	1,00	3,62	0,88	2,07
S	0,20	0,14	0,36	0,28	1,00	0,30	1,69
IAM	0,54	0,53	0,54	1,14	3,39	1,00	4,60
AINS	0,33	0,35	0,53	0,48	0,59	0,22	1,00
suma	2,86	6,55	9,28	11,21	23,83	7,99	17,14

Fuente: elaboración propia

Cada valor establecido en la matriz binaria debe ser normalizado según la Ecuación 4, dividiendo los valores establecidos en la Cuadro 17 entre la suma de cada columna obteniendo los datos del Cuadro 18 .

**Ecuación 4.**  
normalización

$$\frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} = C_{ijN}$$

Donde:

C<sub>ij</sub>= Criterio columna(i) fila(j)

C<sub>ijN</sub>= Criterio columna(i) fila(j) normalizado

**Cuadro 18.** Matriz de combinación binaria normalizada

Parámetro/ Parámetro	RP	CC	VU	OM	S	IAM	AINS
RP	0,350	0,554	0,390	0,359	0,211	0,233	0,179
CC	0,096	0,153	0,305	0,163	0,311	0,234	0,165
VU	0,096	0,054	0,108	0,219	0,118	0,233	0,110
OM	0,087	0,084	0,044	0,089	0,152	0,110	0,120
S	0,070	0,021	0,038	0,025	0,042	0,037	0,099
IAM	0,187	0,082	0,058	0,102	0,142	0,125	0,268
AINS	0,114	0,054	0,057	0,043	0,025	0,027	0,058
SUMA	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Fuente: elaboración propia

La determinación de pesos para cada criterio finalmente se logra al sumar los valores obtenidos en las filas para cada parámetro y dividiendo este valor entre la cantidad de criterios evaluados como establece la Ecuación 5, obteniéndose los resultados en la Tabla 15.

**Ecuación 5.** Peso equivalente

$$Peso = \frac{\sum C_i}{n}$$

Donde:

Ci= Criterio específico

n= Número de criterios

**Tabla 15.** Determinación de pesos

Criterio	Peso
RP	0,325
CC	0,204
VU	0,134
OM	0,098
S	0,047
IAM	0,138
AINS	0,054
SUMA	1,000

Fuente: elaboración propia

4.3.2.6 Matriz de selección de alternativa. El factor de ponderación se realiza por medio del método de suma de calificaciones ponderadas, los factores de ponderación provenientes de la Tabla 15 y expuestos en forma de porcentajes se señalan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Factor de ponderación

Criterio	Factor de ponderación
Remoción de parámetros	33%
Costo de capital	20%
Impactos ambientales	14%
Vida útil	13%
Operación y mantenimiento	10%
Simplicidad operacional	5%
Área de instalación	5%
SUMA	100%

Fuente: elaboración propia

A partir del factor de ponderación y las calificaciones que se asignan según los valores de evaluación del cuadro 8 se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 19 el cual, a partir del mayor puntaje obtenido entre los tratamientos, correspondiente a Biofiltros.

**Cuadro 19.** Matriz de selección

<b>Característica/ Tratamiento</b>	<b>Fenton</b>	<b>Ozonización</b>	<b>Biofiltración</b>
Remoción de parámetros	0,66	0,99	0,66
Bajo costo de capital	0,4	0,2	0,6
Vida útil	0,26	0,39	0,39
Operación y mantenimiento	0,2	0,1	0,2
Simplicidad operacional	0,1	0,1	0,15
Impactos ambientales	0,28	0,28	0,42
Área de instalación	0,1	0,05	0,1
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>2,11</b>	<b>2,52</b>

**Fuente:** elaboración propia

4.3.2.7 Resultados. Aunque los procesos de ozono y Fenton son eficaces, de avanzada tecnología y generan porcentajes de remoción altos, en la matriz de selección establecida en el Cuadro 19 se obtiene la biofiltración a partir de absorbentes naturales como la mejor opción de aplicación debido a su bajo costo de operación e implementación, su bajo impacto ambiental y el cumplimiento con la necesidad de la PTAR en la remoción de contaminantes y el perfilamiento de los parámetros de vertimiento.

A partir de la revisión bibliográfica se encontraron estudios de materiales naturales y absorbentes aplicados a aguas residuales de la industria textil y su porcentaje de remoción a parámetros de interés De estos estudios se obtuvo el Cuadro 20.

**Cuadro 20.** Porcentajes de remoción de adsorbentes no convencionales en aguas textiles

Parámetro/ Variable	DBO	DQO	Sólidos	Color
Cáscara de arroz	22,73%	27,12%	No registra	21,18% de color
Guatila	No registra	80,71%	No registra	93,2% (negro directo) 84,3 % (negro 22)
Caña de azúcar	66,82%	73,23%	No registra	73,16% de color
Café	No registra	No registra	No registra	98,6% (azul brillante FSF);98,77% (azul de metileno);99,96% (verde malaquita);64,69% para el rojo 40
Turba	75,27%	76,96%	57,33%	No registra

**Fuente:** elaboración propia, con base en ORTIZ, Enrique. Análisis de la cascarilla de arroz utilizada como material para filtros de tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Mecánica: 2018. [Consultado 5, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC>; LEÓN, Roxana y ÑAUPARI, Ketty. Remoción de la demanda química de oxígeno en agua sintética de textilería utilizando el chayote (sechium edule) a nivel laboratorio. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Huancayo: Universidad Nacional del centro de Perú. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química: 2019 [Consultado 5, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC>; QUILLIGANA, Luis. Análisis del bagazo de la caña de azúcar como filtro en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans “lavaclassic”, ubicada en la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Mecánica: 2018. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC>; MORALES, Rodrigo. MEDINA, Wilson y PAREDES, Bolivar. Biofiltración sobre Cama de Turba, para el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes del Lavado de Jean. Ambato: [en línea]. Revista Universidad Técnica de Ambato Vol. 4 No 10.: 28 de junio de 2017. [Consultado 8, junio, 2020] Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC> y TORRES, Anyel., VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (Citrus Sinensis), Bagazo de caña de azúcar (saccharum officinarum) y borra de café (coffea arabica) para la remoción del colorante azul brillante fcf. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del medio ambiente y recursos naturales. Bogotá D.C: 2018. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC>

Esta revisión bibliográfica nos permite definir que los adsorbentes que se utilizaran en el proceso de experimentación con el agua residual de la empresa del sector textil, corresponden a los que presentan mayor remoción como lo son, la guatila, la Turba y la caña de azúcar. Para la selección del adsorbente óptimo se debe hacer un diseño experimental que permita a partir de los adsorbentes naturales

preseleccionados, evaluarlos en las aguas residuales de la PTAR y obtener así su eficiencia.

#### 4.4 SUBDIMENSIONAMIENTO

Se debe realizar por método de determinación del volumen del tanque, para esto se necesita medir el caudal de entrada a la PTAR, el cual actualmente no se registra, al tener el registro de 24 horas del caudal de la planta tanto de entrada como de salida, con un flujo de operación normal se podrá establecer el volumen teórico del tanque homogenizador siguiendo las indicaciones de cálculo recomendadas por Inditex, al cual se le debe añadir de un 10% a un 20% de sobre diseño <sup>101</sup> sustentado en la posibilidad de imprevistos en el proceso de la PTAR que tengan un efecto en la retención de caudal

Debido a que no se puede realizar por el método, se determina por medio de un balance de masa simple tomando los caudales de entrada y salida, como condiciones máximas de operación donde a partir de la Ecuación 6 se determina el caudal máximo que podría llegar a la PTAR y a partir del diagnóstico se estableció el espacio de almacenamiento disponible de la PTAR en el Cuadro 21.

**Ecuación 6.** Caudal de trabajo por hora máximo

$$\frac{177600 \text{ L de agua}}{5 \text{ horas de operación}} = 35520 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

**Cuadro 21.** Espacio de almacenamiento de la PTAR

Tanque de almacenamiento	Capacidad
Cárcamos y tanque subterráneo	30 m <sup>3</sup>
Tanque pulmón	1 m <sup>3</sup>
Tanque homogeneizador	125 m <sup>3</sup>
Total	156 m <sup>3</sup>

**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta que los equipos de la tintorería operan mediante un proceso por lotes, la descarga de todos los equipos al tiempo requiere 180 m<sup>3</sup> de almacenamiento, por lo tanto el espacio disponible no es suficiente; por otro lado teniendo en cuenta que la PTAR tiene la posibilidad de tratar 30 m<sup>3</sup> de agua por hora, en 5 horas el tratamiento total sería de 150 m<sup>3</sup>, por lo que 30 m<sup>3</sup> quedarían en

<sup>101</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo & URES RODRÍGUEZ, Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, procesos de regulación-homogeneización. Coruña, España 2013.

almacenamiento, si se hiciera una nueva descarga en este instante el espacio de almacenamiento requerido sería el correspondiente al descargue más el que se encuentra almacenado. De esta manera se establece que en 4 lotes de 5 horas se almacenarían 120 m<sup>3</sup> de agua diarios adicionales a los de cada descarga, por lo que el almacenamiento debería ser de 180 m<sup>3</sup> del total de agua descargada más 120 m<sup>3</sup> del almacenamiento diario, para un total de 300 m<sup>3</sup> en un día. A este volumen se le agrega el factor de seguridad, que permite evitar una falla estructural del proceso, y que da un valor final para el homogeneizador de 360 m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que el análisis se realizó bajo condiciones máximas de operación, ya que todos los esclavos no realizan sus descargas al tiempo.

La capacidad de almacenamiento actual de la PTAR es de 156 m<sup>3</sup> por lo que se propone añadir un tanque homogeneizador que complemente al ya existente y supla con el volumen requerido de 360 m<sup>3</sup> es decir, dicho tanque tendrá un volumen de 204 m<sup>3</sup> y requerirá de un sistema de homogenización y aireación, el cual controla la sedimentación del agua y a su vez iguala las características de esta, permitiendo equalizar y amortiguar las cargas de químicos, así, se reducen los cambios abruptos mejorando los rendimientos de los procesos al controlar la dosificación de los reactivos necesarios en el proceso. Así mismo aumenta la vida útil de los equipos evitando su sobrecarga y evitando mantenimiento causado por irregularidades asociadas a un flujo alto. El Tiempo de retención en el proceso se calcula así:

**Ecuación 7.** Tiempo de retención

$$R_T = \frac{V}{F_{In}}$$

RT= Tiempo de retención

V= Volumen del tanque equalizador

Fin= Flujo del influente

A partir de esta y con un caudal de 720 m<sup>3</sup>/día en condiciones máximas de operación y un volumen del tanque calculado con anterioridad de 360 m<sup>3</sup>, se determinó un tiempo de retención hidráulico máximo de 12 horas, rango que, según Inditex se encuentra dentro de un tiempo de retención común<sup>102</sup> el cual según las condiciones de trabajo puede llegar a ser menor.

---

<sup>102</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Procesos de regulación-homogenización. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 15. [3, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2WrskPW>

Dentro de las recomendaciones para el funcionamiento del equalizador se recomienda tener un sistema de agitación ya sea mecánica, donde la potencia de mezcla debe ser del orden de 15-25 W/m<sup>3</sup> o por agitación mediante inyección de aire a través de difusores, en el cual la cantidad de aire debe estar entre 0,4 y 0,6 m<sup>3</sup> de aire/m<sup>3</sup>.hora., el tipo de difusores a emplear son de burbuja media o gruesa. Otra sugerencia importante es mantener condiciones aerobias, suministrando aire a una tasa de 9 a 15 L/m<sup>3</sup>min de almacenamiento.<sup>103</sup>

Este capítulo nos permite a partir de las propuestas implementadas en el control del caudal por medio del homogeneizador propuesto, así como la aplicación del coagulante Policloruro de Aluminio, generar una mejora con base en valores teóricos de un 65-80% de remoción de SST,<sup>104</sup> 75-99% remoción de color<sup>105</sup> y un 50-65% de DQO<sup>106</sup>, mientras que el tratamiento adicional funciona con el objetivo de terminar de perfilar los parámetros del agua de vertimiento y sus porcentajes de remoción dependen de un diseño experimental.

---

<sup>103</sup> Ibid. p.

<sup>104</sup> GILPAVAS, Edinson, ARBELAÉZ CASTAÑO, Jose David & MEDINA, Carlos. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia [ en línea]. Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT), Medellín: 2017. p. 5. [15, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/30kAkDg>.

<sup>105</sup> SUAREZ LÓPEZ, et al. Flotación mediante aire disuelto. Op. Cit, p. 9.

<sup>106</sup> SOLANKI, Meena, et al. Op. Cit, p. 212.

## 5. ESPECIFICACIONES DE MEJORA

### 5.1 INSTRUMENTACIÓN

5.1.1 Variables controladas Con base en el diagnóstico y el diagrama de procesos propuesto se describe a continuación las variables, y su zona de medición.

5.1.1.1 Caudal. En la primera fase se evidenció la necesidad de medir el caudal justo después de pasar por el tanque TC-01, en la tubería de la corriente 2, debido a que es el punto de inicio de la PTAR. En consecuencia, de la alta variación de flujo de descarga durante el proceso de tintorería, la medición de esta variable en la corriente de entrada al proceso permitirá crear estrategias de descargas alternas de los Sclavos o de producción que regulen el flujo, así como ajustar las condiciones de operación de los distintos procesos y permitir hacer cálculos de importancia en base al caudal

5.1.1.2 Temperatura. Se requiere medir esta variable en la tubería de la corriente 2, como indicador de homogeneidad del agua procedente de tintorería, así como un dato de registro para comparar y caracterizar el comportamiento de la variable a lo largo del proceso.

5.1.1.3 Nivel. En los tanques homogeneizadores se evidenció la oportunidad de controlar el nivel de los tanques por medio de una alarma de alto y bajo nivel, con el fin de evitar sobrecargas y por ende derrames en este punto y a su vez para detener el funcionamiento de los mezcladores cuando se presenta un bajo nivel. Esto permitirá a los operarios un mayor control de estos tanques.

5.1.1.4 Presión. Para la medición de la pérdida de carga, la cual permite conocer el grado de colmatación de los filtros y así controlar cuando se demandan retro lavados, se requieren manómetros diferenciales entre la corriente de entrada y salida de cada uno de los filtros, actualmente solo se presenta un manómetro por lo que se requieren otros tres para los filtros restantes, esto con la intención de medir la diferencia de presiones, la cual debe ser revisada y registrada cada dos horas por los operarios.

5.1.1.5 Análisis químico. Para la variable del proceso de coagulación-floculación, en la dosificación, se recomienda colocar medidor digital para turbidez y color, con el fin de tener una rápida respuesta a las variaciones que se presentan en este parámetro y así obtener la dosificación adecuada, dando solución a la problemática que se presenta frecuentemente durante lapsos de tiempo donde la dosificación es la incorrecta por el tiempo necesario para la toma de estos parámetros en laboratorio, generando una rectificación tardía en las bombas dosificadoras.



realicen de manera adecuada y preventiva, esto permite una mejor preservación de los equipos, aumentar la eficiencia y la productividad, la prevención de paralizaciones imprevistas, la disminución de reparaciones, horas extras de trabajo y por ende de los costos de mantenimiento y operación.

5.2.1.1 DAF. Para el proceso que se lleva actualmente en el DAF, se recomienda revisar actividades para el inicio, final y durante la operación que afectan la eficiencia del proceso como se establecen en el Anexo E.<sup>107</sup> Así mismo, se recomienda seguir el Anexo F, el cual contiene el formato de registro de estos datos, ya que se requieren para revisiones futuras e historial del comportamiento del equipo.<sup>108</sup>

Dentro de las recomendaciones a destacar, el registro de algunos parámetros adicionales pueda permitirles a los operarios un mayor control del proceso y el equipo, como lo es la conductividad, esta se encuentra relacionada con el contenido de sales presentes en el agua residual y que tiene incidencia negativa en la eficiencia del proceso.<sup>109</sup> Otro parámetro importante por añadir es la turbidez que se encuentra relacionada con el DQO y permite determinar la dosificación de coagulante adecuada. Por otro lado, se recomienda para la determinación de DQO, realizar una muestra compuesta basada en el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM,<sup>110</sup> de manera que el valor sea representativo para los análisis que se requieran.

5.2.1.2 Filtros . Se recomienda mantener el control del proceso de filtrado, ya que esto optimiza el funcionamiento de los filtros. Según Suarez, Jacome y Ures, el tamaño efectivo del material filtrante debe ser de 1.3 a 1.5 mm para filtración de aguas coaguladas como es el caso de la PTAR, con una pérdida de carga no superior a 2,2 psi,<sup>111</sup> sin sobrepasar la tasa que puede tratar el filtro, que es de 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día<sup>112</sup> y la temperatura del agua residual no debe exceder los 40°C.

---

<sup>107</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Op. Cit. p. 4

<sup>108</sup> GARCÍA-MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ-SANCHEZ, P.& RANCAÑO-PÉREZ, A. Manual de operación y mantenimiento de EDARs en pequeñas poblaciones. [en línea]. KLEIN: 2012, ISBN, 978-84-615-7343. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <http://datos.bne.es/edicion/a5211919.html>

<sup>109</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Op. Cit. p. 17

<sup>110</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. Colombia, 10 de septiembre de 2017.

<sup>111</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Filtración en medio granular. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 15. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059f05-fa5a-f906-0551-d94b40f0971b>

<sup>112</sup> Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas (CETESB) op cit p 457.

➤ Actividades de control en filtros. Estos deben ser operados cuidando la constancia del flujo de filtrado a lo largo del día ajustándose mediante bombas o vertederos,<sup>113</sup> según Hess, Rachwa y Chipps, el arranque e incremento de flujo durante la filtración puede generar la rotura del filtro, rompiendo el equilibrio de fuerzas, causando que las partículas ya retenidas sean arrastradas por la corriente<sup>114</sup>, afectando de manera negativa los parámetros finales del agua residual. Así mismo se debe evaluar la altura del lecho en el interior del filtro, nunca debe llenar completamente el filtro, ya que ello impediría la correcta expansión del material filtrante durante el retro lavado y la filtración sería menos efectiva, generando una colmatación del filtro más rápida.

Se debe realizar anualmente un mantenimiento de las estructuras exteriores e interiores de estos equipos, sandblasting para la zona interna y pintura anticorrosiva para la zona externa, dependiendo del deterioro presentado y de las recomendaciones del fabricante, Además anualmente se debe destapar el filtro para revisar el estado de la arena, ya que una mala estratificación va generar menores remociones de parámetros y esto permitirá determinar si se debe cambiar la arena, donde según revisiones bibliográficas es cada 3 o 5 años.<sup>115</sup>

Respecto al carbón activado, debe ser regenerado o cambiado periódicamente, puesto que la capacidad de adsorción de este se deteriora gradualmente con el uso. Cuando la calidad del efluente alcanza el nivel mínimo establecido en los estándares de calidad, es un indicativo de que el carbón agotado debe ser regenerado, reactivado o extraído.<sup>116</sup> Este proceso se debe realizar con una empresa externa y especializada.

➤ Lavado de filtros. El lavado de filtros permite expandir el lecho de 15 a 40% y estratificar las partículas al finalizar la operación, el agua de lavado, que se obtiene de dicho proceso y contiene todas las impurezas retiradas de los filtros, se debe tratar nuevamente mediante una recirculación al DAF,<sup>117</sup> el agua de lavado de filtros debe estar libre de impurezas, de lo contrario no se logrará una limpieza efectiva de los lechos. Debido a que la PTAR trabaja con un caudal altamente variable y con flujo a presión, los retro lavados se deben realizar cuando la pérdida de carga alcanza 35 psi para filtros de arena y 20 psi para filtros de carbón, además se

---

<sup>113</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín, et al. Filtración en medio granular. Op cit. p.6

<sup>114</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín, et al. Filtración en medio granular. Op cit. p. 8

<sup>115</sup> SUAREZ LÓPEZ, et al. Filtración en medio granular. Op. Cit. p. 18.

<sup>116</sup> Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas (CETESB) op cit p 460.

<sup>116</sup> SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo y URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Filtración en carbón activo. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 12. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/3ewPiLz>

<sup>117</sup> SUAREZ LÓPEZ, et al. Filtración en medio granular. Op. Cit. p. 13.

recomienda no retro lavar todos los filtros al tiempo debido a que esto genera paradas del proceso de tratamiento.<sup>118</sup>

El tiempo de lavado oscila entre 8 a 15 minutos y el caudal de lavado debe estar entre un 2 a 2,5% del caudal del agua filtrada. Se recomienda realizar un análisis para determinar el tiempo de drenaje óptimo, de esta manera se deben recolectar muestras continuas del agua del drenaje después de retro lavar un filtro (de 20 en 20 segundos) y determinar la turbidez de tales muestras, el tiempo que transcurre entre la abertura del drenaje y el tiempo de recolección de la muestra que presenta una turbidez usual del agua filtrada, corresponde al tiempo de drenaje necesario para la preparación del filtro.<sup>119</sup>

5.2.1.3 Prensa tornillo. Se evaluó el equipo que se tiene actualmente en la PTAR para la remoción de humedad en lodos, con el fin de ser comparado con otras tecnologías a nivel de remoción de humedad y costo, donde se determinó que las alternativas presentadas en el cuadro 22 no compensan los gastos generados, determinados en la ecuación 8, puesto que, aunque remueve mayor humedad su costo de implementación es mayor.

Costo por Kg de lodo: \$120/kg, disposición de lodo diario: 3800-4000 kg/día y Costo diario de transporte lodo: \$350.000

**Ecuación 8.** Costo diario de disposición de lodos

$$(\$120 * 3.800 \text{ kg/día}) + \$350.000 = \$806.000/\text{día}$$

**Cuadro 22.** Costo de tratamiento de lodos

Proceso	Porcentaje de remoción	Consumo energía	Rendimiento	Costos
Filtro Vacío	15-25	40-60	18-22 kg SS/m2h	Medio
Centrifuga	20-25	60-80	No data	Medio
Filtro Banda	27-33	30-40	Variable	Alto
Filtro prensa	40-45	40-60	3-4 Kg SS/m2h	Muy alto

**Fuente:** elaboración propia, con base en SUAREZ LÓPEZ, Joaquin; JÁCOME BURGOS, Alfredo & URES RODRÍGUEZ. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, tecnologías de deshidratación de fangos. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 10. [consultado 2, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2Xj03va>

<sup>118</sup> CHIPPS, Michael J; RACHWA, Anthony; HESS, Alan F. Filter Maintenance and Operations. [en línea]. Guidance Manual. American Water Works Association. Denver: 2002. p 4-7. [Consultado 10, junio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/3fDbTaT>

<sup>119</sup> Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas (CETESB) op cit p 460.

5.2.1.4 Torres de enfriamiento. Las torres de enfriamiento de tiro inducido, presentan complejidad en la accesibilidad de los componentes mecánicos para realizar mantenimientos, igualmente el ventilador debe tener una protección anticorrosiva gracias a su exposición a la humedad de la atmósfera. El caudal de agua en la torre de enfriamiento debe ser controlado, puesto que un excesivo caudal puede producir ahogamiento o taponamiento de la torre, causando un efecto negativo en la transferencia de calor esperada.<sup>120</sup>

Los requisitos ATC-105 (Acceptance Test Code for water cooling tower) indican las condiciones que deben cumplir las torres de enfriamiento para tener una correcta operación, entre ellos se especifica que:

- Los sistemas de distribución de agua deben permitir la circulación de agua con normalidad, por este motivo deben realizarse actividades de limpieza.
- Los ventiladores deberán rotar en la dirección correcta. Las paletas del ventilador deberán entregar una potencia del orden de  $\pm 10\%$  de la potencia nominal de trabajo.
- Los conductos de circulación de aire, el flujo de aire y el relleno deberán estar libres de sedimentos, aceites o incrustaciones metálicas que puedan impedir la normal circulación del aire y del agua, donde el total de sólidos disueltos en el agua de circulación, determinados por evaporación, no debe exceder los valores de 5000 ppm o 1,1 veces la concentración de diseño.

5.2.1.5 Tuberías y bombas Teniendo en cuenta que las unidades de bombeo utilizadas en la PTAR son bombas centrífugas, se recomienda seguir el manual de mantenimiento de bombas centrífugas- guía de referencia del SENA, de la serie de entrenamiento mecánico de TELL-A-TRAIN, con el fin de asegurar el funcionamiento óptimo de las bombas y evitar detenciones de la PTAR por fallas ocasionadas en estas unidades.<sup>121</sup>

## 5.2.2 Laboratorio.

5.2.2.1 Métodos y procedimientos de análisis del laboratorio Los análisis fisicoquímicos de las aguas están basados en el Standard Methods for the Examination of Water edición 23a del 2017 entre otros métodos aprobados a nivel

---

<sup>120</sup> Cooling Technology Institute. "Acceptance Test Code for Water-Cooling Towers". CTI ATC-105. 1990

<sup>121</sup> SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE (SENA). Guía de referencia: mantenimiento de bombas centrífugas. [en línea]. Serie de entrenamiento mecánico de Tel-A-Train. Colombia, 1995. [Consultado el día 29 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11404/762>

internacional.<sup>122</sup> El laboratorio de la PTAR actualmente se rige por esta entidad para realizar los siguientes procedimientos, los cuales están debidamente descritos para el personal, sin embargo, se evidencia la necesidad de medir ciertos parámetros que se describen a continuación.

- Conductividad. En el diagnóstico se evidenció una ausencia de la medición de la conductividad, un parámetro importante en la determinación de la salinidad del agua, parámetro que puede afectar el proceso de coagulación-floculación en el DAF<sup>123</sup> y que además hace parte de la caracterización del agua por lo que se requiere la medición de este parámetro en laboratorio por medio de un equipo.
- Turbidez: Se ve necesaria la medición de este parámetro en laboratorio debido a que es un parámetro de la calidad del agua, pues la turbidez es un indicador de presencia de sólidos en suspensión o coloides, de importante remoción en el proceso del tratamiento.
- Temperatura: Igualmente se evidencia la necesidad de medir la eficiencia de las torres de enfriamiento, a partir del registro de temperatura justo antes y después de este equipo, siendo este último medidor (salida de la torre) un control para mejorar la eficiencia de remoción del DAF.<sup>124</sup>
- Cloruros: es un parámetro que solo se mide en el vertimiento, por lo que se propone medirlos en la entrada del proceso por método analítico de manera, que permita evaluar la remoción de este en el proceso. Calibración de equipos. Se recomienda seguir las indicaciones del manual de cada equipo y de la empresa de calibración, de manera que se consolide un cronograma de calibración y mantenimiento preventivo y así, reducir problemas que alteran el curso normal del proceso de planta como lo es el daño en un equipo esencial en el proceso o la medición de parámetros de importancia para el control del proceso y su correcto funcionamiento, llevando un registro como en el Anexo F. Seguridad en laboratorio. Se propone la implementación de un lavador de ojos y una ducha de emergencia, a los cuales se les debe hacer una revisión mensual de su estado y buen funcionamiento y se debe llevar un registro de su revisión con el fin de dar una respuesta oportuna en caso de accidentes con químicos.

Las mejoras que se proponen para la planta presentadas en el diagrama de procesos, el control de las variables a partir de elementos de instrumentación, así como las recomendaciones realizadas en este capítulo acompañadas de una correcta implementación de las actividades y su registro y las recomendaciones realizadas en tema de calibración, seguridad, equipos y registro en laboratorio,

---

<sup>122</sup> IDEAM. Metodologías de análisis, Análisis fisicoquímicos de aguas. [en línea]. Bogotá D.C. [Consultado 2, febrero, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>

<sup>123</sup> Ibid., p 15

<sup>124</sup> SUAREZ LÓPEZ, et al. Flotación por aire disuelto. Op. Cit. p. 15.

permiten un funcionamiento efectivo en la planta, generando un efecto sobre los parámetros de vertimiento, puesto que con base en fuentes referenciales los filtros, tienen la capacidad de generar remociones entre 42%-75% en DQO,<sup>125</sup> 68%-73% de SST y 42%-95% en color,<sup>126</sup> mostrando que el efecto de su buen funcionamiento será fundamental en la disminución de los valores de los parámetros de vertimiento.

---

<sup>125</sup> FLORES. Nadia, YANEZ, Nelson. Depuración de material refractario de aguas residuales de una industria textil aplicando adsorción con carbón activado, a escala experimental. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención del título de ingeniero químico, Guayaquil, Ecuador: 2016. [Consultado 15, junio, 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/19760/1/FIN%20DE%20LA%20TESIS.pdf>

<sup>126</sup> ROZZI, A, et al. Textile wastewater reuse in Northern Italy. [en línea]. Elsevier Science Ltd. Gran Bretaña: 1999. [Consultado 12, junio, 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/scientific-contributions/82626311\\_R\\_Bianch](https://www.researchgate.net/scientific-contributions/82626311_R_Bianch)

## 6. COSTOS

Es importante resaltar que la empresa determino como de interés solo los costos asociados a los nuevos equipos por lo que en el presente capítulo se presentaran únicamente los costos fijos, relacionados con el costo de los equipos propuestos,

### 6.1 COSTOS FIJOS

Se realizó una evaluación del costo de los equipos de la propuesta de mejora del presente proyecto, resaltando que no se realizó la evaluación de los costos del biofiltro (tratamiento adicional seleccionado), debido a que sus costos requieren de un diseño experimental con el agua de interés. De la misma manera no se incluyó la reducción de costos del coagulante presentados en el cuadro 11 debido a que son teóricos que no se han verificado a nivel experimental con el agua de la PTAR.

#### 6.1.1 Valor de los equipos de laboratorio

**Cuadro 23.** Costo de los equipos de laboratorio

Equipo	Características		Imagen	costo
TURBIDIMETRO	Precisión	± 2%		\$ 1'100.000 por unidad
	Fuente de luz	Infrarrojos		
	Método	Nefelométrico		
	Temperatura	0-60°C		
	Memoria	200 datos		
	Función de reinicio	Si		
	Turbidez	0-2000 NTU		
CONDUCTIMETRO	Resistividad	0 -100MΩ cm		\$ 1'228.000 por unidad
	Calibración	Solución estándar		
	Monitor	Pantalla LCD		
	Temperatura	0-40°C		
	Calibración	Automática		
	Resolución	Automática		
LAVADOR DE OJOS	Material	plástico		\$ 290.000 por unidad
	Duchas	3		
	Tipo	Ojos/cuerpo		
	Uso	Seguridad industrial		
<b>TOTAL DE EQUIPOS DE LABORATORIO PROPUESTOS</b>				<b>\$ 2'618 000</b>

**Fuente:** elaboración propia, con base en. ALIBABA GROUP. [sitio web]. Colombia: Alibaba.com. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <https://offer.alibaba.com/cps/jpicif1g?bm=cps&src=saf&tp1=5d8c7d436887d&tp2=5f32e2d24cbc5a00010f1661>

6.1.2 Valor de los equipos de instrumentación

**Cuadro 24.** Costo de los equipos de instrumentación

Posición / Equipo	Elemento		Imagen	Costo
TUBERIA DE CORRIENTE 2	Tipo de elemento	sensor de T		\$ 160.000 por 1 unidad
	Nombre	PT100 TF		
	Rango medida	-50-400°C		
	Profundidad	Mayor a 150 mm		
	Salida	4-20 mA		
	Precisión	clase A		
	Montaje	Lomo de tubería		
TUBERIA DE CORRIENTE 2	Tipo de elemento	Sensor Caudal		\$ 1'095.807 por 1 unidad
	Nombre	Electromagnético		
	Precisión	+/- 0,5%		
	Tamaño	50 mm		
	Montaje	Brida de acero		
	Diámetro tubería	1-4 in		
	Diámetro nominal	25-100		
	Flujo volumétrico	0,5-285 m <sup>3</sup> /h		
	Temperatura	20-60°C		
	Material electrodo	Acero inox		
TUBERIA DE CORRIENTE 22	Tipo de elemento	Sensor		\$ 2'700.000 por 1 unidad
	Nombre	Color y Turbidez		
	Rango medición	400-1500 nm		
	Temperatura	0-90°C		
	Material	Acero inox 316		
TUBERIAS FILTROS FLC01-FLC02.PFA01	Medio	Líquido-gas		\$ 1'260.000 por 3 unidades
	Precisión	+/- 0,1%		
	Temperatura	-10/120°C		
	Material	Acero inox 316		
	Rango	200 pa-10 Mpa		

**Cuadro 24.** (Continuación)

Posición Equipo	Elemento	Imagen	Costo	Posición/ Equipo
TANQUES TK-02/ TK-03	Tipo de elemento	magnético		\$ 1´189.000 por 2 unidades
	Nombre	Sensor alarma		
	Salida	Alarma superior		
	Rango de medición	alarma más baja		
	Rango de operación	Superior/ inferior		
	Montaje	Montaje en brida		
TOTAL, EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN PROPUESTOS PLANTA PTAR				\$ 6´404.807

**Fuente:** elaboración propia, con base en ALIBABA GROUP. [sitio web]. Colombia: Alibaba.com. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2DRw3js>.

### 6.1.3 Valor de los equipos de planta

**Cuadro 25.** Costo de los equipos de planta

Equipo/ Ubicación	Características		Imagen	Costo	
ECUALIZADOR	Tamaño	204 m <sup>3</sup>		8-13 MILLONES	
	Agitación	Mecánica			
	Ubicación	Subterráneo			
BOMBA CORRIENTE 22	Nombre	Bomba			\$ 400.000 por unidad
	Tipo	Centrífuga			
	Caudal	65 m <sup>3</sup> /h			
	Potencia	5.5 KW			
	Voltaje	380 V			
	Eje	Acero inox			
	Tornillo	Acero inox			
	Modalidad	sumergible			
Especial	Sólidos suspendidos				
TOTAL EQUIPOS DE LA PLANTA DE LA PTAR PORPUESTOS				\$ 8´400.000	

**Fuente:** elaboración propia, con base en ALIBABA GROUP. [sitio web]. Colombia: Alibaba.com. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <https://offer.alibaba.com/cps/jpicif1g?bm=cps&src=saf&tp1=5d8c7d436887d&tp2=5f32e2d24cbc5a00010f1661>

Finalmente, los costos fijos totales entre equipos de instrumentación, equipos de la planta de la PTAR y los equipos de laboratorio del proyecto suman \$ 17´422 807 pesos colombianos, estos costos son un estimado teórico de referencia para la

empresa del sector textil del actual proyecto y están sujetos a cambios dependiendo de las preferencias de la misma

## 7. CONCLUSIONES

- De acuerdo al diagnóstico realizado se determinó el policloruro de aluminio como coagulante de aplicación efectiva en aguas residuales textiles, es comparable con el coagulante actualmente utilizado en la empresa del sector textil, ya que permite unificar el decolorante y el coagulante usados actualmente y su baja dosificación generan una reducción de costos además de una buena remoción de parámetros con porcentajes de remoción del 75 al 99% para color y un 65% para DQO.
- La aplicación de un biofiltro como tratamiento adicional, con bajo impacto al medio ambiente, permite a la PTAR, mejorar el vertimiento final en parámetros como DQO con una remoción hasta del 80% y DBO hasta un 75%, a un bajo costo de procesamiento relacionado con el costo del material filtrante y su sustitución o regeneración.
- La propuesta de ampliación del tanque homogeneizador calculado en condiciones máximas de operación y con un volumen de 204 m<sup>3</sup>, cumple el objetivo de disminuir la fluctuación, variabilidad de parámetros y el caudal de entrada al proceso, el cual actualmente, sobrepasa la capacidad de 30m<sup>3</sup>/h de la PTAR, generando un mayor control del proceso y una mejora en la operación de los equipos.
- El control de las variables, caudal, temperatura, nivel, presión y turbidez son una propuesta que efectúa un control sobre el proceso completo y equipos como el tanque homogeneizador, las torres de enfriamiento, los filtros y el DAF, permitiendo una mejora en la eficiencia, además de generar un registro necesario para el análisis del comportamiento de la PTAR.
- Las actividades de mantenimiento preventivo aseguran el funcionamiento efectivo de los equipos de la PTAR y disminuyen las fallas imprevistas que generan vertimientos con bajas remociones y costos adicionales del proceso. Además, la propuesta de registro y monitoreo de estas actividades son una estrategia de control operativo además de ser un historial de referencia para la empresa del sector textil.
- La aplicación de la propuesta en conjunto, con base en referencias teóricas de tratamientos de aguas residuales textiles y fundamentado en el análisis de los datos del segundo semestre del 2019, permiten a la PTAR alcanzar porcentajes de remoción del proceso en los parámetros, SST, DQO y color, en un, 93%, 70%, y 95% respectivamente, generando porcentajes de incumplimiento del 1% en SST

y del 5% en DQO, los cuales se perfilan con el tratamiento adicional del biofiltro, donde sus valores de remoción están sujetos a un diseño de experimentos.

## 8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda medir la humedad de los lodos antes y después del tornillo prensa, con la intención de determinar la eficiencia del equipo.
- Para la determinación de los parámetros de DQO, grasas y aceites y cloruros en el laboratorio, de los cuales se realiza una medición diaria, se recomienda que se realice mediante una muestra compuesta según los parámetros establecidos en protocolo del instructivo para la toma de muestras de aguas residuales establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, con el fin de obtener un valor de parámetro representativo para el proceso.
- El estudio y propuesta de la estandarización de los procesos de producción en tintorería es de interés pues se espera que tenga un efecto en la fluctuación del agua de tratamiento, disminuyéndola y permitiendo un mayor control del proceso de la PTAR
- Se recomienda evaluar el tiempo adecuado de limpieza del tanque subterráneo, revisando si el mantenimiento mensual es más eficiente en cuanto a costos y mejora del proceso.
- Para la selección del material del biofiltro más adecuado, se debe evaluar con el agua residual propia de la PTAR, debido a que las aguas textiles presentan alta variabilidad en sus parámetros y comportamiento, por los productos químicos aplicados y los tratamientos previamente realizados por la empresa del sector textil. Por lo que una revisión bibliográfica de experimentaciones con estos materiales no es suficiente para la selección del material filtrante.
- Para un cálculo exacto en la determinación del volumen del tanque de homogenización se recomienda realizar un método de balance de masas, el cual requiere un registro del caudal de entrada a la PTAR en la corriente dos, que actualmente no se registra.
- La medición de parámetros debe hacerse para los filtros de arena y carbón individualmente, con el fin de revisar la eficiencia de los procesos por separado y lograr identificar las mejoras específicas.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, et al. Tratamiento físico -químico de aguas residuales coagulación-floculación. Murcia: Universidad de Murcia, servicio de publicaciones, 2002. ISBN 84-8371-308-X. 86 p.

ARIONA POOLS. Manual de instrucciones y mantenimiento. [en línea]. España: 2012. 30 p. [Consultado 10, junio, 2020]. Disponible en: <https://arionapools.com/wp-content/uploads/2019/06/Manual-Ariona-Pools-Industriales.pdf>

BECARIA, et al. Aluminum and copper in drinking water enhance inflammatory or oxidative events specifically in the brain. [en línea]. Journal of Neuroimmunology, 2006. 85 p. [5, febrero, 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/7084410\\_Aluminum\\_and\\_copper\\_in\\_drinking\\_water\\_enhance\\_inflammatory\\_or\\_oxidative\\_events\\_specifically\\_in\\_the\\_brain](https://www.researchgate.net/publication/7084410_Aluminum_and_copper_in_drinking_water_enhance_inflammatory_or_oxidative_events_specifically_in_the_brain)

BUSCIO, V, et al. Reuse of textile wastewater after homogenization-decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes, Chemical Engineering Journal. 2014. 235 p.

CABELLO, A. Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones. Grado en administración y dirección de empresas. Universidad de la Rioja. 2017. 110. p.

CARBOTECNIA. Filtración de lecho profundo. Centro de aprendizaje. México D.F. [En línea] 2020. [13 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtros-de-lecho-profundo-medios-granulares/filtros-de-lecho-profundo/>

CARBOTECNIA. Importancia de los retro lavados y ¿Cómo y cuándo realizarlos? [En línea]. Marzo 2019. [20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtros-de-lecho-profundo-medios-granulares/retrolavados-o-limpieza-de-los-filtros-de-agua/>

CHICA, Edwin & PEÑUELA Gustavo. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. [en línea] Trabajo de grado para obtención de título de pregrado. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica: 20 de junio de 2014. 33 p. [Consultado 10, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBB>

CHIPPS, Michael J; RACHWA, Anthony; HESS, Alan F. Filter Maintenance and Operations. [en línea]. Guidance Manual. American Water Works Association. Denver: 2002. 12-6 p. [Consultado 10, junio, 2020]. Disponible en:

<https://books.google.tt/books?id=lqFkV8or70C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

COGOLLO, Juan. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloriguro de aluminio. [en línea]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2010. 40 p. [Consultado 1, mayo, 2020]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

COLLIVIGNARELLI, Maria, et al. Treatments for color removal from wastewater: State of art. En: Journal of Environmental Management. Italia. 2019. 745 p.

COLOMBIA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Permiso-vertimientos. [En línea]. 2019. [20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <http://portal.anla.gov.co/permiso-vertimientos>

CETESB, Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamiento Básico e de Controle de Poluição das Águas. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Manual de capacitación para operadores. Lima, 2002.

COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE. "Acceptance Test Code for Water-Cooling Towers". CTI ATC-105. 1990

CYTED, Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Cataluña. España

EXRO, Fichas de seguridad de EXRO 616 para clarificación. Colombia, enero de 2018. 8 p.

FLORES. Nadia, YANEZ, Nelson. Depuración de material refractario de aguas residuales de una industria textil aplicando adsorción con carbón activado, a escala experimental. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención del título de ingeniero químico, Guayaquil, Ecuador: 2016. 125 p. [Consultado 15, junio, 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/19760/1/FIN%20DE%20LA%20TESIS.pdf>

GANDARILLAS, Jaime. Lechos de turba. módulo gestión de aguas residuales y reutilización. [en línea]. Trabajo de grado para obtención de Máster en Ingeniería y Gestión del Agua. Madrid: Escuela de organización industrial: 2016. 14 p. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: [www.static.eoi.es](http://www.static.eoi.es).

GARCIA, A; MARTINEZ, E. & CAMPOS C. Técnicas multicriterio de ayuda a la decisión. Ed Pearson: 2013. 580 p.

GARCÍA, F.J.; PÉREZ-SANCHEZ, P.& RANCAÑO-PÉREZ, A. Manual de operación y mantenimiento de EDARs en pequeñas poblaciones. [en línea]. KLEIN: 2012, ISBN, 978-84-615-7343. [Consultado 20, julio, 2020]. Disponible en: <http://datos.bne.es/edición/a5211919.html>

GOLOB, Vera, et al. Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dye bath effluents. [en línea]. Maribor, Slovenia: University of Maribor. 2000. 20 p. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBv>

HAASE, Dieter. Method for producing aqueous solutions of basic poly aluminum sulphate. [en línea]. European patent application, No. 366.388, 23 de octubre de 1989 [Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1c/1f/86/a9f08cf1980d27/EP0366388A1.pdf>

HOWARD, Raiffa & RALPH L, Keeney Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. [en línea]. New. York: 7 de julio de 1979. 95 p. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310245

IDEAM. Metodologías de análisis, Análisis fisicoquímicos de aguas. [en línea]. Bogotá D.C. [Consultado 2, febrero, 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>

INDITEX. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. [Consultado 10, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBA>; RUBIO, Ainhoa

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. [en línea]. Subdirección de hidrología-grupo laboratorio de calidad ambiental, Colombia: 10 de septiembre de 2017. [consultado: 3, febrero, 2020]. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)

IRIBARREN, Gabriel. Tendencias globales del sector textil blog Gabriel Farias. [En línea]. 2016. [11 de septiembre de 2019] disponible en: <https://gabrielfariasiribarren.com/tendencias-globales-del-sector-textil/>.

ISI Emerging Markets Group Company. EMIS university, Compañías. [En línea]. 2019. [06 de enero de 2020]. Disponible en: [www.emis.com](http://www.emis.com)

LENNTECH. Glosario del agua, una explicación de la terminología referente al agua. [En línea]. 2019. [20 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm#ixzz62AOgABYR>

LEÓN, Roxana y ÑAUPARI, Ketty. Remoción de la demanda química de oxígeno en agua sintética de textilería utilizando el chayote (*sechium edule*) a nivel laboratorio. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Huancayo: Universidad Nacional del centro de Perú. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química: 2019. 98 p. [Consultado 5, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCe>

LOCKUAN, Eduardo. La industria textil y su control de calidad. Creative Commons atribución, 2012. 210 p.

LOZANO, Antonio. Curso fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. 2012. 300 p.

MARTINS, J. L., GONZAGA, A., y SANTOS, J. *Informe del sector textil*. No. 71. Elsevier España, [En línea]. 31 de enero de 2018. [11 de septiembre de 2019]. Disponible en <http://www.saladeprensainexmoda.com/informe-textil-y-confeccion-noviembre-2018/>

MELGACO, Rosa. DE LA CRUZ, Patricia. CARDENAS, Cyntia & VALLADORES, María. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. [en línea]. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Medellín: 21 de diciembre de 2016. 40 p. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: <https://url2.cl/ZbrTa>

MILTON, Friedman. Price Theory, Chicago, American Journal of Agricultural Economics, Volume 45. p. 672-678: 1962.

MINITAB STATISTICAL SOFTWARE. Soporte de Minitab 18: interpretación de resultados clave para correlación. 2019. Tomado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/perform-the-analysis/select-the-method/>

MONGE, Sarai; SILVA, Adrián & BENGGOA, Christophe. Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. [ en línea]. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales, programa CYTED. Cataluña, España: 2016. ISBN: 978-84-09-08637-5 [Consultado 28, mayo, 2020]. Disponible en: [www.cyted.org](http://www.cyted.org)

MONTALVAN, Adelmo. et al. Industrial Multicriteria analysis for the integrated management of industrial wastewaters. [ en línea] Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba. 1 de abril de 2017. p. 56. [Consultado 28, mayo, 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3604/360450397006.pdf>

MONTES, Sebastián. \_\_\_\_ subió siete lugares hasta el segundo puesto en la industria textil. En: LA REPÚBLICA. [en línea]. Bogotá D.C. Editorial La República S.A.S, julio, 2019, [Consultado: 06 de enero de 2020]. Disponible en: [https://www.larepublica.co/empresas/empresa\\_textil-subio-siete-lugares-hasta-el-segundo-puesto-en-el-negocio-textil-2888017](https://www.larepublica.co/empresas/empresa_textil-subio-siete-lugares-hasta-el-segundo-puesto-en-el-negocio-textil-2888017)

MONTOYA, Nohora, CORREA, Juan. Cartas de Control Estadístico de Procesos en el Monitoreo de la Mortalidad Perinatal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2008

MORALES, Rodrigo. MEDINA, Wilson y PAREDES, Bolivar. Biofiltración sobre Cama de Turba, para el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes del Lavado de Jean. Ambato: [en línea]. Revista Universidad Técnica de Ambato Vol. 4 No 10.: 28 de junio de 2017. [Consultado 8, junio, 2020] Disponible en: <http://bitly.ws/8YCj>

MUSTAFA, Ana María, RODRÍGUEZ, Norma L. y CHAUVET, Susana. Control de calidad: Cartas de control por variables. Catamarca. Argentina.: congreso regional de ciencia y tecnología NOA 2002. 45 p.

ORGANISMO DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN AMBIENTAL – OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales. 1 edición. [En línea]. Lima, Perú. 2014. [10 de septiembre de 2019]. Disponible en [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)

ORTIZ, Enrique. Análisis de la cascarilla de arroz utilizada como material para filtros de tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Mecánica: 2018. [Consultado 5, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCC>

PEREZ, Hanoj et al. Balance social de empresa textil LTDA 2016. [En línea]. Febrero 2018. 50 p. [10 de noviembre de 2019]. Disponible en [https://issuu.com/empresatextiltlda/docs/balance\\_social\\_empresatextil\\_lda.\\_2016](https://issuu.com/empresatextiltlda/docs/balance_social_empresatextil_lda._2016). p. 42

PEREZ, Hanoj, et al. Informe de sostenibilidad de empresa textil LTDA 2017. [En línea]. Mayo 2019. 60 p. [11 de septiembre de 2019]. Disponible en: [https://issuu.com/empresatextilltda/docs/final\\_info\\_empresatextil\\_sostenibilidad\\_d.2019](https://issuu.com/empresatextilltda/docs/final_info_empresatextil_sostenibilidad_d.2019).

AGUASISTEC. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR. [En línea]. Bogotá D.C. [Consultado:17 de septiembre de 2019]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales.php>

PULIDO, Sandra, et al. Origen y Características de las aguas residuales. [En línea]. Bogotá D.C. [22 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>

QUILLIGANA, Luis. Análisis del bagazo de la caña de azúcar como filtro en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans "lavaclassic", ubicada en la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Mecánica: 2018. 115 p. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCi>

RESOLUCIÓN 0631 DE 2015. [En línea]. Bogotá D.C. [Consultado:17 de septiembre de 2019]. Disponible en: [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf)

ROZZI, A, et al. Textile wastewater reuse in Northern Italy. [en línea]. Elsevier Science Ltd. Gran Bretaña: 1999. 20 p. [Consultado 12, junio, 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/scientific-contributions/82626311\\_R\\_Bianchi](https://www.researchgate.net/scientific-contributions/82626311_R_Bianchi)

ROZZI, MALPEI, BONOMO y BIANCHI. TEXTILE WASTEWATER REUSE IN NORTHERN ITALY (COMO). EN: Elsevier Science Ltd. Gran Bretaña: Waf. Sci. Tech. Vol. 39, No.5, 1999. 300 p. [Consultado: 28 de junio de 2020]. S0273-1223(99)00093-1

SALAS, G. Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fentón) de aguas residuales de la industria textil. [en línea]. Revista Peruana de Ingeniería Química, Vol. 13, Perú: 2010. 45 p. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBV>

SALEM, Vidal. TINGIMENTO TÊXTIL. Sao pablo, Brasil: Blucher, 2010. 57 p.

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE (SENA). Guía de referencia: mantenimiento de bombas centrifugas. [en línea]. Serie de entrenamiento mecánico de Tel-A-Train. Colombia, 1995. [Consultado el día 29 de mayo de 2020] tomado de: <https://hdl.handle.net/11404/762>

SINHA, Shahnawaz, et al. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. [en línea]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2004. [Consultado 1, mayo, 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15504470/>

SOLANKI, Meena; NATH, Shakti y SHUKLA, Kanchan. Treatment of Real Textile Wastewater Using Coagulation Technology. Bhopal, India: Maulana Azad National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering. 2013. p. 212.

SREBRENKOSKA, Vineta, et al. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. Methods for Waste Waters Treatment in Textile Industry. International Scientific Conference. 2014

SUAREZ LÓPEZ, Joaquín; JÁCOME BURGOS, Alfredo & URES RODRÍGUEZ, Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, procesos de regulación-homogeneización. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. 30 p. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059> f05-fa5a-f906-0551-d94b40f0971b

\_\_\_\_\_. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Reacciones Fenton. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. 22 p. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBT>

\_\_\_\_\_. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, Flotación por aire disuelto. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. 35 p. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059> f05-fa5a-f906-0551-d94b40f0971b

\_\_\_\_\_. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Filtración en medio granular. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. p. 15. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059> f05-fa5a-f906-0551-d94b40f0971b.

\_\_\_\_\_. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Filtración en carbón activo. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. 35 p. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059>

com/documents/177327/558161/Reacciones+Fenton.pdf/09059 f05-fa5a-f906-0551-d94b40f0971b

\_\_\_\_\_. Fichas Técnicas De Etapas De Proceso De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales De La Industria Textil. Universidad de Coruña, España: INDITEX, 2014.

\_\_\_\_\_. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, tecnologías de deshidratación de fangos. [en línea]. Coruña, España: septiembre de 2015. 25. p. [consultado 2, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/2Xj03va>

PEREZ, Jessica. Evaluación de la sustitución del agente coagulante - sulfato de aluminio- en el proceso actual de coagulación- floculación de agua potable en la empresa eaf sas esp. [en línea]. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017. 130 p. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YBt>

SUPERINTENDENCIA DE SOCIEDADES. Informe del sector textil, estudio del retail en Colombia. Bogotá, Colombia. 2019

TRIANA, Edwin & BRICEÑO, Carlos. Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, se dispondrá en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. [en línea] Trabajo de grado para obtención del título de ingeniero civil. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2017. 82 p. [Consultado 3, mayo, 2020]. Disponible en: <https://bit.ly/30kk0UI>

TORRES, Anyel., VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), Bagazo de caña de azúcar (*saccharum officinarum*) y borra de café (*coffea arábica*) para la remoción del colorante azul brillante fcf. [en línea]. Trabajo de grado para la obtención de título de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del medio ambiente y recursos naturales. Bogotá D.C: 2018. 90 p. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <http://bitly.ws/8YCK>

TUSET, Sergio. Tratamiento para la eliminación del color en aguas residuales de la industria textil. Condorchem Envitech. [En línea]. 27 noviembre 2013. [07 de enero de 2020]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-para-la-eliminacion-del-color-en-aguas-residuales-de-la-industria-textil/>

VITORIANO, B. Teoría de la decisión con incertidumbre, decisión multicriterio y teoría de utilijuegos. [en línea]. Universidad de Complutense de Madrid: julio de 2007. 105 p. [Consultado 20, mayo, 2020]. Disponible en: [https://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a\\_dt\\_UCM.pdf](https://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a_dt_UCM.pdf)

WARD, J. Relaciones entre la estructura química de las fibras acrílicas y su comportamiento tintóreo, cursillos y conferencias. Laboratorio de Investigaciones de Tintura de Courtoulds, Ltd. Inglaterra.

WORKCLEAN. Catálogo de productos y servicios nafa. National Air Filtration Association. Purificación para sistemas de aire acondicionado y ventilación. [ En línea]. Disponible en [https://www.trspartes.com/wp-content/uploads/2018/02/Catalogo\\_Filtros\\_Workclean.pdf](https://www.trspartes.com/wp-content/uploads/2018/02/Catalogo_Filtros_Workclean.pdf)

## **ANEXOS**

## ANEXO A.

### CORRELACION DE SPERMAN Y PEARSON Y XLSTAT

Está utilizando la versión de evaluación de XLSTAT. Número de días restantes hasta que expire la e

XLSTAT 2020.3.1.5 - Pruebas de correlación - Comienzo: 20/06/2020 a las 08:08:14 / Final: 20/06/2020.  
 Observaciones / Variables cuantitativas: Libro = CORRELACIÓN.xlsx / Hoja = Hoja1 / Rango = 'Hoja1'!

Tipo de correlación: Spearman

Estadísticos descriptivos (Datos cuantitativos)

Estadísticos descriptivos (Datos cuantitativos):

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media
SST (ppm)	1047	0	1047	95,000	7408,000	480,246
Color	1047	0	1047	378,000	49240,000	5253,564
Ssed (mL/L-h)	1047	0	1047	0,100	102,000	1,083

Matriz de correlaciones (Spearman):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>1</b>	<b>0,089</b>	0,001
Color	<b>0,089</b>	<b>1</b>	0,055
Ssed (mL/L-h)	0,001	0,055	<b>1</b>

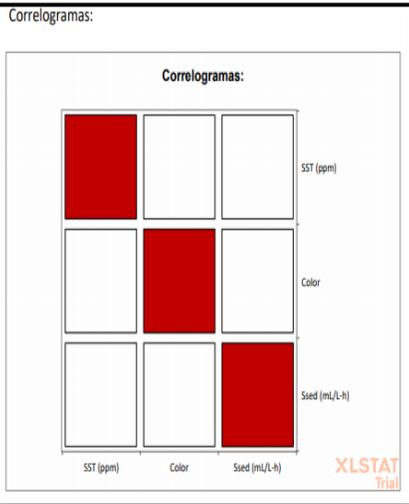
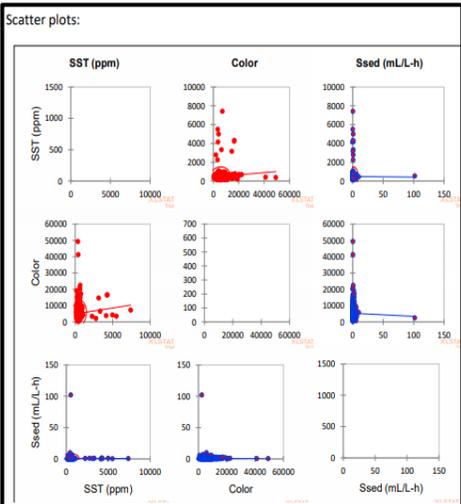
*Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05*

valores-p (Spearman):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>0</b>	<b>0,004</b>	0,977
Color	<b>0,004</b>	<b>0</b>	0,077
Ssed (mL/L-h)	0,977	0,077	<b>0</b>

Coefficientes de determinación (Spearman):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>1</b>	0,008	0,000
Color	0,008	<b>1</b>	0,003
Ssed (mL/L-h)	0,000	0,003	<b>1</b>



Está utilizando la versión de evaluación de XLSTAT. Número de días restantes hasta que expire la e

XLSTAT 2020.3.1.5 - Pruebas de correlación - Comienzo: 20/06/2020 a las 10:33:21 / Final: 20/06/2020.  
Observaciones / Variables cuantitativas: Libro = CORRELACIÓN.xlsx / Hoja = Hoja1 / Rango = 'Hoja1'!

Tipo de correlación: Pearson

Estadísticos descriptivos (Datos cuantitativos)

Estadísticos descriptivos (Datos cuantitativos):

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media
SST (ppm)	1047	0	1047	95,000	7408,000	480,246
Color	1047	0	1047	378,000	49240,000	5253,564
Ssed (mL/L-h)	1047	0	1047	0,100	102,000	1,083

Matriz de correlaciones (Pearson):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>1</b>	<b>0,093</b>	-0,005
Color	<b>0,093</b>	<b>1</b>	-0,019
Ssed (mL/L-h)	-0,005	-0,019	<b>1</b>

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05

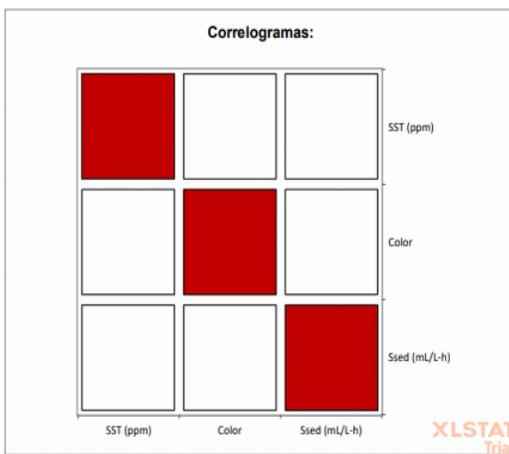
valores-p (Pearson):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>0</b>	<b>0,003</b>	0,870
Color	<b>0,003</b>	<b>0</b>	0,545
Ssed (mL/L-h)	0,870	0,545	<b>0</b>

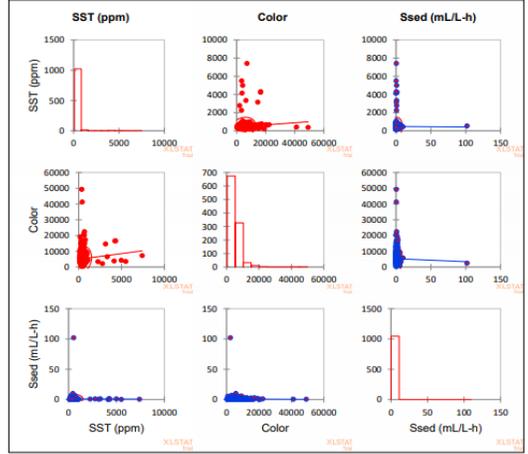
Coefficientes de determinación (Pearson):

Variables	SST (ppm)	Color	Ssed (mL/L-h)
SST (ppm)	<b>1</b>	0,009	0,000
Color	0,009	<b>1</b>	0,000
Ssed (mL/L-h)	0,000	0,000	<b>1</b>

Correlogramas:



Scatter plots:



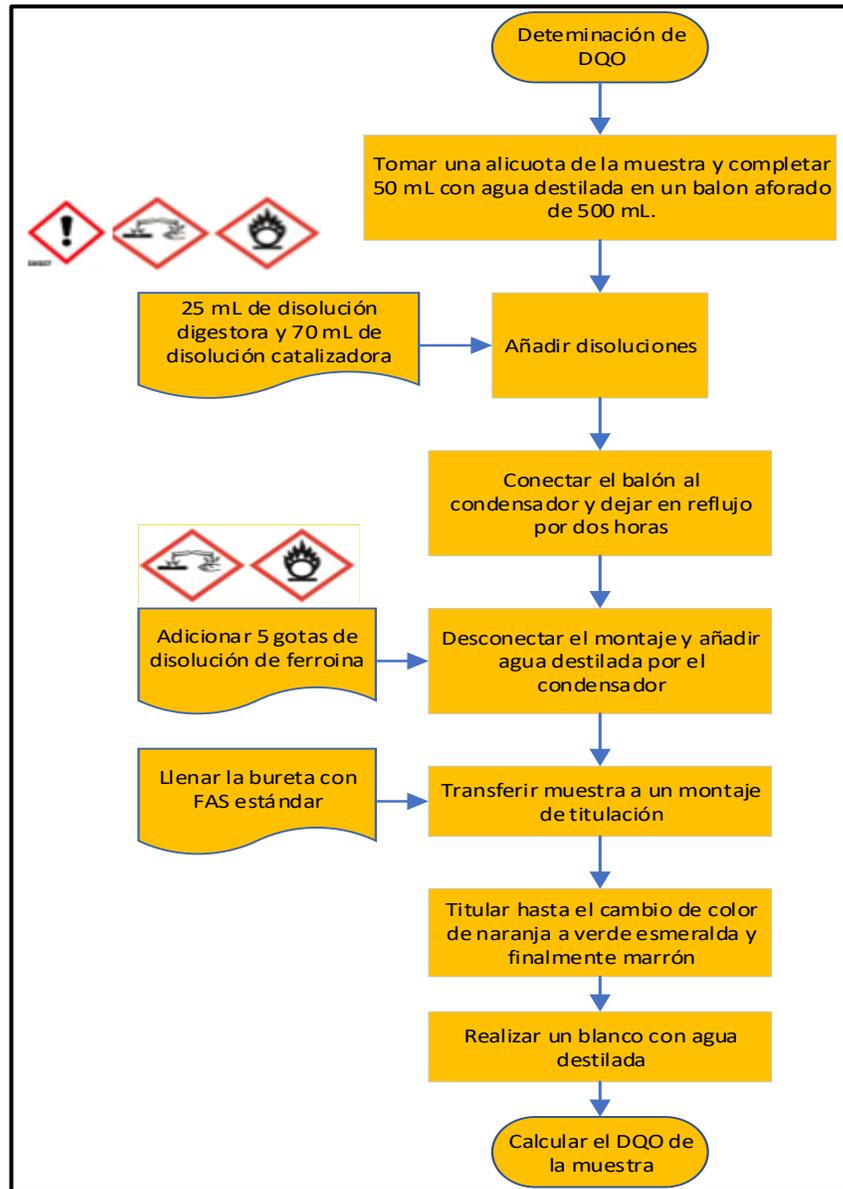
## ANEXO B.

### DISEÑO EXPERIMENTAL DE COAGULANTES

#### Toma de parámetros iniciales

Se hará la toma de parámetros iniciales para el agua respecto a la resolución 631 de 2015 y dentro de la cual se evaluarán Demanda Química de Oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos Suspendidos Totales, sólidos Sedimentables, pH, conductividad, color y temperatura. El proceso de cada parámetro se encuentra descrito a continuación:

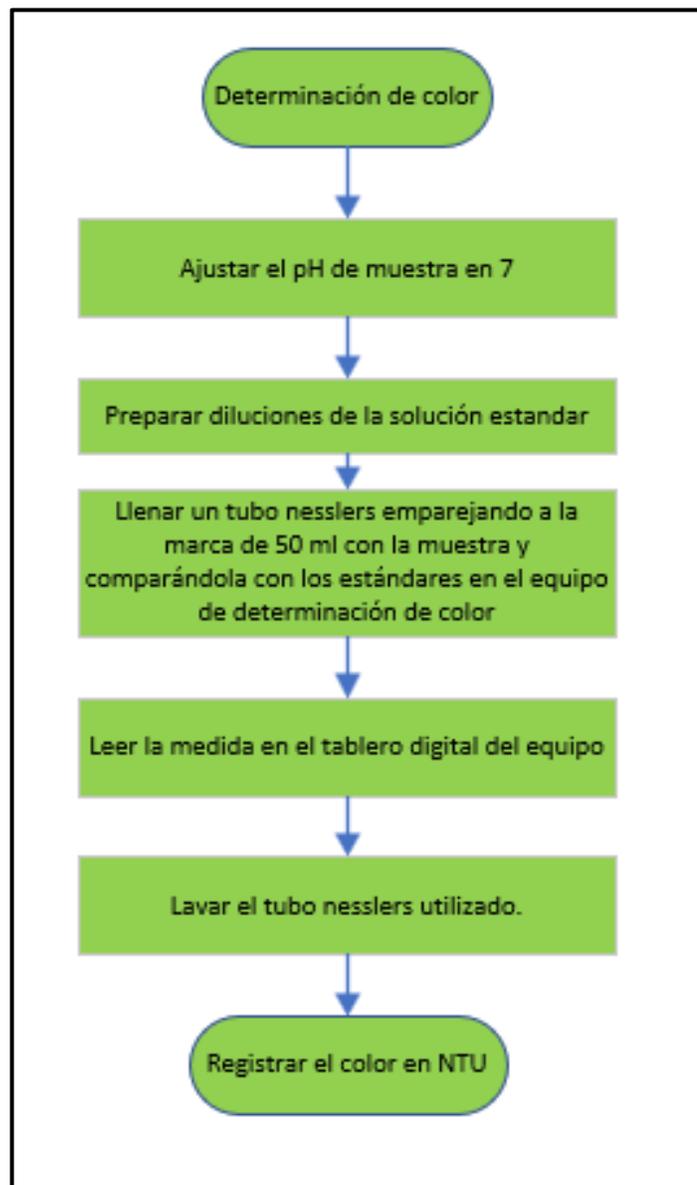
#### DQO



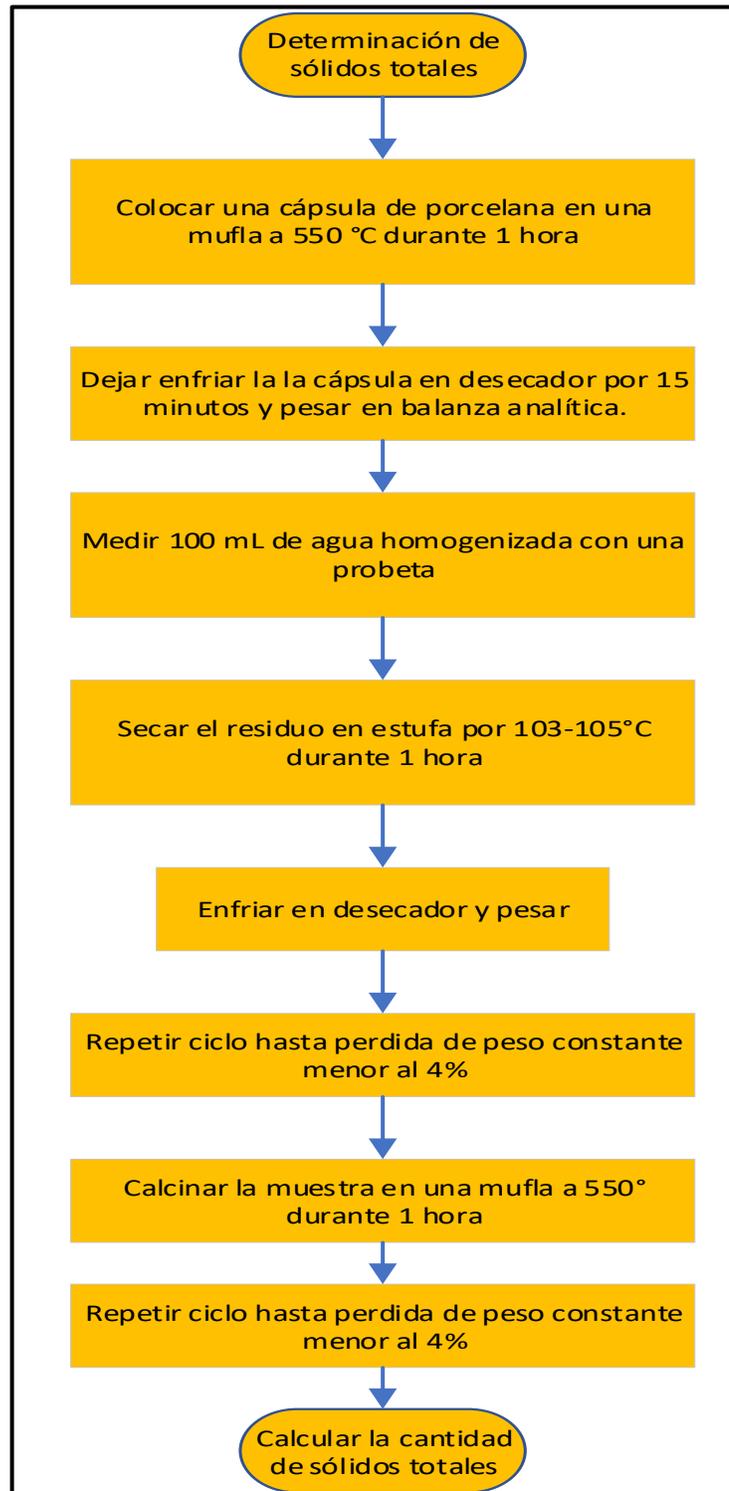
MAGNITUD	RÉPLICA	SIMBOLOGÍA	VALOR
Volumen de FAS gastado en el blanco (ml)	N/A	$V_B$	
Volumen de FAS gastado en la muestra (ml)	1	$V_1$	
Volumen de FAS gastado en la muestra (ml)	2	$V_2$	
Volumen de FAS gastado en la muestra (ml)	3	$V_3$	
Volumen promedio de FAS gastados en la muestra (ml)	N/A	$V_p$	
Desviación estándar de volumen de FAS gastados en la muestra (ml)	N/A	s	
Desviación estándar relativa de volumen de FAS gastados en la muestra (ml)	N/A	DER	
Normalidad del FAS	N/A	N	
Volumen de la muestra (ml)	N/A	$V_M$	

$$DQO \left( \frac{mg O_2}{L} \right) = \frac{(V_B - V_P) * N * 8000}{V_M}$$

## Color



## Sólidos suspendidos totales



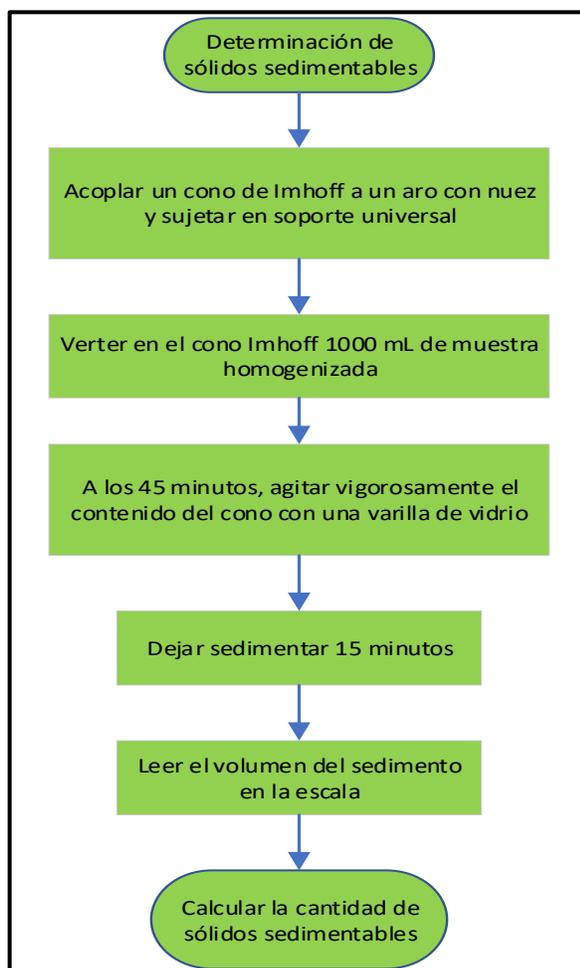
MAGNITUD	SIMBOLOGÍA	VALOR
Masa cápsula preparada (mg)	$m_1$	
Masa cápsula más residuo 103-105°C (mg)	$m_2$	
Masa cápsula más residuo 550°C (mg)	$m_3$	
Volumen de muestra (ml)	V	

$$ST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) * 1000}{V}$$

$$STF \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_3 - m_1) * 1000}{V}$$

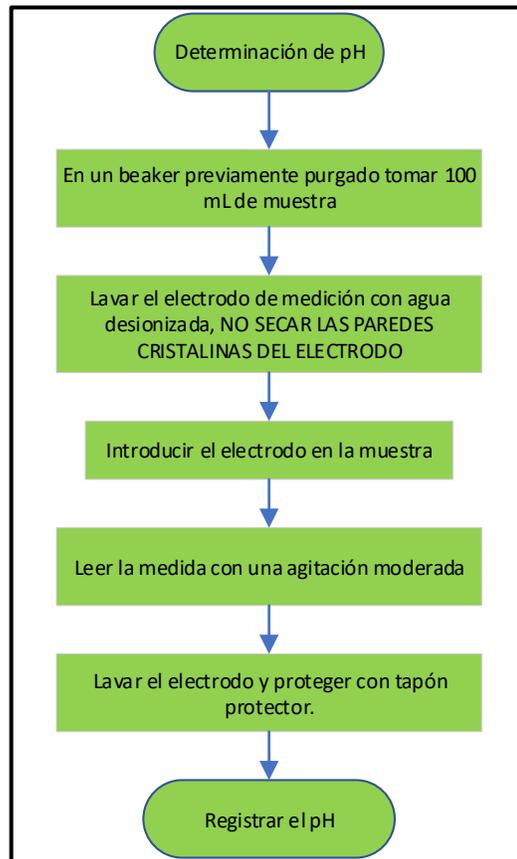
$$STV \left( \frac{mg}{L} \right) = ST - STF$$

### Sólidos sedimentables



## Determinación de pH óptimo

### Ilustración 1. Determinación de pH



En este proceso se evalúa el pH óptimo de los coagulantes a estudiar, (policloruro de aluminio y EXRO 616). El proceso se describe a continuación, cada uno debe tener 3 repeticiones.

MUESTRA	pH	TURBIDEZ
2	6	
3	7	
4	8	
5	9	

## Dosificación óptima

Ya seleccionado el pH óptimo para cada coagulante se procede a realizar una variación de las concentraciones con el fin de encontrar la dosificación óptima. Para el análisis de cada coagulante se hacen 3 repeticiones y se registran los datos como se muestra a continuación.

MUESTRA	CONCENTRACIONES	TURBIDEZ (NTU)
1	10	
2	20	
3	30	
4	40	
5	50	

MUESTRA	CONCENTRACIONES	TURBIDEZ (NTU)
1	500	
2	600	
3	700	
4	800	
5	900	
6	1000	

### Test de jarras

Se realizará un test de Jarras en donde se tendrán dos variables, el tipo de coagulante (Policloruro de aluminio y EXRO 616), cada uno se evaluará a su pH y dosificación óptima para evaluar la remoción de los diferentes parámetros de interés y registrarlos en la tabla, realizando 3 repeticiones para cada experimentación.

PARÁMETRO/ pH	INICIALES	FINALES POLICLORURO DE ALUMINIO	FINALES EXRO 616
DQO (mg/LO <sub>2</sub> )			
DBO (mg/LO <sub>2</sub> )			
Conductividad µc/cm			
pH			
SST mg/L			
Ssed mg/L			
Temperatura			
Color m <sup>-1</sup>			

### Humedad de los lodos

Para realizar el balance hídrico se necesita conocer la humedad de los lodos, para esto se evalúa el porcentaje de humedad removido a partir del siguiente proceso:

A partir de los resultados obtenidos se determina el porcentaje con la formula

PARÁMETRO	VALOR
peso del crisol (g)	
peso de la muestra húmeda (g)	
peso de la muestra seca (g)	

$$H = \frac{W1 - W2}{W} * 100$$

W1 Peso de la muestra húmeda

W2 peso de la muestra seca

W peso del crisol

## ANEXO C.

### ENCUESTAS DE COMPARACIÓN POR PARES

Según la escala de Saaty (imagen 1), califique de 1 a 9 la relación de importancia del primer factor mencionado (A) respecto al segundo factor mencionado (B). \*\* Por favor solo marque una respuesta por pregunta.

Imagen 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos criterios son de igual importancia
2	Término intermedio entre 1 y 3
3	Débil importancia de A sobre el B
4	Término intermedio entre 3 y 5
5	Importancia esencial de A sobre B
6	Término intermedio entre 5 y 7
7	Importancia demostrada de A sobre B
8	Término intermedio entre 7 y 9
9	Importancia absoluta de A sobre B

Fuente: Saaty (1994)

**MODELO DE PREGUNTA:** Teniendo en cuenta que 1 es igualdad de importancia y 9 es absoluta importancia de un factor sobre otro. Califique la relación de importancia de los parámetros, inicialmente defina si el parámetro A es más importante que el parámetro B o viceversa, con lo cual seleccione si marcará en la primera o en la segunda fila, posteriormente marque su respuesta siguiendo la escala de Saaty en la fila que ha seleccionado. Ejemplo:

Por favor solo marque una respuesta por pregunta, solo un número en una de las dos columnas.

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Teniendo en cuenta que 1 es igualdad de importancia y 9 es absoluta importancia de un factor sobre otro. Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto al COSTO DE CAPITAL (B) es:

Por favor solo marque una respuesta por pregunta.

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a VIDA ÚTIL (B) es:

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a VIDA ÚTIL (B) es:

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (B) es:

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a SIMPLICIDAD DEL PROCESO (B) es:

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a IMPACTO AMBIENTAL (B) es:

1   2   3   4   5   6   7   8   9

A más importante que B en:

B más importante que A en:

Considera que la relación de importancia de la REMOCIÓN DE PARÁMETROS (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE CAPITAL (A) respecto a VIDA ÚTIL (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE CAPITAL (A) respecto a COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE CAPITAL (A) respecto a SIMPLICIDAD DEL PROCESO (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE CAPITAL (A) respecto a IMPACTO AMBIENTAL (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE CAPITAL (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de VIDA ÚTIL (A) respecto a COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de VIDA ÚTIL (A) respecto a SIMPLICIDAD DEL PROCESO (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de VIDA ÚTIL (A) respecto a IMPACTO AMBIENTAL (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de SIMPLICIDAD DEL PROCESO (A) respecto a IMPACTO AMBIENTAL (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de VIDA ÚTIL (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de SIMPLICIDAD DEL PROCESO (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (A) respecto a SIMPLICIDAD DEL PROCESO (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de IMPACTO AMBIENTAL (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (A) respecto a IMPACTO AMBIENTAL (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

Considera que la relación de importancia de IMPACTO AMBIENTAL (A) respecto a ÁREA DE INSTALACIÓN (B) es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A mas importante que B en:	<input type="radio"/>								
B mas importante que A en:	<input type="radio"/>								

<  >

---

¿Considera que existe otro factor que se deba tener en cuenta para la selección del proceso?, en caso afirmativo ¿cuál?

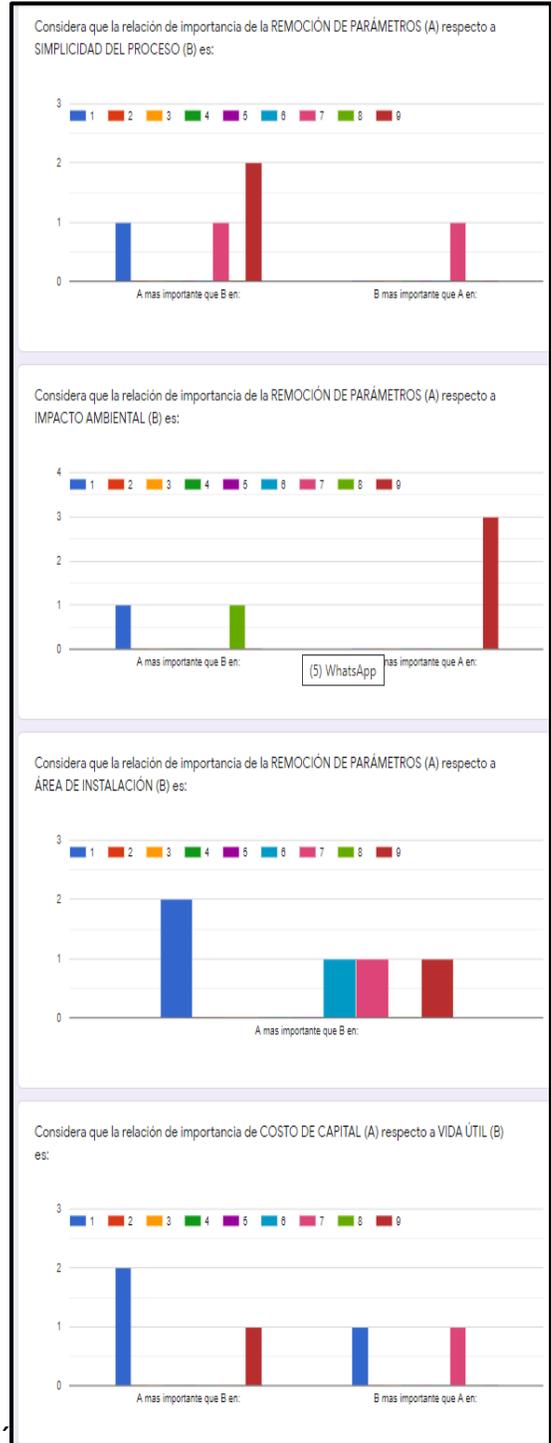
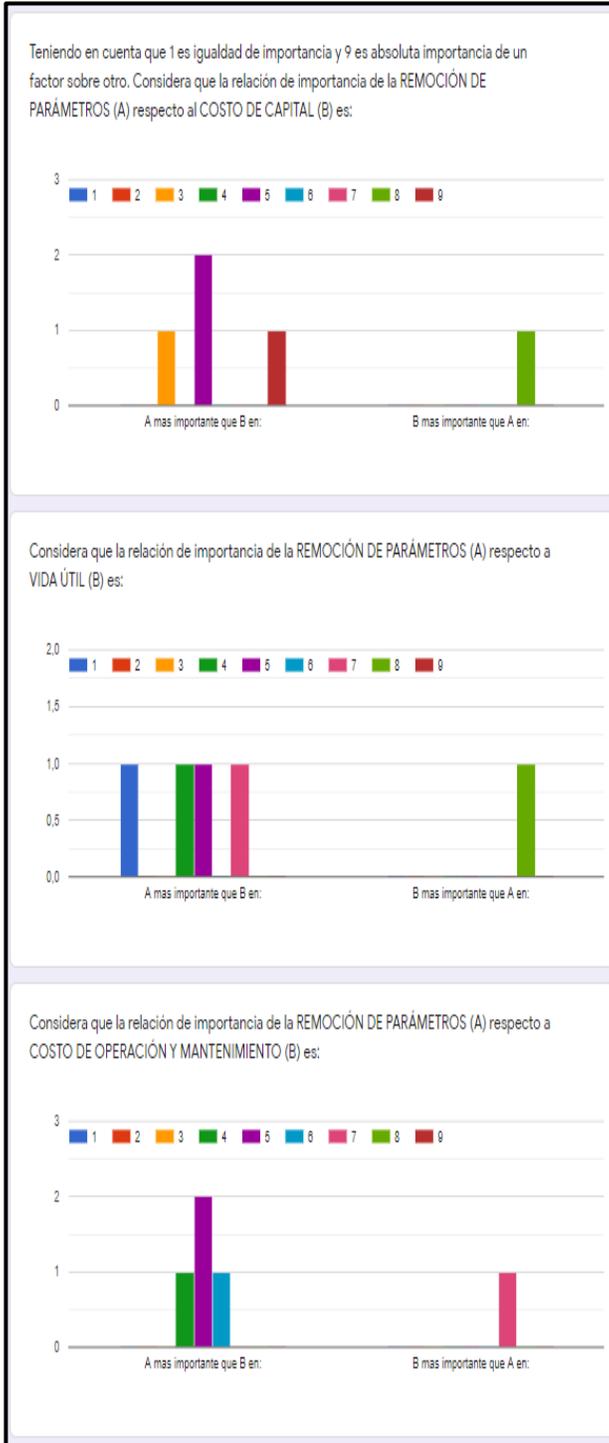
Tu respuesta

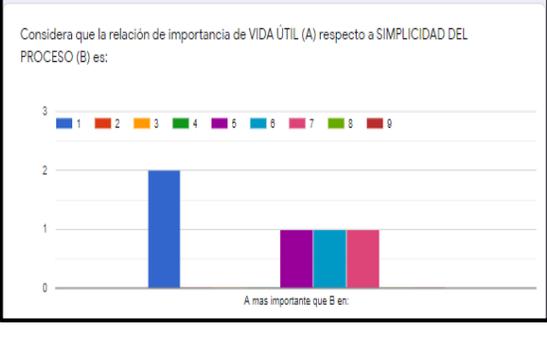
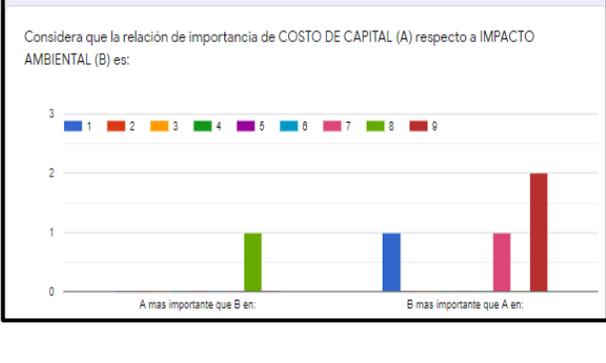
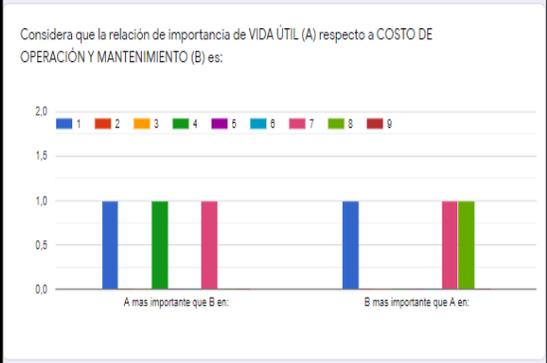
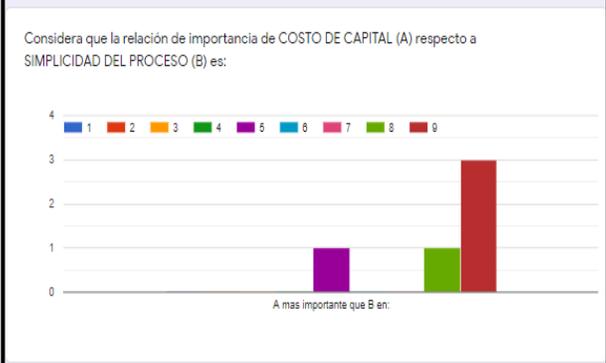
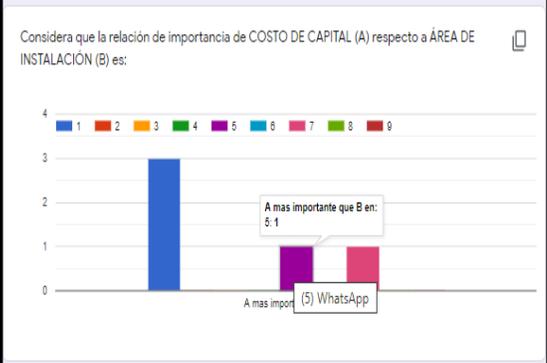
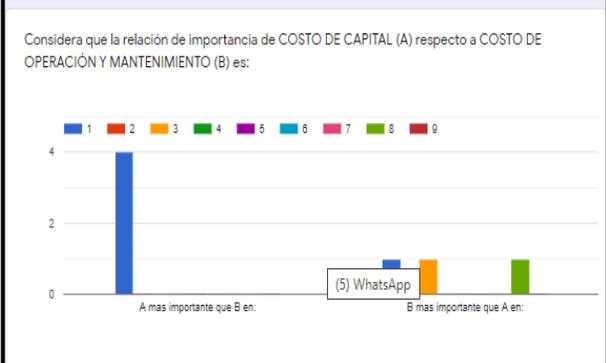
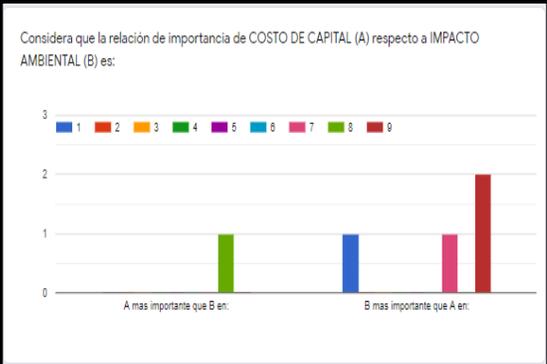
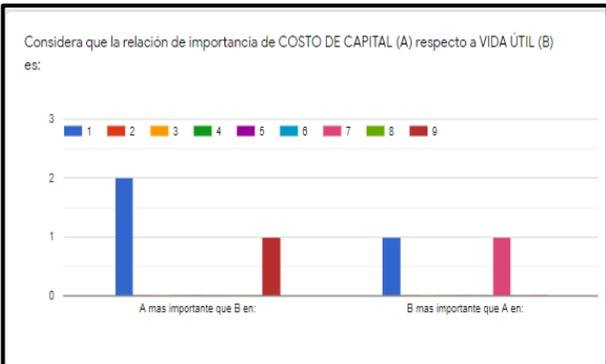
---

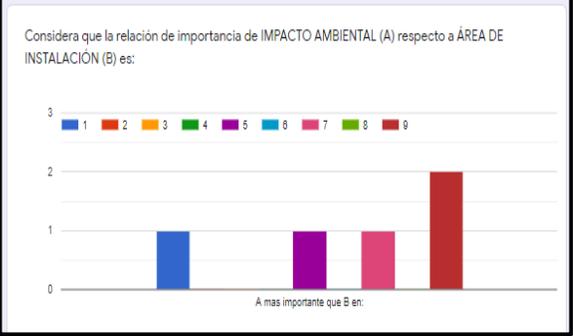
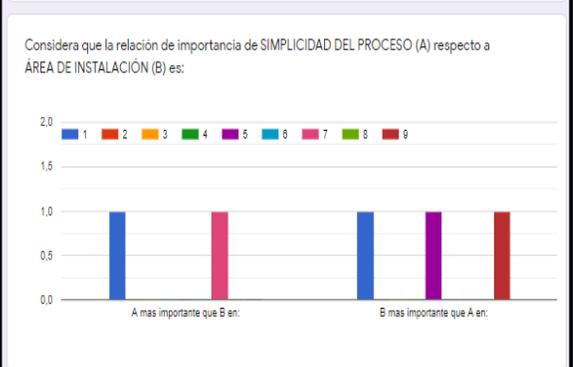
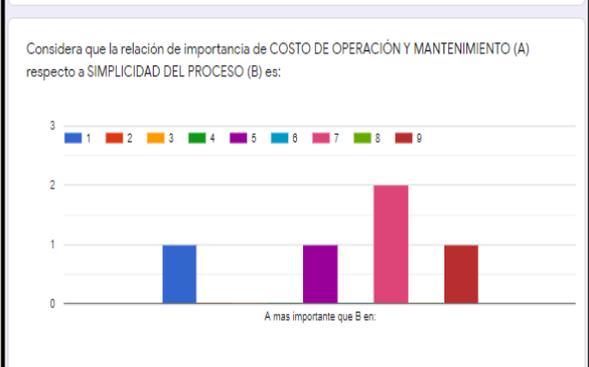
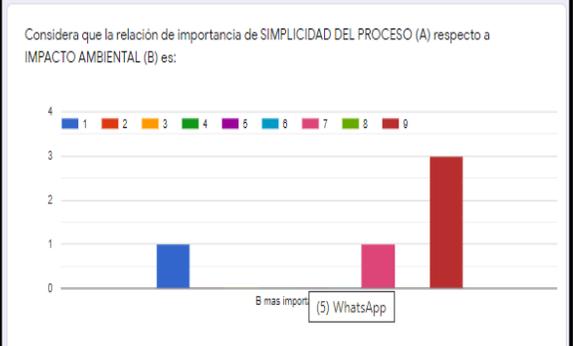
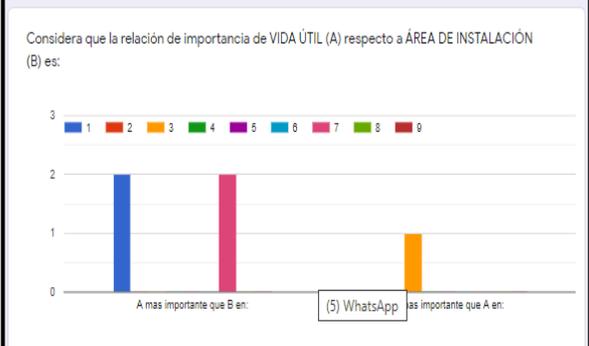
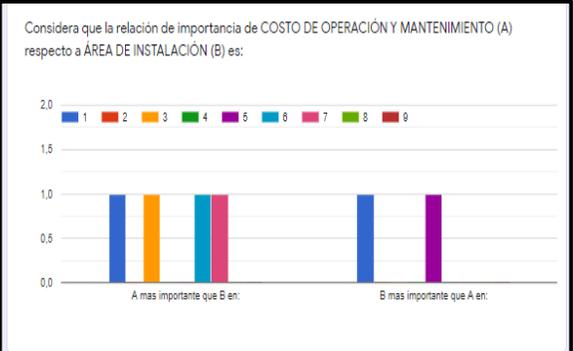
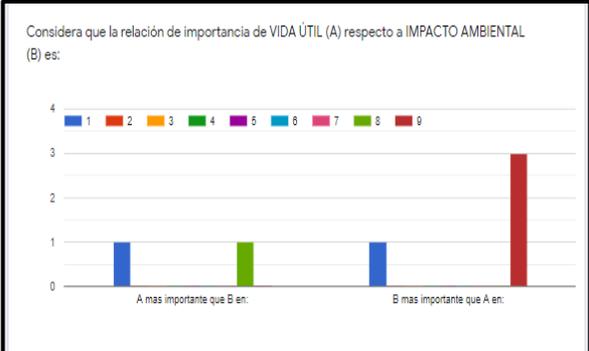
Los procesos de evaluación serán: Adsorbentes no convencionales, Ozonización y Fenton. ¿Recomienda evaluar otro tipo de proceso?, en caso afirmativo ¿cuál?

Tu respuesta

## ANEXO D. RESULTADOS ENCUESTA DE COMPARACIÓN POR PARES







¿Considera que existe otro factor que se deba tener en cuenta para la selección del proceso?, en caso afirmativo ¿cuál?

3 respuestas

NO

Disponibilidad de suministros

Manejo seguro de materias primas

(5) WhatsApp

---

Los procesos de evaluación serán: Adsorbentes no convencionales, Ozonización y Fenton.  
¿Recomienda evaluar otro tipo de proceso?, en caso afirmativo ¿cuál?

4 respuestas

NO

Auatomatizacion operacional de la planta

No

Electrolisis

**ANEXO E.**  
**ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO**  
PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Registro de equipos

Equipo	Descripción	Función/Capacidad
TC-01	Tanque de almacenamiento subterráneo	Almacenamiento de 30 m <sup>3</sup>
TZ-01	Tamiz vibratorio	Retirar sólidos (Pómez y tela) del efluente.
TK-01	Tanque pulmón con medidor de nivel	Almacenamiento de 10 m <sup>3</sup>
CT-01	Torres de enfriamiento	Reducción de temperatura en 6°C-8°C
TK-02	Tanque de homogeneización	Almacenamiento de 130 m <sup>3</sup> homogenizador con flauta
TK-03	Tanque de almacenamiento	Almacenamiento de reactivos (Decolorante y regulador de pH)
TK-04	Tanque de almacenamiento	Almacenamiento de reactivos (Coagulante)
SP-01	Serpentín	Reacción del coagulante
TK-05	Tanque de almacenamiento	Almacenamiento de reactivos (Floculante)
DF-01	DAF	Proceso de coagulación-floculación
EA-01	Espesador	Homogeneización de lodos
FP-01	Filtro prensa	Remoción de humedad del lodo
FA-01 A/B	Filtros de arena	Limpieza del efluente
FLC-01 A/B	Filtros de carbón activado	Limpieza del efluente

Equipo	Función/Descripción
Tablero de control	Activación de la bomba de paso de fluido de TC-01 al tamiz vibratorio, bombas centrifugas del tanque subterráneo y bombas del homogeneizador, encendido de filtro box.

PA-01 A/B	Paso de fluido de tanque subterráneo a tamiz vibratorio bombas centrifugas
PA-02 A/B	Paso de fluido de tanque pulmón a torres de enfriamiento Bomba centrifuga)
	Paso de fluido de torres de enfriamiento a tanque homogeneizador por gravedad
PA-04	Paso de fluido por el serpentín
PA-05	Paso de lodos de DAF a espesador (bomba neumática)
PA-06	Paso de fluido de DAF a filtros

### Descripción de las actividades para mantenimiento

DAF	
Inicio de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprobación del funcionamiento del puente mediante arranque y parada accionando el interruptor de seguridad y maniobra.</li> <li>• Comprobación del funcionamiento de las bombas de presurización.</li> <li>• Verificación de presiones y caudales del equipo de presurización.</li> <li>• Revisión del bombeo de fangos espesados.</li> <li>• Verificar el funcionamiento del dosificador</li> </ul>
Mantenimiento diario	<p>Medición de parámetros en afluente y efluente cada dos horas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólidos (SST y Ssed)</li> <li>• Turbidez</li> <li>• Concentración del fango retirado por las rasquetas.</li> <li>• Conductividad.</li> <li>• Color</li> <li>• pH</li> <li>• dosificaciones coagulante-floculante</li> </ul> <p>Medición de parámetros en afluente y efluente diario:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DQO</li> <li>• Grasas y aceites</li> </ul>
Mantenimiento semanal	Verificación de presiones y caudales del equipo de presurización
Mantenimiento mensual	Visualización del tipo de burbuja.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de avance de rasquetas.</li> </ul>
Filtros de lecho	
Inicio de operación	<p>Mantener caudal constante</p> <p>Verificar funcionamiento de bombas</p> <p>Verificar que las válvulas estén funcionando en forma adecuada.</p>
Mantenimiento diario	<p>Cada dos horas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar una pérdida de carga no superior a 2,2 psi</li> <li>• Realizar retro lavado suele llevarse a cabo cuando la perdida de carga alcanza 35 psi para filtros de arena y 20 psi para filtros de carbón.</li> </ul>
Mantenimiento mensual	Verificar la altura del lecho en el interior del filtro.
Mantenimiento anual	<p>Mantenimiento de las estructuras exteriores (sandblasting para la zona interna y pintura anticorrosiva para la zona externa)</p> <p>De 3 a 5 años</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambiar y verificar el material filtrante.</li> </ul>
Filtro box	
Inicio de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisar si hay ruido o vibración anormal</li> <li>• Observar si la corriente eléctrica es estable.</li> <li>• Revisar que la malla está limpia</li> </ul>
Mantenimiento diario	<p>Después de cada descarga</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retirar sólidos retenidos en la malla</li> </ul>
Mantenimiento semanal	Lubricar el equipo
Mantenimiento mensual	Revisar si las mallas o primaveras están dañadas
Prensa tornillo	
Mantenimiento diario	Medición de la humedad de lodos
Torres de enfriamiento	
Mantenimiento diario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir la temperatura en la corriente afluente y efluente de las torres.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar que los sólidos suspendidos totales de la corriente afluyente sean menores a 5000 ppm</li> </ul>
Mantenimiento semestral	Limpieza de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las paletas del ventilador</li> <li>• Los conductos de circulación de aire</li> <li>• El relleno</li> </ul>
Tanques de almacenamiento	
Mantenimiento semestral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza general</li> <li>• Revisión de sistema de homogenización</li> </ul>

**ANEXO F.**  
**FORMATOS REGISTRO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PTAR**

HISTORIAL DEL EQUIPO  
 PTAR PERMODA

EQUIPO \_\_\_\_\_

FECHA	SERVICIO O CAMBIO REALIZADO	EMPRESA QUE LO REALIZA	OBSERVACIONES

REGISTRO DE ACTIVIDAD DE REVISIÓN DIARIA-SEMANAL  
 MANTENIMIENTO PREVENTIVO PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

MES \_\_\_\_\_

DÍA	TANQUES	DAF	FILTROS	BOMBAS	FILTRO BOX	TORRES ENFRIAMIENTO	OTROS
1							
2							
3							
4							

5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							

25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							

OBSERVACIONES DE REGISTRO DE ACTIVIDAD DE REVISIÓN ANUAL  
MANTENIMIENTO  
PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

AÑO \_\_\_\_\_

FECHA	CODIGO ACTIVIDAD- EQUIPO	OBSERVACIÓN

REGISTRO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO ANUAL  
PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

AÑO \_\_\_\_\_

FECHA	EQUIPO	MANTENIMIENTO REALIZADO	SOLICITUD DE MATERIAL	OBSERVACIONES

REGISTRO DE CALIBRACIÓN ANUAL  
LABORATORIO-PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

AÑO \_\_\_\_\_

FECHA	EQUIPO	REVISION REALIZADA	EMPRESA QUE LO REALIZÓ	OBSERVACIONES

REGISTRO DE ACTIVIDAD DE REVISIÓN DIARIA- MANTENIMIENTO  
LABORATORIO PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

MES \_\_\_\_\_

DÍA	ACTIVIDAD A REALIZAR	EQUIPO	OBSERVACIÓN
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			

OBSERVACIONES DE REGISTRO DE ACTIVIDAD DE REVISIÓN DIARIA-MANTENIMIENTO  
LABORATORIO PTAR PERMODA

ENCARGADO \_\_\_\_\_

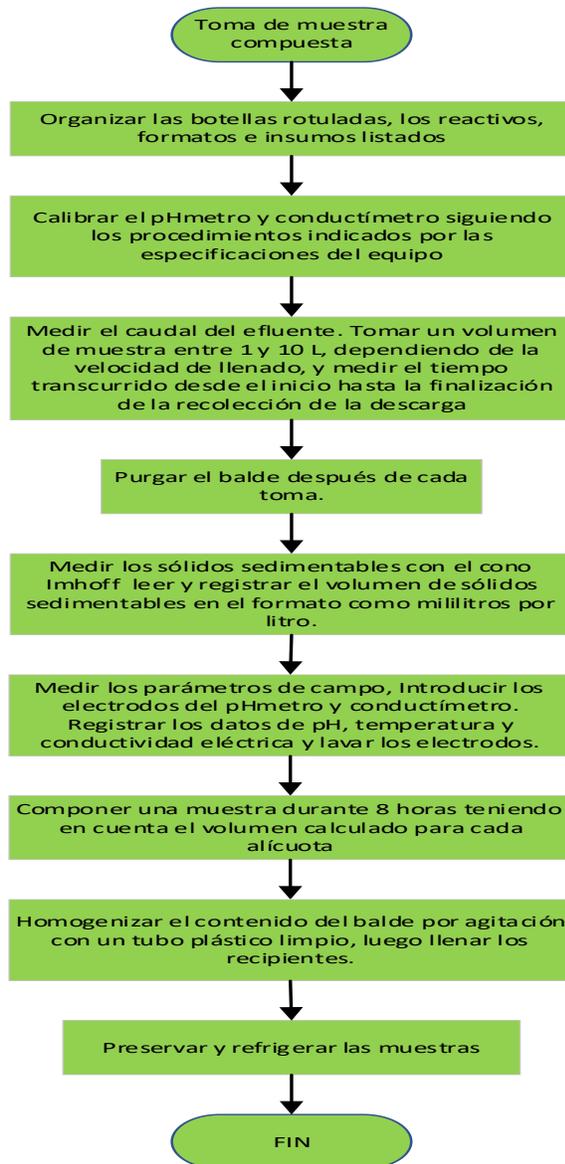
MES \_\_\_\_\_

DÍA	EQUIPO/ACTIVIDAD	OBSERVACIÓN

## ANEXO G. TOMA DE MUESTRAS

Se toman muestras en tres puntos: corriente de ingreso al DAF, corriente de salida del DAF y el punto de vertimiento. Los dos primeros puntos son tomados de tubería con ayuda de una válvula de muestreo y el último punto se toma directamente de la alcantarilla de vertimiento.

Los muestreos de 8 horas se realizan conforme al diagrama establecido



Para determinar los volúmenes de cada alícuota en la muestra compuesta, se utiliza la ecuación a continuación:

$$v_i = \frac{V * Q_i}{n * Q_p}$$

Donde:

$v_i$  = Volumen de cada alícuota o porción de muestra

$V$  = Volumen total a componer en este caso 50 L

$Q_i$  = Caudal instantáneo de cada muestra

$Q_p$  = Caudal promedio durante el muestreo

$n$  = Número de muestras definidas, en este caso 16 muestras

PARÁMETRO A ANALIZAR	CONSERVACIÓN	MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
Cloruros	No requiere	28d
Color	Refrigeración	48h/48h
DBO	Refrigeración	6h/48h
DQO	Analizar tan pronto sea posible, o adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a pH < 2.0, refrigerar	7d/28d
Temperatura	Tomar inmediatamente	0.25 h/ 0.25 h
Sólidos totales	Tomar inmediatamente	0.25 h/ 0.25 h
pH	Tomar inmediatamente	0.25 h/ 0.25 h

Se realizó un muestreo de 6 horas, para la toma de una muestra compuesta. Se registraron los parámetros in situ como lo establece el protocolo de toma de muestras de aguas residuales del IDEAM. Finalmente se tomaron 50 litros de agua residual requeridos para la experimentación. Se muestran los parámetros tomados para una muestra compuesta de 50 litros.

Se debe especificar en el formato las condiciones de toma de muestra (Fecha 13-03-2020, Responsables: Angelica Rodríguez-Karolina Salinas).

MUESTRA	HORA	CANTIDAD (L)	pH	CONDUCTIVIDAD (Usm/Cm)	COLOR APARENTE	T (°C)	CAUDAL INST(S/L)	SSE D (PPM)
1	8:46	5	8	7970,5	Morado oscuro	33,6	23,22	3987
2	9:16	5	8	8545	Morado oscuro	38,5	19,6	4272
3	9:46	5	8	7424	Morado oscuro	40,7	25,07	3712
4	10:16	5	8	4836	Vinotinto oscuro	36,7	40,41	2433
5	10:46	5	9	7366	Azul oscuro	42,5	23,26	3683
6	11:16	5	8	7366	Azul oscuro	41	27,01	3683
7	11:46	5	8	8921	Azul oscuro	42,1	20,85	4466
8	12:16	5	9	3835	Azul oscuro	43,8	21,43	1917
9	12:46	5	8	7538	Azul oscuro	43,5	22,37	3769
10	13:16	5	8	6605	Azul oscuro	40,7	20,12	3302
11	13:46	5	8	5501	gris oscuro	44,3	21,19	2750
12	14:16	5	8	5391	gris oscuro	44,7	20,1	2699