

Maestría en Ingeniería Civil

**Evaluación de la calidad del agua de la Planta de Tratamiento de Agua
Residual Industrial de la Tintorería ASITEX S.A.**

Julian Camilo Espejo Rincón

Bogotá, D.C., 02 de diciembre de 2019



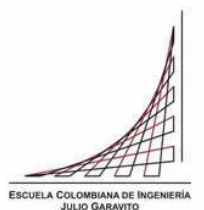
**Evaluación de la calidad del agua de la Planta de Tratamiento de Agua
Residual Industrial de la Tintorería ASITEX S.A.**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

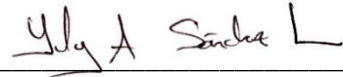
Ing. Yuly Andrea Sánchez Londoño

Director

Bogotá, D.C., 02 de diciembre de 2019



La tesis de maestría titulada “Evaluación de la calidad del agua de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial de la Tintorería ASITEX S.A.”, presentada por Julian Camilo Espejo Rincón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.



Director de la tesis

Ing. Yuly Andrea Sánchez Londoño

Jurado

Ing. Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

Ing. María Paulina Villegas Brigarth

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradezco a Dios quien ha permitido mi desarrollo académico, profesional y personal, brindándome todas las posibilidades para hacer lo propuesto. A la ingeniera Angélica Rojas de ASITEX S.A. y a la empresa misma, quien otorgó la posibilidad de desarrollar el trabajo, compartiendo la información, permitiendo el acceso a sus instalaciones y disponiendo de su tiempo para aclarar inquietudes. A mi novia Amparo Reina quien fue muy importante en el proceso revisión y elaboración del trabajo ya que con su compañía y apoyo me motivaron a continuar en momentos donde por falta de tiempo parecía difícil terminar los análisis y el documento. A mi directora de tesis Yuly Sanchez quien con sus conocimientos enfocó el trabajo y a mis padres y demás familiares que siempre me han brindado un apoyo incondicional y me han formado en valores.

RESUMEN

El manejo inadecuado de las aguas residuales, domésticas e industriales, ha causado deterioro de nuestros cuerpos de agua. En Colombia se está tratando de mitigar la contaminación por medio de la resolución 0631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), por la 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. Por esta razón las industrias en general han tenido que adaptar o mejorar los procesos de tratamiento a fin de cumplir con la normatividad.

Siendo que el sector textil es uno de los que genera mayor contaminación, en especial cuando se tienen procesos de teñido debido a que este proceso se hace en un medio acuoso a altas temperaturas y no todo el tinte y otros químicos usados quedan adheridos a las telas.

Por lo anterior se definió evaluar la calidad del agua de la planta de tratamiento de agua residual industrial de la tintorería ASITEX, verificando el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 del MADS, analizando los procesos productivos que se desarrollan en la empresa para finalmente después de analizar distintos tipos de tratamiento para este tipo de aguas, presentar de manera general dos alternativas de tratamiento basados en revisión de literatura y en análisis realizados a una muestra de las aguas residuales sacadas del tanque de homogenización de la PTAR de la empresa.

La primera alternativa consiste en la implementación de un sistema de electrocoagulación por medio de celdas con electrodos de hierro y aluminio, con posterior tratamiento químico usando un polímero orgánico, de los análisis realizados se observan resultados notables en la disminución de color. La segunda es un proceso de oxidación avanzada con ozono complementado con electrocoagulación que puede generar una disminución en los químicos que actualmente se usan en la empresa debido a la oxidación fuerte con ozono previo al proceso de coagulación floculación.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ANTECEDENTES	14
1. OBJETIVOS	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Industria textil.	16
2.1.1. Hiladuría.....	16
2.1.2. Tejeduría.....	17
2.1.3. Tintorería.....	17
2.1.4. Acabados textiles.....	18
2.2. Principales contaminantes en la industria textil.....	19
3.2.1 Colorantes directos.....	20
3.2.2 Colorantes reactivos.....	21
3.2.3 Colorantes dispersos.....	21
2.3. Tratamiento del agua residual en la industria textil	21
2.3.1. Procesos biológicos.....	24
2.3.2. Oxidación avanzada.....	25
2.3.3. Membranas.....	26
3. MARCO NORMATIVO	27
3.1. Historia de la normatividad en materia de vertimientos	27
3.2. Normativa actual (resolución 0631 de 2015 del MADS).....	30
4. METODOLOGÍA	33
4.1. Localización y caso de estudio	33
4.2. Muestreo y toma de datos	33
4.2.1. Características generales de los elementos a analizar.....	33
4.2.1.1. Cadmio.....	33
4.2.1.2. Cloruros.....	34
4.2.1.3. Cobalto.....	34
4.2.1.4. Cobre.....	34
4.2.1.5. Color.....	35

4.2.1.6.	Compuestos Fenólicos.....	35
4.2.1.7.	Cromo.....	35
4.2.1.8.	DBO.....	36
4.2.1.9.	DQO.....	36
4.2.1.10.	Grasas y Aceites.....	37
4.2.1.11.	Hidrocarburos Totales.....	37
4.2.1.12.	Níquel.....	37
4.2.1.13.	pH.....	38
4.2.1.14.	Plomo.....	38
4.2.1.15.	SSED.....	38
4.2.1.16.	SST.....	39
4.2.1.17.	Sulfuros Totales.....	39
4.2.1.18.	Temperatura.....	39
4.2.1.19.	Tensoactivos (SAAM)	40
4.2.1.20.	Zinc.....	40
4.3.	Análisis de laboratorio	41
4.4.	Análisis de resultados y discusión	43
5.	CASO DE ESTUDIO.....	45
5.1.	Tintorería ASITEX.....	45
5.2.	Descripción del proceso productivo	47
5.2.1.	Tejeduría.....	47
5.2.2.	Tintorería.....	47
5.2.3.	Acabados.....	48
5.3.	Descripción de la planta de tratamiento de agua residual de ASITEX.....	48
5.3.1.	Almacenamiento de agua cruda (tanque de homogeneización).....	49
5.3.2.	Torre de Enfriamiento.....	49
5.3.3.	Medidor de pH.....	50
5.3.4.	Tanque Primario.....	50
5.3.5.	Sedimentador.....	50
5.3.6.	Tanques de retención.....	51
5.3.7.	Tanque de equilibrio.....	51
5.3.8.	Filtros.....	51
5.3.9.	Tanque de Oxidación.....	52

5.3.10.	Tanque de recepción de lodos.....	53
5.3.11.	Lechos de Secado.....	53
5.3.12.	Tableros de control y mando.....	53
5.4.	Cambios importantes de la PTARI en el tiempo.....	54
5.5.	Estado actual de la PTARI.....	54
5.6.	PORCENTAJES DE REMOCIÓN.....	56
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
6.1.	Cumplimiento normativo	59
6.1.1.	Verificación gráfica.....	59
6.1.2.	Parámetros por fuera de norma.....	68
6.2.	Alternativas de tratamiento	70
6.3.	Soluciones propuestas	71
6.3.1.	Electrocoagulación antes de coagulación química complementado con aplicación de polímero orgánico.....	71
6.3.2.	Oxidación avanzada con ozono complementado con electrocoagulación...	76
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFIA.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales Contaminantes de la Industria Textil.....	20
Tabla 2 Principales Parámetros exigidos por Decreto 1594 de 1984.....	28
Tabla 3 Usuarios nuevos y existentes Decreto 1594 de 1984.....	28
Tabla 4 Valores de referencia de sustancias de interés sanitario para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado - Resolución 3957 de 2009.....	29
Tabla 5 Valores de referencia de otros parámetros para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado - Resolución 3957 de 2009.....	29
Tabla 6 Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en Colombia para la industria textil.....	31
Tabla 7 Resumen de caracterizaciones efluente PTARI ASITEX.....	41
Tabla 8 Método de medición de parámetros.....	43
Tabla 9 Modificaciones de la PTARI en el tiempo.....	54
Tabla 10 Resultados afluente PTARI.....	56
Tabla 11 Resultados efluente PTARI.....	57
Tabla 12 Remoción histórica.....	58
Tabla 13 Cuadro resumen de parámetros que presentan incumplimiento de la normativa por año.....	69
Tabla 14 Parámetros que incumplen y eficiencia requerida.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Procesos de Tratamiento de Aguas residuales para la Industria Textil.....	24
Figura 2 Localización ASITEX S.A.	45
Figura 3 Dosificador Automático de Colorantes.	46
Figura 4 Máquinas de Tejeduría.....	47
Figura 5 Máquinas de tintorería.....	48
Figura 6 Máquinas de acabados.	48
Figura 7 Disposición de elementos de la PTARII.	49
Figura 8 Torre de Enfriamiento,	50
Figura 9 Tren de Filtración.	52
Figura 10 Lechos de Secado	53
Figura 11 Panorámica PTARII	54
Figura 12 Diagrama de flujo alternativa 1	72
Figura 13 Muestra de agua cruda.	74
Figura 14 Celda de electrofloculación	75
Figura 15 Pruebas de jarras.....	75
Figura 16 Agua filtrada.....	76
Figura 17 Diagrama de flujo alternativa 2.....	78

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Resultados y normativa para el parámetro DQO.....	59
Gráfica 2	Resultados y normativa para el parámetro DBO5.....	60
Gráfica 3	Resultados y normativa para el parámetro Grasas y aceites	60
Gráfica 4	Resultados y normativa para el parámetro pH	61
Gráfica 5	Resultados y normativa para el parámetro SSED	61
Gráfica 6	Resultados y normativa para el parámetro SSED 2	62
Gráfica 7	Resultados y normativa para el parámetro SST.....	62
Gráfica 8	Resultados y normativa para el parámetro Temperatura	63
Gráfica 9	Resultados y normativa para el parámetro Sulfuros totales	63
Gráfica 10	Resultados y normativa para el parámetro Cadmio total.....	64
Gráfica 11	Resultados y normativa para el parámetro Cobre total	64
Gráfica 12	Resultados y normativa para el parámetro Compuestos fenólicos.....	65
Gráfica 13	Resultados y normativa para el parámetro Cromo total	65
Gráfica 14	Resultados y normativa para el parámetro Plomo total.....	66
Gráfica 15	Resultados y normativa para el parámetro Hidrocarburos totales	66
Gráfica 16	Resultados y normativa para el parámetro Cloruros	67
Gráfica 17	Resultados y normativa para el parámetro Zinc.....	67
Gráfica 18	Resultados y normativa para el parámetro Cobalto	68
Gráfica 19	Resultados y normativa para el parámetro Níquel	68

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de las aguas residuales, domésticas e industriales, ha causado deterioro de nuestros cuerpos de agua. En Colombia se ha buscado la manera de mitigar la contaminación mediante leyes que han ido cambiando. En los artículos 72 y 73 del decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, por el cual se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos, se estableció que para vertimientos industriales a cuerpos de agua superficial y a una red de alcantarillado público se debía cumplir como mínimo con una remoción >80% en carga de sólidos suspendidos (SS) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) entre otros parámetros. En marzo de 2015 se publica la Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la cual cambia el concepto de porcentajes de remoción y establece las concentraciones límites máximas permisibles para vertimientos a cuerpos de agua superficial y al alcantarillado público; los parámetros a medir y los límites máximos varían dependiendo del tipo de actividad que se desarrolle.

El cambio en la normatividad generó la necesidad de que todas las empresas que tienen vertimientos industriales ajusten sus procesos productivos internos o sus procesos de tratamiento para dar cumplimiento a lo estipulado por el MADS.

La industria textil se ha convertido en un pilar muy importante en el desarrollo del país, y a su alrededor se ha construido una compleja y diversificada actividad manufacturera y de servicios como es el lavado y teñido de prendas de vestir, convirtiéndose en uno de los mayores consumidores del agua donde los procesos más importantes se efectúan sobre medios acuosos, en donde cada operación va generando residuos líquidos con distintas concentraciones de elementos o sustancias que si no son manejados adecuadamente pueden generar incumplimiento de la normativa, que sin duda alguna conlleva a impactos negativos en los cursos de las aguas receptoras, por lo que antes de ser vertidas deben recibir algún tipo de tratamiento que modifique sus condiciones iniciales.

El sector de mayor interés desde el ámbito ambiental dentro de la cadena productiva de la industria textil es la fabricación y acabados, donde la problemática se basa principalmente en las descargas con alto contenidos de colorantes, temperaturas elevadas, pH básicos, DBO alto y generación de desechos peligrosos, una vez que se involucran una gran variedad de productos químicos y colorantes que, si no son manejados correctamente, son altamente contaminantes.

Por lo tanto, el sector textil se puede catalogar como de alta significación ambiental siendo el impacto más negativo en los efluentes líquidos, siendo este un motivo suficiente para analizar la evaluación de la calidad de agua de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Empresa ASITEX S.A., empresa que ha determinado como una de sus políticas ambientales la prevención de la contaminación, para lo cual brinda todo su apoyo en esta investigación.

La empresa textil, ASITEX S.A., se encuentra localizada en la ciudad de Bogotá, específicamente en el sector de Puente Aranda, tiene procesos de tejeduría, tintorería y acabados, por lo tanto, teniendo en cuenta que en los estudios de diseño y operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, se debe identificar el problema desde su generación, en el presente trabajo se analizarán los distintos procesos que se realizan en la empresa, caracterizaciones de afluente y efluente y evaluación de la eficiencia de la PTARI existente, verificando la operación de la misma, con el fin de definir los criterios y establecer acciones a mejorar para el tratamiento de las aguas residuales. De igual manera se mostrará un análisis comparativo con la resolución 0631 de 2015 y se darán alternativas para cumplir con mencionada resolución, ayudando con el actual proceso de descontaminación del río Bogotá.

ANTECEDENTES

La industria textil, es una de las más importantes en Colombia, representado una parte significativa de exportaciones y aparato productivo nacional, con un 12,1% de la producción del país, y genera aproximadamente 600.000 empleos de forma directa e indirecta, sin embargo, también es una de las más contaminantes por la cantidad de sustancias químicas que maneja en cada uno de sus procesos de producción, en los que se generan aguas residuales altamente contaminadas por la utilización de colorantes surfactantes, sales inorgánicas, pigmentos sintéticos y distintos compuestos químicos empleados en el proceso productivo que afectan la calidad del agua (Patarroyo, 2013; Buscio *et al.*, , 2015).

Los colorantes utilizados en los procesos de tinturado perduran en el ambiente, y los procedimientos de eliminación tradicionales no son muy útiles, debido a que oxidaciones o reducciones pueden producir sustancias tóxicas. La descarga inadecuada de efluentes fuertemente coloreados y sus metabolitos en ecosistemas acuosos reducen la penetración de la luz solar, causando efecto inhibitorio sobre la fotosíntesis (Li *et al.*, 2015; Solís *et al.*, 2012), por lo que su presencia debe ser controlada.

El Consejo de Estado, uno de los máximos tribunales de Colombia, en el año 2014 emitió sentencia sobre la descontaminación del río Bogotá, donde ordenó el diseño y la implementación de medidas para descontaminar este río y evitar su contaminación a futuro, en la sentencia mencionada se declaran varias entidades como responsables, desde el orden Nacional, Departamental, Distrital y Municipal (Corporaciones autónomas, secretarías de ambiente, empresas de servicios públicos, entre otras); estas entidades son las encargadas de vigilar, controlar y si es necesario sancionar, a los generadores de vertimientos indebidos tanto directos como indirectos al río Bogotá, incluyendo los vertimientos generados por las empresas textiles.

En el caso de la tintorería ASITEX S.A. se evidenció un cumplimiento normativo ambiental mayor en comparación con las demás tintorerías de la zona de Puente Aranda, siendo la única tintorería que maneja un proceso de tratamiento de aguas con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales. Los mayores impactos se identificaron en el componente de vertimientos por la gran cantidad de colorantes y auxiliares de teñido que afectan la calidad del agua que se vierte al alcantarillado, y sumado a esto, no hay una disposición adecuada de los lodos generados a partir de la misma (Guapo, J.C., 2016).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del agua de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial (PTARII) de la tintorería ASITEX, verificando el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 del MADS.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar los procesos productivos que se desarrollan en la empresa ASITEX S.A.
- Analizar la operación de la PTARII.
- Evaluar el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales que posee ASITEX S.A., determinado incumplimiento de la norma y principales parámetros de control.
- Realizar balance de masas de los procesos que tienen influencia en el funcionamiento de la PTARII.
- Formular alternativas para el tratamiento de los parámetros que no cumplan con la normativa vigente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INDUSTRIA TEXTIL

La industria textil es uno de los sectores más destacables de la economía colombiana, debido a que equivale al 6% del PIB y representa aproximadamente el 24% del empleo en el país (Garzón, E., 2018).

El proceso de elaboración de productos textiles consiste en un gran número de operaciones unitarias retroalimentadas que utilizan diversas materias primas, como algodón, lana, fibras sintéticas, o mezclas de ellas. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es muy variado, por la gran variedad de materias primas, reactivos, métodos de producción y por gran cantidad de agua que requiere para sus procesos productivos. De 100 a 200 L de agua son necesarios para producir un kilogramo de productos textiles (Carvalho *et al.*, 2016).

Dentro de los principales procesos de la industria textil están: Hiladuría, tejeduría, tintorería y acabados textiles, como se describe a continuación:

2.1.1. Hiladuría

La hiladuría tiene por objeto la formación de un hilo de sección lo más circular posible, formado por una masa de fibras de una longitud limitada, colocadas más o menos paralelas entre sí y ligadas por medio de la torsión.

En la hilatura industrial se deben practicar cierto número de operaciones que varían según la fibra que se trate y el producto a obtener, pero en todos los casos obedecen a un proceso general que se puede dividir en los siguientes principios (Lockuan, F.E., 2012):

- **Limpieza:** Tiene por objeto la eliminación de sustancias diferentes a la fibra.
- **Disgregación o individualización:** Separación de mechones entre sí hasta conseguir la total independencia de cada una de las fibras.
- **Paralelización:** Consiste en preparar las fibras individualizadas para facilitar la operación siguiente.
- **Estirado:** Deslizamiento entre sí de las fibras hasta conseguir el adelgazamiento que se pretenda.
- **Cohesión:** Tiene por misión ligar entre sí las fibras, sobre un eje teórico central.

Aunque se menciona el proceso, vale la pena mencionar que la empresa de ASITEX S.A., no incluye dentro de sus procesos el de hiladuría, los hilos llegan a la empresa listos para el proceso de tejeduría, posteriormente pasan por tintorería y acabado.

2.1.2. Tejeduría

Según la Real Academia Española, tejeduría hace referencia al arte de tejer, para efectos del presente trabajo vamos a adoptar la siguiente definición: tejeduría se refiere a la acción de tejer toda clase de telas fabricadas por medio de hilos o filamentos a partir de hilos o de fibras textiles. En el caso de estudio se tiene proceso de tejeduría, el cual será descrito más adelante.

2.1.3. Tintorería

El material textil, luego de los procesos de hilandería y/o tejeduría, presenta el color original de las fibras constituyentes (crudo), ocurre entonces que muchas veces este color debe ser cambiado para que los artículos confeccionados se diferencien entre sí según la demanda o gustos del usuario final, donde las variables más importantes son: el sustrato, insumos, maquinaria y el factor humano (Lockuan, F.E., 2012).

El proceso de teñido puede llevarse a cabo en diferentes etapas de proceso textil, cuando se efectúa durante las primeras etapas de proceso, por ejemplo, sobre fibras sueltas (antes de la hilandería) puede lograrse una mejor solidez del color, pues el colorante llega hasta el núcleo de hilo. Un buen teñido estrictamente depende de diferentes parámetros y condiciones que pueden ser evaluados inmediatamente (como la reproducibilidad) o que requieren una evaluación específica de solidez (uso, procesos en seco o en húmedo) realizada por medio de pruebas posteriores en laboratorio.

Según Lockuan, F.E., 2012 existen dos métodos para transferir el colorante del baño a la fibra durante el proceso de teñido:

- ***Tintura por agotamiento (sistemas discontinuos)***: El colorante se disuelve o dispersa en el baño de teñido, el material es sumergido en el líquido de teñido y se retira solamente cuando el colorante se ha transferido mayoritariamente en el material a teñir, el cual es distribuido homogéneamente, penetrado y fijado en la fibra. Al final del proceso, el material se lava o enjuaga para eliminar el colorante no fijado.

- **Foulardado (sistemas continuos o semicontinuos):** Este proceso se lleva a cabo utilizando medios mecánicos (humectación por impregnado y exprimido). El baño de teñido se distribuye homogéneamente sobre la tela, el colorante penetra en el tejido y se fija a continuación. Al final del proceso, el material se lava.

De acuerdo con lo anterior, se infiere que con cualquier método en el proceso de tintorería se generan residuos, debido a que siempre hay un remanente del colorante que queda del lavado final. En este proceso es donde se presenta la mayor contaminación de los efluentes de la industria, debido a la utilización de distintas clases de colorantes y químicos que no se fijan en la tela.

2.1.4. Acabados textiles

Acabado es un término que se aplica a una gama muy amplia de tratamientos que suelen llevarse a cabo durante la fase final de fabricación, generalmente antes de la confección. Existen dos tipos de acabados, el mecánico y el químico, siendo el último en el que se pueden presentar contaminantes en los residuos líquidos debido a los productos externos que se aplican en la tela para lograr la textura o el aspecto deseado (Ivester A.L., Neefus J.D., 1998):

- **Acabado mecánico:** Cambia la textura y el aspecto del tejido sin productos químicos, generalmente con ayuda de cepillos, rodillos y en algunos casos con temperatura, entre los principales tipos acabados mecánicos se encuentran: sanforizado, calandrado, lijado, gofrado, termofijado, cepillado y esmerilado.
- **Acabado químico:** El acabado químico se aplica con diversas máquinas, hay una clase de acabado químico que no va acompañado de reacción, por ejemplo, la aplicación de un suavizante o un mejorador del tacto para modificar la sensación y la textura del tejido o hacerlo más fácil de coser. El otro tipo de acabado químico si cursa con reacción para inducir ciertas propiedades físicas, como resistencia al encogimiento y suavidad.

Los productos químicos utilizados para lograr dichos acabados, al igual que en el proceso de tintorería, no se fijan en un 100%, por lo cual, en este proceso también se pueden presentar residuos líquidos contaminados. En Colombia, los residuos líquidos de la industria deben cumplir con una normativa específica antes de ser vertidos en el alcantarillado público o en un cuerpo de agua superficial.

2.2. PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Los tintes usados en la industria textil tienen residuos de colorantes reactivos y otros productos químicos apenas degradables, así como altas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno al día 5 (DBO5). Los tintes textiles son principalmente compuestos aromáticos heterocíclicos y tienen una complicada estructura estable apenas degradable. De hecho, el efecto tóxico de los colorantes en seres vivos y en el medio acuoso es ampliamente reconocido (Villanueva-Rodríguez *et al.*, 2009; Shaolan *et al.*, 2010).

Las industrias textiles utilizan más de 7000 diferentes compuestos y aditivos que consumen grandes volúmenes de agua (Hessel *et al.*, 2007), sus efluentes tienen alta salinidad (cloruro de sodio y sulfato de sodio), detergentes, aceites y SS, que dan como resultado efluentes salinos y alcalinos fuertemente coloreados (Vandevivere *et al.*, 1998; Hessel *et al.*, 2007; Deive *et al.*, 2010; Rayaroth *et al.*, 2016).

La presencia de metales pesados provenientes de las aguas residuales industriales y de otros tóxicos inorgánicos, en concentraciones apreciables causan problemas serios de inhibición del tratamiento biológico, así como de disposición de lodos provenientes del sistema de tratamiento (Romero J.A., 2016). Los principales metales en aguas residuales de la industria textil son Cd, Cu, Fe, Se y Zn.

A continuación, en la **Tabla 1** se presenta una clasificación general de los contaminantes en la industria textil y sus efectos en el ambiente:

Tabla 1 Principales Contaminantes de la Industria Textil

Clasificación	Efectos contaminantes
<u>Materias en suspensión:</u> <i>Son relativamente escasas en los efluentes textiles excepto en los lavaderos de lana (Residuos minerales, fibras, sustancias insolubles).</i>	Las materias disueltas se depositan lentamente sobre los cursos de agua, si el depósito es importante afecta la vida acuática. Cuando estas materias son de naturaleza orgánica se descomponen progresivamente agotando el oxígeno y generando gas tóxico y mal oliente.
<u>Materias flotantes:</u> <i>Aceites, grasas y espumas</i>	Disminuyen el crecimiento de la flora acuática al impedir la penetración de la luz. Los aceites en particular son tóxicos y perturban la aireación de los cuerpos acuáticos y destruyen la vegetación. La industria textil sólo genera grasas y aceites de forma importante en el lavado de la lana y en los procesos de estampación en los que intervienen pastas de petróleo. Los tensoactivos son de uso generalizado y en concentraciones bajas (1 - 3 mg/L), suficientes para producir espuma al verter el agua incluso después de un proceso de depuración. Si las cantidades de tensoactivo son pequeñas la espuma desaparece después de muy pocos metros del vertido.
<u>Impurezas disueltas:</u> <i>Contaminantes presentes en las Aguas Residuales Industriales textiles de mayor importancia: ácidos, álcalis, reductores, oxidantes, colorantes y un sin número de productos auxiliares todos solubles en agua.</i>	Los reductores y la materia orgánica disuelta consumen el oxígeno. Algunos de los productos contaminantes disueltos pueden ser además tóxicos, como los derivados fenólicos, transportadores de tintura, cromo, grasa, aceites, metales pesados, etc.

(Fuente: Tomado de Crespi, M. y Huertas, J.A., 1987)

La mayoría de los contaminantes se presentan en el proceso de teñido, por lo cual a continuación se presenta una clasificación de los tipos de colorantes (directos, reactivos y dispersos) con sus principales componentes y las funciones que cumplen:

3.2.1 Colorantes directos

La disolución del colorante se puede hacer con agua caliente, varios colorantes negros necesitan que se les agregue una pequeña cantidad de carbonato de sodio, la cantidad de agua debe ser de acuerdo a la cantidad de colorante y la solubilidad. Los siguientes son

sus componentes: Sal (sulfato o cloruro sódico), igualadores, soda ash o carbonato de calcio (aumenta el rendimiento y la solubilidad de ciertos negros directos), dispersante (mejora la solubilidad del colorante, mantiene la dureza del baño en dispersión) (Paredes, M.C., 2013).

3.2.2 Colorantes reactivos

Los colorantes reactivos se impregnan en las fibras de forma similar a los directos, la sal sirve de auxiliar para que el colorante se fije a la fibra, el colorante reactivo produce una reacción química con la fibra en un medio alcalino logrando que éste quede impregnado en el algodón. Existen varias clases de este colorante y cada uno tiene su propio proceso, tiempo, temperatura, entre otras características. A continuación, sus componentes: Sal (sulfato o cloruro sódico), álcali, puede ser soda cáustica o soda ash (fijación del colorante), lubricantes (mejoran la acomodación de la tela en las máquinas y evita que las fases del sustrato se peguen), antiespumantes (evita que la tela se enrosque), secuestrantes (reduce la dureza), agente de jabonado (usado en los baños después de la tintura para la remoción del colorante no fijado) (Paredes, M.C., 2013).

3.2.3 Colorantes dispersos

Los colorantes dispersos fueron creados para fibras como el poliéster que no tiene carga eléctrica, por lo tanto sus fibras no reaccionan químicamente con el colorante, estos se impregnan sobre la fibra cuando el baño de teñido empieza a calentar y la fibra empieza a abrirse permitiendo la entrada del colorante, al permanecer la tintura por un tiempo determinado a una determinada temperatura, el colorante será esparcido en la fibra, la tintura de poliéster se producen a temperaturas de hasta 130 °C, que con la ayuda de carriers que sirven como agentes para acelerar la fijación el proceso se lleva a cabo en medio ácido a un pH de 5.5. Los principales componentes son los siguientes: dispersante (distribución uniforme del colorante en el baño), igualador (uniformidad del colorante en la fibra), carrier (acelera el montaje de colorante, indispensable en tinturas debajo de 120°C), ácido acético o fórmico (protege el colorante evitando su destrucción), sulfato de amonio (garantiza la estabilidad del pH, en todo el proceso) (Paredes, M.C., 2013).

2.3. TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA TEXTIL

El tratamiento de aguas residuales es una serie de operaciones físicas, químicas y biológicas que remueven el material suspendido, coloidal o disuelto. La industria textil

consume grandes cantidades de agua y produce grandes volúmenes de aguas residuales, principalmente durante los procesos de tintura y acabado. Las aguas residuales textiles a menudo son ricas en color. Además, se caracterizan por la presencia de residuos de colorantes reactivos y otros productos químicos apenas degradables, así como altas concentraciones de DBO y DQO. Sin embargo, para el tratamiento de estas aguas es necesario conocer los límites de descarga en los efluentes; que puedan varían según la legislación de cada país. Los parámetros más importantes a considerar en general son: DBO5, DQO, SS, Salinidad (Cloruros o sulfatos), color, detergentes y aceites (Neill *et al.*, 1999; Robinson *et al.*, 2001; Hessel *et al.*, 2007).

En la actualidad se utilizan diferentes tipos de tratamiento entre los cuales se encuentran los preliminares que consisten básicamente en la eliminación de residuos fácilmente separables, seguido de los tratamientos primarios utilizados para la eliminación de los SS y materiales flotantes y, posteriormente se tienen los denominados tratamientos secundarios que comprenden procesos biológicos aerobios y anaerobios, y físicoquímicos, para reducir en su mayor parte la DBO y la DQO; y, finalmente los tratamientos terciarios que llevan a la reutilización del agua.

Según Bolaños (2010) hay 3 tipos de procesos de tratamiento generales:

- **Procesos físicos:** Dependen de las propiedades físicas de las impurezas como lo es el peso específico, tamaño de partícula, viscosidad entre otros. Ejemplo: cribado, sedimentación y filtración.
- **Procesos químicos:** Dependen de las propiedades químicas de una impureza. Ejemplo: coagulación, precipitación e intercambio iónico.
- **Procesos biológicos:** Se utilizan reacciones bioquímicas para quitar impurezas solubles o coloidales; los procesos biológicos aerobios incluyen el filtrado biológico y lodos activados. Los procesos de oxidación anaerobia se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración.

Para la eliminación de colorantes de las aguas residuales las metodologías actuales incluyen dentro de los métodos químicos procesos que usan agentes oxidantes fuertes (por ejemplo, peróxido de hidrógeno (H₂O₂), ozono (O₃) y reactivo de Fenton) o procesos de oxidación avanzados como fotoquímicos y fotocatalítico (por ejemplo, peróxido de hidrogeno potenciado con rayos ultravioleta (H₂O₂/UV) u oxidación electroquímica), alternativas muy eficientes para remediación de aguas residuales textiles (Brillas y Martínez-Huitle, 2015)

pero que implican algunas desventajas como vida corta y altos costos. Por otra parte, los métodos físicos se basan en la coagulación, floculación, filtración y procedimientos de adsorción, pero producen una gran cantidad de lodo, tienen baja efectividad y generan altos costos (Vandevivere *et al.*, 1998; Robinson *et al.*, 2001; Anjaneyulu, 2005 y Holkar *et al.*, 2014). Finalmente, se tienen los métodos biológicos que consisten en la degradación del tinte por vías metabólicas o adsorción por biomasa, que en general son más económicos, pero para aguas textiles generalmente son insuficientes.

De manera general, los métodos para tratar las aguas residuales textiles incluyen procesos biológicos, fisicoquímicos y de filtración, durante los cuales las moléculas de tinte se destruyen y/o se separan del agua. El tratamiento biológico es un proceso eficaz para reducir la DQO de las aguas residuales, pero no puede decolorar completamente los efluentes. Los enfoques fisicoquímicos, como la oxidación, la adsorción y la coagulación-floculación (CF), muestran resultados prometedores en decoloración de aguas residuales textiles. Entre estos métodos, la CF se usa ampliamente debido a su operación simple, costo bajo e impacto ambiental. Sin embargo, la eficiencia de los fisicoquímicos es relativamente baja cuando la concentración de colorante no es lo suficientemente alta, lo que resulta en un alto uso de químicos y una gran cantidad de lodo. Procesos de filtración con membrana basados la presión, como la ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa son tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales textiles. Sin embargo, el rechazo de la membrana UF hacia los colorantes de bajo peso molecular es ineficiente, y el obstáculo principal de NF y ósmosis inversa radica en su alto requerimiento de energía, bajo flujo de agua y tasa de recuperación, y la disminución severa del flujo debido al ensuciamiento de la membrana (Han *et al.*, 2016).

Los tratamientos de aguas residuales textiles convencionales involucran la coagulación química con sales de hierro o aluminio combinada con procesos biológicos o adsorción. El proceso de coagulación es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos; diferentes estudios reportan que este tipo de contaminantes representan alrededor de 50 % de la DQO total de un efluente textil (Jorfi *et al.*, 2016, Gilpavas *et al.*, 2017) y una remoción del 40% del carbono orgánico total. El remanente corresponde a compuestos orgánicos solubles resistentes a la coagulación, como compuestos orgánicos, detergentes y otros agentes químicos usados en la fabricación de textiles. Por consiguiente, se emplea generalmente como etapa de pretratamiento, de ahí que sea necesario efectuar un tratamiento posterior con el objeto de eliminar los contaminantes remanentes y satisfacer

la legislación ambiental (Gilpavas *et al.*, 2017). En este proceso, las sales de aluminio inducen iones positivamente cargados a la mezcla, los cuales reducen el grado de repulsión electrostática entre partículas coloidales; esto permite que las fuerzas de atracción superen las de repulsión, lo cual rompe la dispersión y hace que la mezcla se flocule (Amor *et al.*, 2015).

A continuación, una lista de procesos usados frecuentemente en tratamiento de aguas residuales de la industria textil para complementar los métodos comunes de coagulación – floculación – precipitación.

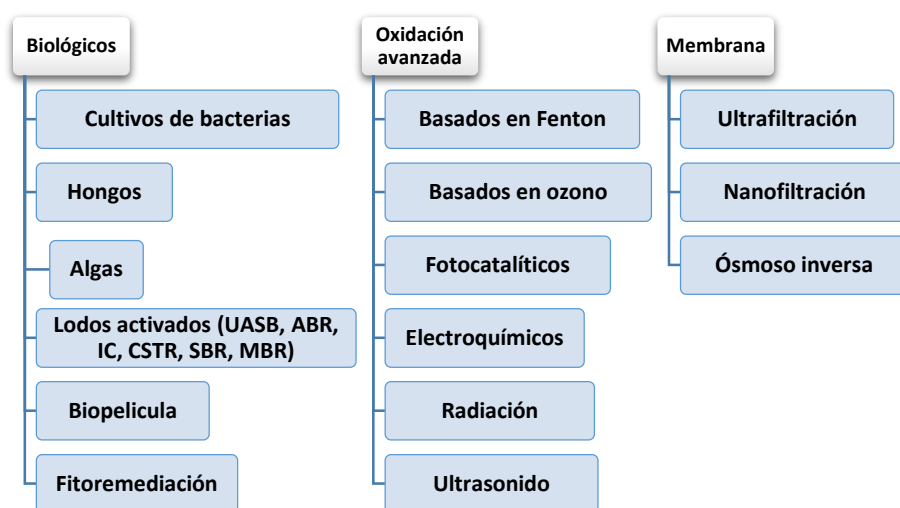


Figura 1 Procesos de Tratamiento de Aguas residuales para la Industria Textil

2.3.1. Procesos biológicos

Los procesos de tratamiento biológico utilizan las capacidades metabólicas de bacterias, arqueas, hongos, algas o plantas para oxidar o reducir los compuestos orgánicos e inorgánicos, generalmente se implementan en biorreactores, con equipos adecuados de aireación y agitación, pero a veces se utilizan humedales. Se supone que los métodos de biodegradación son rentables, prácticamente en términos de costos de operación. Sin embargo, los bioprocesos tienen varias limitaciones, por ejemplo, son capaces de transformar solo compuestos biodegradables (Ganzenko *et al.*, 2014). Además, la presencia de sustancias tóxicas puede inhibir los procesos biológicos e incluso excluir el uso de microorganismos o plantas. Aunque el tratamiento biológico de aguas residuales es una solución que se ha utilizado durante muchos años, los métodos involucrados están en

constante mejora, en particular, para convertir los contaminantes biológicamente persistentes, a menudo se emplea el pretratamiento químico (Paździor *et al.*, 2018).

2.3.2. Oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) conducen a la generación de radicales hidroxilo, generalmente a temperatura ambiente y presión normal. El radical hidroxilo es un oxidante potente y no selectivo, que puede reaccionar a través de tres mecanismos: abstracción de hidrógeno, transferencia de electrones o adición de radicales (Ileri *et al.*, 2013). Como resultado, son capaces de degradar estructuras químicas complejas, como los compuestos biorefractoriales, principalmente contaminantes antropogénicos que apenas son atacados por los microorganismos (Dewil *et al.*, 2017). A diferencia de los bioprocesos, los POA se consideran costosos: exigen cantidades significativas de energía eléctrica o reactivos químicos. Sin embargo, los POA siempre se están desarrollando, con la implementación de las técnicas más eficientes (por ejemplo, nuevos fotocatalizadores), así como nuevos equipos (por ejemplo, reactores con transferencia de masa más eficiente). Además, no producen corrientes secundarias de residuos (Dewil *et al.*, 2017, Paździor *et al.*, 2018)

Otra posibilidad es la utilización de los POA como el paso de pulido después de la biodegradación, el postratamiento. La principal ventaja de esta combinación es que los productos químicos o la energía eléctrica no se desperdician en los compuestos orgánicos biodegradables, que pueden ser degradados por microorganismos. Esta combinación se recomienda para aguas residuales textiles industriales que contienen compuestos biodegradables y biorefractoriales (Paździor *et al.*, 2018).

Dentro de los POA que han sido de objeto de estudio en las últimas décadas están los procesos Fenton (F) y foto-Fenton (FF), procesos altamente eficientes para la degradación de colorantes presentes en aguas residuales de la industria textil (Gilpavas *et al.*, 2017). Los procesos Fenton se basan en la generación de especies químicas altamente oxidantes, principalmente el radical hidroxilo (OH) producido mediante la descomposición de H_2O_2 en presencia de Fe^{2+} como catalizador. El tratamiento mediante ultrasonido (US) de baja frecuencia (< 50 kHz) ha sido empleado recientemente para intensificar los procesos F (US/F) y FF (US/FF) (Wang y Shih, 2015). El US se basa en el fenómeno de cavitación acústico, que ocurre dentro de un líquido por la aplicación de frecuencias de ultrasonido. La cavitación forma burbujas que son sometidas a una serie de ciclos de expansión y

compresión, antes de colapsar violentamente. La cavitación acústica mejora los procesos de transferencia de masa y dispersión de las partículas de catalizador, a la vez que incrementa la disponibilidad de sitios activos para la reacción. Además, en los procesos US/F y US/FF, la irradiación US promueve la rápida regeneración de iones de Fe^{2+} y aumenta la producción de radicales OH, sin consumo de H_2O_2 . (Gilpavas *et al.*, 2017). Los procesos fenton son recomendables para aguas con pH ácidos, en el caso de aguas residuales con pH básico, el costo del tratamiento puede incrementar al tener que bajar el pH.

Por otro lado, las técnicas basadas en ozono pueden ser las más rentables para las aguas residuales de las empresas de tintes que utilizan principalmente tintes reactivos. Los efluentes del colorante reactivo son altamente alcalinos y contienen especies inorgánicas que actúan como captadores de radicales que influyen negativamente más en el proceso Fenton que en el proceso de ozonización (Paździor *et al.*, 2018).

2.3.3. Membranas

Antes del proceso de filtración por medio de membranas, las aguas residuales deben ser pretratadas mediante técnicas adecuadas para eliminar la mayoría de los sólidos suspendidos, inorgánicos y orgánicos, para proteger la membrana del daño debido a su alto costo. Durante el proceso de tratamiento se intenta aumentar el tamaño molecular de los contaminantes y luego se selecciona el procedimiento de filtración de membrana adecuado para la separación de los mismos, por ejemplo, la microfiltración, la cual está diseñada para eliminar sólidos suspendidos, mientras que la ultrafiltración se utiliza para eliminar macromoléculas disueltas generalmente orgánicas.

Los métodos de filtración como UF, NF y ósmosis inversa han sido usados para la reutilización de agua y su recuperación química. El tipo y la porosidad del filtro se determinan de acuerdo a la temperatura específica y la composición química del agua residual. El principal inconveniente en esta tecnología se basa en los altos costos de inversión, las incrustaciones y la producción de un baño de tinte que también necesita ser tratado (Robinson *et al.*, 2001, Quintero y Cardona, 2009).

3. MARCO NORMATIVO

El Consejo de Estado, es uno de los máximos tribunales del país, emitió la Sentencia sobre la descontaminación del río Bogotá el 28 de marzo del 2014, mediante el cual ordenó el diseño y la implementación de medidas para descontaminar el Río Bogotá y evitar su contaminación a futuro, en la sentencia se mencionan varias entidades como responsables, desde el orden Nacional, Departamental, Distrital y Municipal; estas entidades son las encargadas de vigilar y controlar, entre otras actividades, los vertimientos industriales tanto directos como indirectos al Río Bogotá. Las empresas de textiles a través de los procesos que se adelantan en su interior como tejeduría, tintorería y acabado de textiles, generan vertimientos que deben ser tratados antes de su disposición en la red de alcantarillado de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá.

3.1. HISTORIA DE LA NORMATIVIDAD EN MATERIA DE VERTIMIENTOS

A continuación, se presentará un breve resumen cronológico de las principales normas en cuanto a vertimientos se refiere, de las cuales se ha derivado la exigencia actual del gobierno colombiano a la industria y en particular al sector textil:

Decreto - Ley 2811 de 1974 - Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente: En este decreto, se fija el marco regulatorio para el manejo de las aguas en cualquiera de sus estados.

Ley 09 de 1979 - Por la cual se dictan Medidas Sanitarias: Se establecen los procedimientos y las medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos.

Decreto 1594 de 1984 - Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I - del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a Uso del Agua y Residuos Líquidos): Este decreto define los límites permisibles para el vertimiento o descarga de residuos líquidos a un cuerpo de agua o alcantarillado sanitario, fue derogado por el decreto 3930 de 2010 excepto en sus artículos 20 y 21.

En el Artículo 73 de este decreto se dicta la primera norma de vertimiento a un alcantarillado público, a continuación, en la **Tabla 2** se evidencian los principales parámetros exigidos y en la **Tabla 3** se diferencian las exigencias para usuarios nuevos y existentes:

Tabla 2 Principales Parámetros exigidos por Decreto 1594 de 1984

Referencia	Valor
pH	5 a 9 unidades
Sólidos sedimentables (SSED)	10 ml/l
Sustancias solubles en hexano	100 mg/l
Ácidos, bases o soluciones ácidas o básicas que puedan causar contaminación; sustancias explosivas o inflamables.	Ausentes

(Fuente: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 1984)

Tabla 3 Usuarios nuevos y existentes Decreto 1594 de 1984

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
SS para desechos domésticos e industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
DBO Para desechos domésticos	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
DBO Para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga
Caudal máximo	1.5 veces el caudal	% horario

(Fuente: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 1984)

Adicionalmente en el Artículo 74 se dictan las concentraciones para el control de la carga de las sustancias de interés sanitario.

Resolución 3957 de 2009 - Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital: Considerando que, el Decreto 1594, artículo 74 párrafo, determina que las entidades encargadas del Manejo y Administración del Recurso (EMAR), pueden exigir a los usuarios, valores más restrictivos en el vertimiento, cuando se produzcan concentraciones en el cuerpo de agua receptor que excedan los criterios de calidad para el uso o usos asignados al recurso, y que en el acuerdo 43 del 2006, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR fija los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020, la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) fija los siguientes valores de referencia para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá (**Tabla 4 y Tabla 5**):

Tabla 4 Valores de referencia de sustancias de interés sanitario para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado - Resolución 3957 de 2009

Parámetro	Unidades	Valor
Aluminio Total	mg/L	10
Arsénico Total	mg/L	0.1
Bario Total	mg/L	5
Boro Total	mg/L	5
Cadmio Total	mg/L	0.02
Cianuro	mg/L	1
Zinc Total	mg/L	2
Cobre Total	mg/L	0.25
Compuestos Fenólicos	mg/L	0.2
Cromo Hexavalente	mg/L	0.5
Cromo Total	mg/L	1
Hidrocarburos Totales	mg/L	20
Hierro Total	mg/L	10
Litio Total	mg/L	10
Manganeso Total	mg/L	1
Mercurio Total	mg/L	0.02
Molibdeno Total	mg/L	10
Níquel Total	mg/L	0.5
Plata Total	mg/L	0.5
Plomo Total	mg/L	0.1
Selenio Total	mg/L	0.1
Sulfuros Totales	mg/L	5

(Fuente: SDA, 2009)

Tabla 5 Valores de referencia de otros parámetros para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado - Resolución 3957 de 2009

Parámetro	Unidades	Valor
Color	Unidades Pt-Co	50 unidades en dilución 1/20
DBO5	mg/L	800
DQO	mg/L	1500
Grasas y Aceites	mg/L	100
pH	Unidades	5,0 - 9,0
SSED	mg/L	2
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	600
Temperatura	°C	30
Tensoactivos (SAAM)	mg/L	20

(Fuente: SDA, 2009)

Por tanto, los valores anteriores son los exigidos a ASITEX desde la entrada en vigencia de esta resolución hasta el año 2015 cuando sale la normativa nacional, adicionalmente la resolución 3957 exige que se realice el registro de los vertimientos de tipo no doméstico y se solicite el debido permiso a menos que la SDA determine el no requerimiento.

Decreto 3930 de 2010 - Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I - del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos: Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

El decreto 3930 entró en vigencia el 25 de octubre de 2010, determinó que a partir de esa fecha el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que actualmente es el MADS, tendría 2 meses, para expedir las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Con el Decreto 4728 DE 2010 se amplía el plazo hasta el mes de diciembre del 2010 para la expedición de las normas de vertimientos a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, sin embargo, solo hasta el año 2015 se publicó dicha norma mediante la resolución 0631 de 2015 la cual entró en vigencia el 01 de enero de 2016; es decir un retraso de más de 4 años en la expedición la normativa nacional.

3.2. NORMATIVA ACTUAL (RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 DEL MADS)

Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015 - por la 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: Con la entrada en vigencia de esta resolución se regula a nivel nacional el vertimiento de aguas residuales.

En el artículo 5 de dicha resolución, se fija un valor de temperatura de 40°C como máximo permisible para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público.

En el artículo 16, se presentan los valores límites máximos permisibles de los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) al alcantarillado público (ver **Tabla 6**); sin embargo, esta tabla solo define directamente el rango de unidades de pH entre 5 y 9, y para los demás parámetros nos remite a las tablas para vertimientos a cuerpo de agua superficial.

En los parámetros DQO, DBO5, SST , SSED, Grasas y aceites, compuestos de fósforo y compuestos de nitrógeno, se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro

respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales multiplicados por un factor de 1,5.

Para los demás parámetros se aplican las mismas exigencias establecidas para el parámetro respectivo en la actividad específica para los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

En el Artículo 13 se definen parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes, dentro de los cuales está el sector del caso de estudio “Fabricación de productos textiles”.

Tabla 6 *Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en Colombia para la industria textil*

PARÁMETRO	Valores máximos permisibles de los vertimientos puntuales de ARnD	
	A cuerpos de aguas superficiales	Al alcantarillado público
pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00
DQO	400	600
DBO5	200	300
SST	50	75
SSED	2	3
Grasas y Aceites	20	30
Fenoles	0,2	0,2
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Totales (HTP)	10	10
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (P-PO43-)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitratos (N-NO3-)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cloruros (Cl-)	1200	1200
Sulfatos (SO42-)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfuros (S2-)	1	1
Cadmio (Cd)	0,02	0,02

Cinc (Zn)	3	3
Cobalto (Co)	0,5	0,5
Cobre (Cu)	1	1
Cromo (Cr)	0,5	0,5
Níquel (Ni)	0,5	0,5
Acidez Total	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (436 nm)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (525 nm)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (620 nm)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Temperatura	40	40

(Fuente: MADS, 2015)

4. METODOLOGÍA

4.1. LOCALIZACIÓN Y CASO DE ESTUDIO

La empresa ASITEX fue escogida como caso de estudio de la presente tesis, debido a que es una empresa que cuenta con los principales procesos en la fabricación textil: tejeduría, tintorería y acabados textiles, adicionalmente cuenta con una planta de tratamiento y análisis acreditados de sus vertimientos.

Inicialmente, se realizaron visitas de inspección en campo, haciendo un reconocimiento de las instalaciones de la planta de producción de ASITEX, se revisaron los espacios donde se desarrollan cada uno de los procesos de la industria textil en esta empresa, entendiendo el funcionamiento de cada máquina e identificando los puntos clave en materia de vertimientos para el desarrollo del estudio. Se realizó recorrido por la PTARI y se recopiló información relevante, como por ejemplo el manual de operación de la planta y las caracterizaciones anuales de vertimientos que tenía ASITEX.

4.2. MUESTREO Y TOMA DE DATOS

4.2.1. Características generales de los elementos a analizar

4.2.1.1. Cadmio

Es relativamente raro en la naturaleza se asocia al zinc. Es de color blanco ligeramente azulado. Peso atómico 112 y densidad relativa 8. Tiene ocho isótopos estables y presenta once radioisótopos inestables de tipo artificial (Peris, 2006). Naturalmente no se encuentra en estado libre y la greenockita (sulfuro de cadmio) es el único mineral de cadmio. Casi todo el que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinado de los minerales de zinc.

El cadmio se usa en pinturas, plásticos, pilas, baterías, abonos, soldaduras, asbestos, pigmentos, barras (reactores nucleares), farmacéutica, fotografía, vidrio y porcelana. Para la mayoría de los seres vivos la principal fuente de exposición al cadmio son los alimentos y el agua, pequeñas partículas de cadmio son absorbidas por el aparato respiratorio, especialmente en trabajadores de la industria del cadmio y en personas expuestas al humo del tabaco (Londoño *et al.*, 2016).

4.2.1.2. Cloruros

El ion cloruro es uno de los iones inorgánicos que existe en gran cantidad en aguas tratadas, aguas residuales y aguas naturales, siendo este necesario en agua potable. El contenido de cloruros en aguas naturales normalmente no sobrepasan los 50 a 60 mg/L, un valor normal en agua para consumo humano es de 250 mg/L de Cl⁻ y como un máximo valor 350 mg/L, lo que indicaría que con estos valores el agua no presenta problemas de consumo para el ser humano. Un contenido alto de cloruros puede dañar estructuras metálicas y evitar el crecimiento de plantas (Llive W.R., 2012).

4.2.1.3. Cobalto

El cobalto es un elemento natural y que tiene propiedades similares al hierro y al níquel. El número atómico del cobalto es 27. Pequeñas cantidades de cobalto se encuentran en forma natural en la mayoría de las rocas, en el suelo, el agua, en plantas y en animales. El cobalto tiene efectos tanto beneficiosos como perjudiciales para la salud. El cobalto es beneficioso para seres humanos porque forma parte de la vitamina B12, que es esencial para mantener buena salud. Sin embargo, cuando el cuerpo absorbe demasiado cobalto pueden ocurrir efectos perjudiciales (ATSDR, 2004).

4.2.1.4. Cobre

Número atómico 29, es un metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, eléctricas, físicas y mecánicas, además de su abundancia. La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. De cientos de compuestos fabricados de manera industrial, el más importante es el sulfato de cobre. El cobre se usa en equipos eléctricos, maquinaria industrial, construcción, en aleaciones de bronce, latón, níquel, clavos, pernos, objetos decorativos, tuberías, techos, monedas, utensilios de cocina, joyería, muebles, maquillaje, pinturas, instrumentos musicales y medios de transporte. Además, el sulfato de cobre es uno de los primeros compuestos utilizados en alimentación animal como pesticidas, las sales de cobre poseen efectos fungicidas y algicidas. La exposición aguda por ingestión del sulfato de cobre puede producir necrosis hepática y muerte. La exposición crónica de alimentos conservados en recipientes de cobre genera lesiones hepáticas en niños (Londoño *et al.*, 2016).

4.2.1.5. Color

Esta característica del agua puede depender de la turbiedad o presentarse dependientemente de ella. El color del agua se debe frecuentemente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos y ácidos fúlvicos entre otros. Se considera que el color natural del agua, excluyendo el que resulta de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas: la extracción acuosa de sustancias de origen vegetal, la descomposición de la materia, la materia orgánica del suelo, presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos; y una combinación de los procesos descritos. Sin embargo, el color también depende de otros factores como son: pH, temperatura, tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados (Llive W.R., 2012).

4.2.1.6. Compuestos Fenólicos

Los fenoles son compuestos aromáticos que se caracterizan por tener uno o varios grupos hidroxilo unidos directamente al anillo aromático. Por lo general, se nombran como derivados del miembro más sencillo de la familia, el fenol.

La presencia de fenoles en el medio ambiente es consecuencia tanto de acciones naturales como del aporte antropogénico, fundamentalmente, de carácter agrícola e industrial. Los procesos de producción de industrias como son: farmacéutica, perfumería, explosivos, resinas fenólicas, plásticos, textiles, petróleo, colorantes, cuero, papel, coquerías, destilerías de alquitrán, pesticidas y plaguicidas expulsan alrededor del 26.3% de los fenoles al aire, aproximadamente el 73,3% a las aguas y cerca del 0,4% en el suelo y los sedimentos acuáticos. Los compuestos en estudio son fácilmente absorbidos por los animales y el hombre a través de la piel y las membranas mucosas. Su toxicidad afecta directamente a gran variedad de tejidos, órganos, sistemas de órganos e incluso a los cromosomas (Mohan *et al.*, 2004 y Camacho C., 2009).

4.2.1.7. Cromo

El cromo es un elemento metálico de amplia distribución en la naturaleza, en forma de crocoita. Ocupa el cuarto lugar entre los 29 elementos biológicamente más importantes de la corteza terrestre. El cromo se encuentra en varios estados de oxidación, siendo los más comunes, el cromo (III) y el cromo (VI). El cromo se comporta en dos formas diferentes al ponerse en contacto con el ser humano. El cromo (III) es un oligoelemento, indispensable

para procesos bioquímicos y fisiológicos necesarios para la vida, específicamente tiene acciones en el metabolismo de la glucosa, el colesterol y los ácidos grasos, además de desempeñar un papel muy importante en diferentes reacciones enzimáticas. El cromo (VI) es un elemento altamente tóxico para el ser humano y está clasificado por la IARC (International Agency for Research on Cancer) en el grupo I (cancerígeno comprobado en humanos) ya que en exposición ocupacional produce cáncer en el sistema respiratorio (Téllez *et al.*, 2004).

4.2.1.8. DBO

La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuente receptoras (Romero J.A., 2016).

Mide la cantidad de oxígeno consumida en la eliminación de la materia orgánica del agua a través de procesos biológicos aerobios. Se mide en mg/L de O₂. En aguas subterráneas suelen contener menos de 1 mg/L, un contenido superior es sinónimo de contaminación por infiltración freática. En las aguas superficiales es muy variable y depende de las fuentes contaminantes aguas arriba. En aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 mg/L. En aguas industriales puede alcanzar miles de mg/L. Cuanto mayor sea la contaminación, mayor será la DBO (Llive W.R., 2012).

4.2.1.9. DQO

Es una medida del contenido de materia orgánica presente en una muestra de agua, es decir, en una muestra que es susceptible a oxidación por un fuerte oxidante químico como el dicromato potásico (Cr₂O₇K₂). Por lo tanto, mide la cantidad de oxígeno equivalente al dicromato potásico usado en la oxidación de una muestra de agua residual. Es una reacción intensa en la que se oxida la mayoría de la materia orgánica, entre el 95 y el 100% (no oxida: piridina, benceno, amonio), también oxida algunos compuestos inorgánicos como sulfuros y cianuros. Las unidades en que se expresa son mg/L de O₂. Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 mg/L. Las aguas residuales domésticas están entre 260 y 600 mg/L. Hay un índice que indica que tipo de aguas se están analizando y se obtiene con la relación (DBO/DQO); si es menor de 0.2 el vertido será de tipo inorgánico y si es mayor de 0.6 se interpretará como un vertido orgánico (Llive W.R., 2012).

4.2.1.10. Grasas y Aceites

Se consideran grasas y aceites a los compuestos de carbono, hidrogeno y oxigeno que flotan en el agua residual, recubren las superficies con las cuales entran en contacto, causan iridiscencia y problemas de mantenimiento, e interfieren con la actividad biológica pues son difíciles de degradar. Generalmente provienen de la mantequilla, manteca, margarina, aceites vegetales, hidrocarburos y carnes. Los aceites y grasas de origen vegetal y animal son comúnmente biodegradables y, aun en forma emulsificada pueden tratarse en plantas de tratamiento biológico. Sin embargo, cargas altas de grasa emulsificadas, como las provenientes de mataderos, frigoríficos, lavanderías y otras industrias causan serios problemas de mantenimiento en las plantas de tratamiento. Los aceites y las grasas de origen mineral pueden ser no biodegradables y requieren pretratamiento para ser removidos antes del tratamiento biológico. Sin embargo, no existe método que permita distinguir las grasas y aceites vegetales o animales de las de origen mineral, aunque existe el procedimiento para distinguir entre grasas y aceites polares y no polares (Romero J.A., 2016).

4.2.1.11. Hidrocarburos Totales

El petróleo y los gases naturales a él asociados constituyen en la actualidad la principal fuente de hidrocarburos, El término hidrocarburo incluye hidrocarburos alifáticos, formados por cadenas de átomos de carbono en las que no hay estructuras cíclicas, hidrocarburos alicíclicos o simplemente cíclicos, compuestos por átomos de carbono encadenados formando uno o varios anillos e hidrocarburos aromáticos, que constituyen un grupo especial de compuestos cíclicos que contienen en general anillos de seis eslabones en los cuales alternan enlaces sencillos y dobles. En el ensayo de laboratorio se extraen en conjunto con las grasas y aceites, por lo tanto su análisis implica separación y determinación de la porción correspondiente a los hidrocarburos (IDEAM, 2007).

4.2.1.12. Níquel

En aguas residuales existe como ion soluble, pero en presencia de amoniaco, ácido etilendiaminotetraacético o cianuro puede formar complejos solubles muy estables, y difíciles de remover. El procedimiento convencional para control de níquel en residuos industriales es el de precipitación, aunque también se ha usado ósmosis inversa. La precipitación óptima ocurre a pH mayor de 9,5. Aun con tratamiento con cal, el hidróxido de

níquel tiene malas características de sedimentabilidad y, por tanto, requiere sedimentación prolongada y filtración (Romero J.A., 2016).

4.2.1.13. pH

Medida de la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno. Aguas residuales en concentración adversa del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras, y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en tratamiento biológico favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo el poder bactericida del cloro es mayor, porque predomina el HOCl; a pH alto la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH₃), la cual es tóxica, pero también removible mediante arrastre con el aire, especialmente a pH de 10,5 a 11,5. El valor adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5. Para procesos biológicos de nitrificación se recomiendan valores de pH de 7,2 a 9 y par desnitrificación de 6,5 a 7,5.

4.2.1.14. Plomo

Número atómico 82, peso atómico 207, color azulado, Forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos. En la industria, los compuestos más importantes son óxidos y tetraetilo de plomo, forma aleaciones con estaño, cobre, arsénico, bismuto, cadmio y sodio.

Se usa como aditivo antidetonante en la gasolina, baterías, en monitores de computadores y pantallas de televisión, joyería, latas de conserva, tintes para el pelo, grifería, pigmentos, aceites, cosmetología, aleaciones, cerámicas, municiones, soldaduras, plomadas, armamento, radiación atómica, insecticidas, etc. La absorción de plomo es un grave riesgo de salud pública; provoca retraso del desarrollo mental e intelectual de los niños, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en adultos. La intoxicación se debe a la ingestión accidental de compuestos de plomo (Londoño *et al.*, 2016).

4.2.1.15. SSED

Los SSED constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodo que resulta de la decantación del agua residual (Llive W.R., 2012). Los SSED son una medida del volumen de sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff, en un periodo de una hora, y

representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple (Romero J.A., 2016).

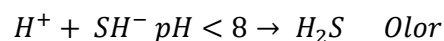
4.2.1.16. SST

Se define analíticamente el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene del residuo de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105°C. Los SS pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son volcados en el ambiente acuático (Llive W.R., 2012).

4.2.1.17. Sulfuros Totales

Las bacterias anaerobias reductoras de sulfatos utilizan el oxígeno de los sulfatos y producen ácido sulfhídrico. En las alcantarillas el ácido sulfhídrico es oxidado por las películas microbiales formadas en las paredes de los tubos, en sulfuros o en ácido sulfúrico. La formación microbial de ácido sulfúrico puede causar problemas serios de corrosión y rotura de los tubos del alcantarillado. El proceso de corrosión por H₂S en estaciones de bombeo y plantas de tratamiento es similar.

Los problemas de olor por H₂S ocurren a valores de pH menor de ocho cuando la forma predominante del sulfuro es la no ionizada de H₂S. A pH mayor de ocho no se presentan problemas de olores por sulfuros, pues la forma existente es la de HS⁻ y S⁼.



Aunque la concentración odorífera de sulfuros es mínima, menos de 1 mg/L, las bacterias pueden tolerar concentraciones hasta de 100 mg/L como S⁼. Sin embargo, algunas solo toleran hasta 10 mg/L S⁼.

4.2.1.18. Temperatura

Es un parámetro importante en las aguas residuales por su efecto en las características del agua, sobre las operaciones y procesos de tratamiento, así como del método de disposición final. En general, las aguas residuales son más cálidas que las de abastecimiento y, en aguas de enfriamiento, la polución térmica es significativa.

La temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto y la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacterial. La

tasa de sedimentación de sólidos en aguas cálidas es mayor que en aguas frías, por el cambio en la viscosidad del agua. En general, los tiempos de retención para tratamiento biológico disminuyen a mayor temperatura y los parámetros de diseño son función de ella.

Como el calor específico del agua es mayor que el del aire, la temperatura del agua residual es mayor que la temperatura del ambiente en periodos fríos y menor que la temperatura del ambiente en periodos cálidos.

La temperatura óptima para la actividad bacteriana es de 25 °C a 35 °C, La digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden cuando la temperatura alcanza los 50°C. Cuando la temperatura es menor de 15°C la digestión metanogénica es muy lenta, y a temperaturas de 5°C la bacteria autotrófica nitrificante deja de operar.

4.2.1.19. Tensoactivos (SAAM)

Los detergentes, agentes tensoactivos o agentes superficiales activos, son compuestos constituidos por moléculas orgánicas grandes, polares, solubles en agua y aceites, que tiene la propiedad de disminuir la tensión superficial de los líquidos que se hallan disueltos. Generalmente se fabrican mediante la mezcla del detergente o agente tensoactivo con sales sódicas como sulfatos, fosfatos, carbonatos, silicatos y boratos. Según el grupo polar hidrófilo pueden ser aniónicos, catiónicos y no iónicos. Los son ampliamente usados y existen en las aguas residuales. Su presencia disminuye la tensión superficial del agua y favorece la formación de espumas, aun en bajas concentraciones, cuando se acumula en la interfaz aire-agua, gracias a la presencia de proteínas, partículas sólidas finas y sales minerales disueltas. Además, inhiben la actividad biológica y disminuyen la solubilidad del oxígeno. Por otra parte los detergentes son fuente principal de fósforo en las aguas residuales y causantes de la eutrofización en lagos. Los detergentes se determinan mediante el ensayo conocido como SAAM. Sustancias activas al azul de metileno, a través de la cuantificación del cambio de color de una solución estándar de azul de metileno (Romero J.A., 2016).

4.2.1.20. Zinc

El método común para remover zinc es el de precipitación. El cinc es un metal que forma hidróxidos anfóteros, solubles a pH alto y a pH bajo. Para la precipitación se usan cal y soda cáustica; el proceso requiere aplicación de una dosis adecuada para lograr el pH óptimo, acompañada de sedimentación y filtración (Romero J.A., 2016).

Aunque se cuenta con información de otros parámetros como ortofosfatos, fósforo, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, acidez total, alcalinidad, dureza cálcica, dureza total no se pueden comparar debido a que no tienen un límite establecido en la normativa.

La empresa ASITEX durante los últimos años ha realizado caracterizaciones de calidad del agua al efluente de su PTARI, para dar cumplimiento a la normativa que como se explicó anteriormente ha venido cambiando a través del tiempo. Para el presente estudio se cuenta con las caracterizaciones de tipo compuesto para los años 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2018, y de un monitoreo puntual que se realizó para el año 2019, todos realizados en laboratorios acreditados por el IDEAM. A continuación, la tabla resumen de las caracterizaciones:

Tabla 7 Resumen de caracterizaciones efluente PTARI ASITEX

Año	2012	2013	2015	2016	2017	2018	2019
Tipo de muestreo	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Puntual
Laboratorio	Compañía de consultoría ambiental		Antek	Analquim	Antek	Analquim	Quimicontrol
Fecha	30 de mayo	16 de julio	31 de octubre	11 de mayo	12 de octubre	24 de octubre	01 de marzo
Normativa	Resolución 3957 de 2009				Resolución 0631 de 2015		

(Fuente: Caracterizaciones PTARI ASITEX)

4.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO

En los años 2012, 2013 y 2015 no se presentan los resultados de los parámetros Aluminio, Arsénico, Bario, Boro, Cianuro, Zinc, Cromo Hexavalente, Hidrocarburos, Hierro, Litio, Plata y Selenio que son requerimiento de la resolución 3957 de 2009. Del año 2014 no se tiene la información.

En el año 2016 no se realizaron análisis de los parámetros hidrocarburos aromáticos policíclicos, BTEX, AOX, ortofosfatos, fósforo, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, acidez, alcalinidad, dureza cálcica y dureza total, solicitados en la resolución 0631 de 2015.

Para el año 2019, se realizó un muestreo puntual de los parámetros que tienen límite establecido en la resolución 0631 de 2015, es decir, no se hace monitoreo de los parámetros catalogados como de análisis y reporte, tampoco se presenta el parámetro temperatura.

Para los años 2015 y 2019 no se tiene información de los parámetros de entrada a la PTARI, es de aclarar que la normativa colombiana exige reporte del vertimiento final a la red de alcantarillado por lo cual no es obligatorio para los usuarios del servicio la presentación de la caracterización antes del tratamiento, los datos que se recopilaron se sacaron como control interno, y con los mismos se va a hacer un análisis de eficiencia de remoción.

Para el presente estudio se van a tener en cuenta los parámetros más importantes característicos de las aguas residuales de las empresas textiles y otros con los que se cuenta información completa y se tienen límites establecidos en las normas, en la **tabla 8** se muestran los parámetros, sus métodos analíticos y la referencia de la norma con la que se hacen los análisis.

La industria textil se caracteriza por tener elevados consumos de agua y producir grandes volúmenes de agua residual, como se observó en la visita realizada a la planta de ASITEX, principalmente en los procesos de tinte y acabados, donde los vertimientos salen con tintes sobrantes y a elevadas temperaturas.

Tabla 8 Método de medición de parámetros.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO	REFERENCIA
Cadmio Total	mg/L	AA de llama	SM 3111B, SM 3030E
Cinc (Zn)	mg/L	ICP, AA de llama	SM 3120B, SM 3111B, SM 3030K
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	Argentométrico, Volumétrico	SM 4500-Cl B
Cobalto (Co)	mg/L	Espectrofotometría de AA	SM 3111B, SM 3030K
Cobre Total	mg/L	AA de llama, ICP, Espectrofotometría de AA	SM 3111B, SM 3120B, SM 3030K
Color	UPC - m-1	Comparación visual, espectrofotométrico - longitud de onda simple, Colorimétrico	SM 2120 B - C , ISO 7887-2011B Método B
Compuestos Fenólicos	mg/L	Directo (4-aminoantipirina), Destilación, extracción con cloroformo	SM 5530 B - C - D
Cromo Total	mg/L	AA de llama, ICP-MS, ICP	SM 3111 B - D, EPA 200.8, SM 3120 B
DBO5	mg/L	Incubación 5 días (electrométrico) - Electrodo de membrana	SM 5210 B, SM 4500-O-G
DQO	mg/L	Reflujo abierto, Reflujo cerrado, volumétrico	SM 5220 B - C
Grasas y Aceites	mg/L	Extracción soxhlet , Partición infrarrojo	SM 5520 B - C
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Extracción soxhlet , Partición infrarrojo	SM 5520 D - F
Níquel (Ni)	mg/L	ICP, AA de llama	SM 3111B, SM 3120B, SM 3030K
pH	Unidad	Electrométrico	SM 4500H+ B
Plomo Total	mg/L	AA de llama	SM 3111B, SM 3030E
SSED	mg/L	Cono imhoff	SM 2540F
SST	mg/L	Gravimétrico (Secado a 105 °C)	SM 2540D
Sulfuros Totales	mg/L	Yodométrico	SM 4500-S2F
Temperatura	°C	Termométrico	SM 2550B
Tensoactivos (SAAM)	mg/L	Colorimétrico , Surfactantes aniónicos	SM 5540C

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran gráficas con los resultados obtenidos a través de los años, donde se muestran los límites exigidos en las normas para cada parámetro, de este modo se identifica visualmente el cumplimiento de cada uno, al final se muestran en una tabla resumen los parámetros que no cumplen con la normatividad en cada año con un breve análisis de los resultados.

Con las caracterizaciones de entrada a la PTARI se realiza un balance de masa, cuantificando porcentualmente la remoción que se tuvo a lo largo de los años, identificando de esta manera si la PTARI opera de manera correcta o si por el contrario los parámetros que se incumplen se deben a una mala operación de la misma.

De los resultados obtenidos se verifica el proceder de los elementos causantes de la contaminación, propendiendo a formular las alternativas más viables para dar cumplimiento a la normativa de vertimientos, identificado la viabilidad de cambios en los procesos productivos, o la implementación de otras alternativas de tratamiento.

5. CASO DE ESTUDIO

5.1. TINTORERÍA ASITEX

Tintorería ASITEX S.A es una empresa Colombiana con gran reconocimiento en el sector textil, fue creada en el año 1975, cuenta con maquinaria de última generación para los procesos de tejeduría, tintorería y acabado de textiles. ASITEX S.A., se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá, en el sector industrial de Puente Aranda (**Figura 2**)

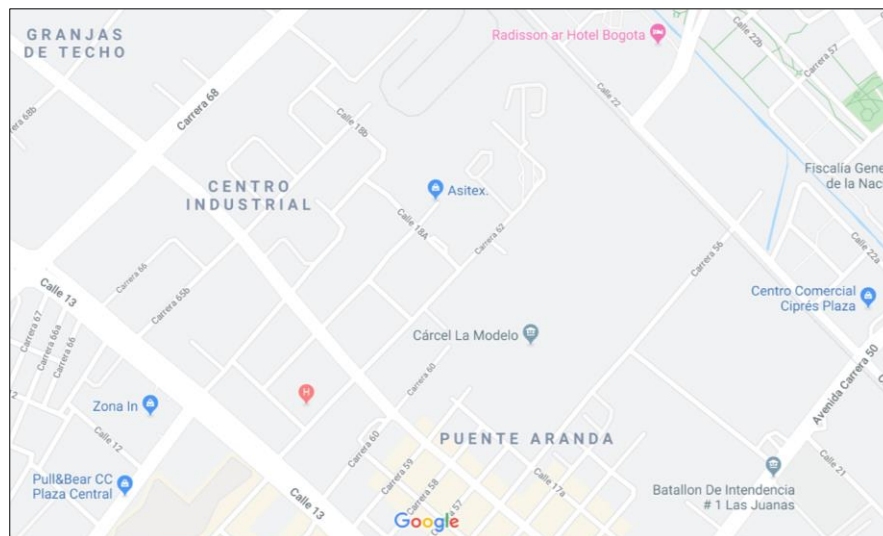


Figura 2 Localización ASITEX S.A. (Fuente: GOOGLE MAPS 2019)

La empresa opera en jornada laboral única de 8am – 5pm, de lunes a sábados. Las instalaciones se encuentran en un predio de 13000 m² aproximadamente que consta de dos secciones, en la primera sección se ubica la planta de tejeduría y almacenaje de telas y en la segunda sección se encuentran las actividades de tintorería y acabado de telas, y la parte administrativa.

Dentro de su proceso productivo cuenta con la generación de tela a partir de hilos de algodón en su sección de tejeduría, seguido de esto, realiza las operaciones de tintorería y acabados de la tela en donde se le dan las características deseadas según el pedido del cliente. ASITEX S.A. presta el servicio de tintorería para los clientes que ya poseen sus propias telas, pero la mayoría de la producción se da en telas creadas en su sección de tejeduría.

Uno de los fuertes de la empresa es el teñido, ya que cuenta con un laboratorio destinado exclusivamente a la preparación de los colorantes según el pedido del cliente, manejando una amplia gama de colores con alrededor de 50 colores diferentes.

La empresa tiene un sistema de medición de color para el desarrollo y verificación de las formulaciones, con un dosificador automático de productos químicos y colorantes (**Figura 3**), máquinas de teñido, foulard y rama de laboratorio, que permiten asegurar la reproducibilidad en planta. Adicionalmente cuenta con equipos para verificar y asegurar las características de la tela en cuanto a solidez al lavado en húmedo, solidez a la luz, solidez al frote seco - húmedo y encogimientos.

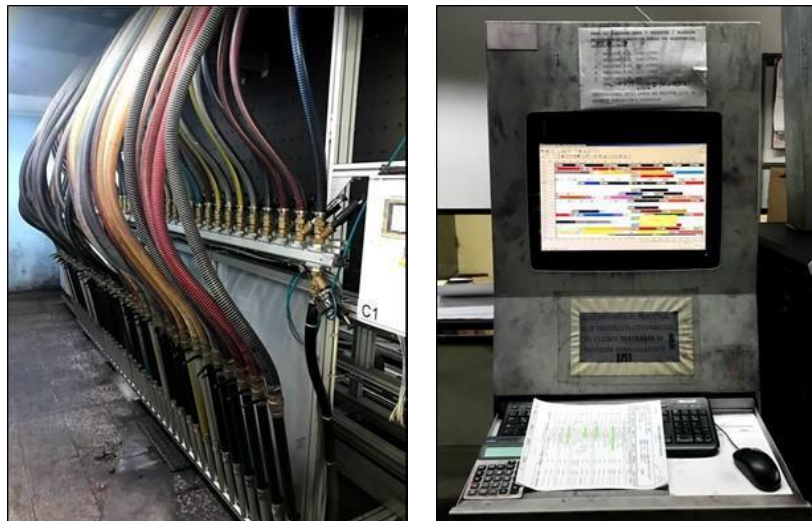


Figura 3 Dosificador Automático de Colorantes. (Fuente: Autor)

5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

5.2.1. Tejeduría

La empresa cuenta con la infraestructura para producir 400 toneladas/mes de tejido de punto circular, en fibras de algodón, poliéster, poliéster – algodón y mezclas con spándex. Y con tejidos como Jersey, Rib, Interlock, Fleece, Falso Fleece, Piqué, desagujados, entre otros. Algunas de las variables para el tejido son la tensión, la velocidad y el estado de las agujas (**Figura 4**).

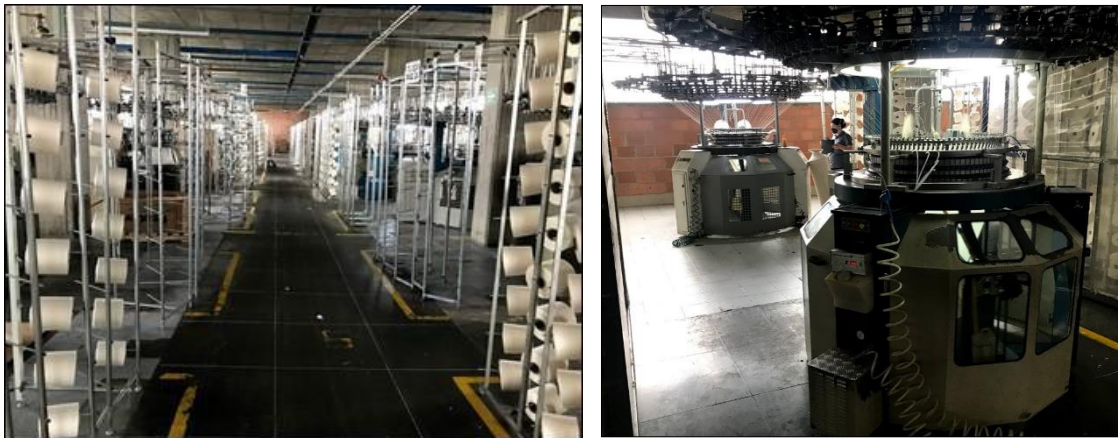


Figura 4 Máquinas de Tejeduría. (Fuente: Autor)

5.2.2. Tintorería

Proceso mediante el cual se le da coloración a la tela por medio de la reacción entre químicos, colorantes, agua y temperatura; los cuales varían dependiendo de la fibra, tipo de tejido y color. Entre más oscura sea la tonalidad del color, mayor es el tiempo y costo. La capacidad mensual de teñido de ASITEX es de 650 toneladas de tela en tejido plano y de punto en todas las fibras y mezclas. El sistema de dosificación automático de productos químicos y colorantes permite en una producción homogénea, con máquinas de teñido de alta temperatura y presión atmosférica, especiales para telas delicadas permiten realizar diversos procesos de preparación, teñido y lavado según los requisitos del cliente (**Figura 5**).



Figura 5 Máquinas de tintorería. (Fuente: Autor)

5.2.3. Acabados

Contamos con máquinas de acabado textil como ramas, perchadora, esmeriladora y compactadora, que nos permiten dar diversos acabados a tejidos planos y de punto, en todas las fibras y mezclas, garantizando las características de la tela en cuanto a encogimientos, tono, solidez y tacto (**Figura 6**).

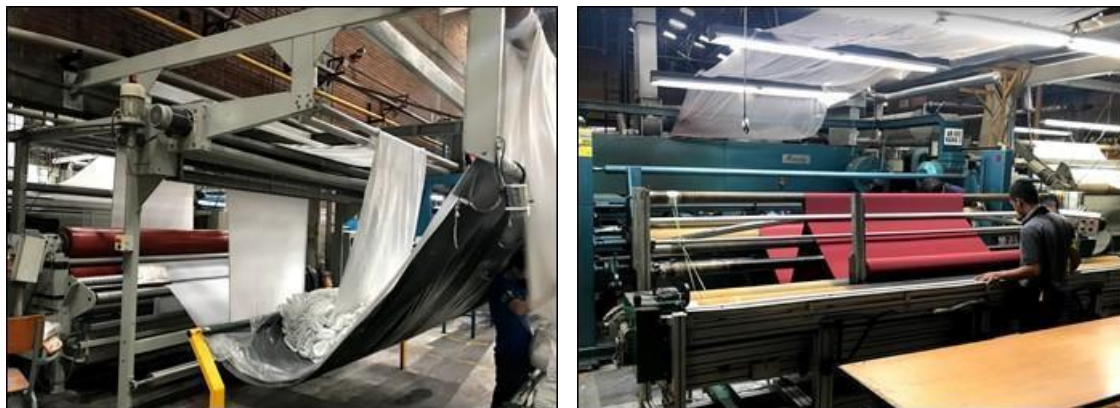


Figura 6 Máquinas de acabados, (Fuente: Autor).

5.3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE ASITEX

La Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial – PTARII de ASITEX S.A. (**Figura 7**) fue diseñada para manejar un caudal de 19 L/s y una vez tratada el agua esta es vertida al alcantarillado público. Está constituida por un tanque de recepción de agua cruda, torre de enfriamiento, tanque de primario, sedimentador, tanques de retención, tanque de equilibrio, filtros multimedia, tanque de oxidación y lechos de secado.

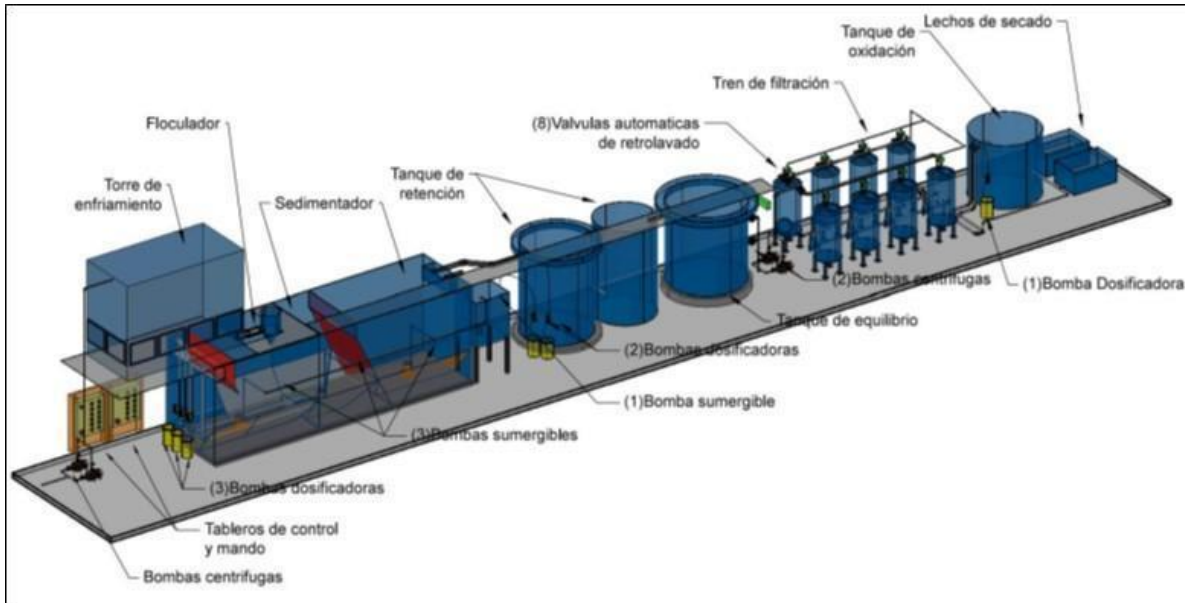


Figura 7 Disposición de elementos de la PTARII, (Fuente: Manual de operaciones planta ASITEX).

5.3.1. Almacenamiento de agua cruda (tanque de homogeneización)

Es un tanque subterráneo que tiene como objetivo eliminar las descargas violentas de agua al sistema; al igual que funciona como tanque de almacenamiento y homogeneización del agua cruda. De este tanque el agua es bombeada a la torre de enfriamiento. El sistema cuenta con dos bombas centrífugas de 20 HP.

5.3.2. Torre de Enfriamiento

La PTARII cuenta con una torre de enfriamiento de dimensiones 5 m de largo y 2 m de ancho y 4 m de alto en donde ocurre un contacto directo entre el agua a enfriar y el aire que circula. El agua transfiere energía calorífica al aire mediante evaporación hasta llegar a saturar (**Figura 8**).



Figura 8 Torre de Enfriamiento, (Fuente: Manual de operaciones PTARII)

5.3.3. Medidor de pH

En la parte inferior de la torre de enfriamiento se encuentra instalado un electrodo para medir el pH del agua que va al tanque primario para iniciar el proceso de tratamiento. En el tablero eléctrico se encuentra instalada la pantalla para observar el valor del pH registrado.

5.3.4. Tanque Primario

De la torre de enfriamiento el agua llega al tanque primario en donde se inyecta a través de dos bombas dosificadoras los químicos: coagulante (hidroxicloruro de aluminio) y floculante (polímero) en un cono de mezcla para que ocurran los procesos de coagulación y floculación. La coagulación y floculación son procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. El agua tratada pasa por gravedad por la parte superior del tanque a través de una tubería al sedimentador. En el fondo del tanque primario hay una bomba sumergible para cuando sea necesario realizar purga de lodos sedimentados.

5.3.5. Sedimentador

La PTARII cuenta con un sedimentador primario en donde se inyecta floculante (polímero) a través de una bomba dosificadora. En este el agua llega por la parte superior y a través de una tubería baja hasta el fondo del sedimentador primario, sale y va subiendo hasta salir por la parte superior del sedimentador primario. Luego, el agua entra al sedimentador secundario por la parte superior y baja igualmente hasta el fondo a través de una tubería, sale y va subiendo hasta salir por la parte superior del sedimentador secundario para pasar

a los tanques de retención. Durante este proceso los flocs grandes comienzan a precipitar quedando en el fondo de los sedimentadores, arrastrando consigo flocs de menor tamaño que van ascendiendo, generando así un intercambio y formándose el denominado lecho fluidizado. Finalmente, dicho lecho adquiere mayor densidad precipitando en el fondo los flocs más pesados en forma de lodo. El agua clarificada en los sedimentadores continúa su ascenso hasta llegar a la zona de módulos de sedimentación acelerada, que son los encargados de disminuir la velocidad de algunos flocs que logran ascender. Estos módulos son paneles hexagonales tipo colmena. En el fondo del sedimentador primario y secundario se encuentra una bomba sumergible para cuando sea necesario realizar la purga de los lodos acumulados en el fondo de los sedimentadores.

5.3.6. Tanques de retención

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es uno de los parámetros más importantes en todo sistema de tratamiento de aguas residuales. La planta tiene dos tanques de retención de 2.80 metros de altura cuya función es que el agua llegue y tenga un tiempo de retención óptimo para que se complete la clarificación del agua. El primer tanque de retención cuenta con dos bombas dosificadoras de químicos para que cuando sea necesario inyectar más químicos, pueda realizarse en este tanque. El agua entra por la parte superior de los tanques, baja a través de una tubería y va subiendo hasta salir por la parte superior al siguiente tanque y luego pasa al tanque de equilibrio.

5.3.7. Tanque de equilibrio

El agua clarificada llega a este tanque para ser almacenada antes de pasar al proceso de filtración. El tanque tiene 2.50 m de altura y 2.50 m de diámetro para una capacidad de almacenamiento total de 12.27 litros. El agua llega por la parte superior, baja a través de una tubería hasta el fondo y va subiendo hasta salir por la parte superior. Luego se encuentran dos bombas centrifugas de 3HP para enviar el agua hasta los filtros.

5.3.8. Filtros

La PTARII cuenta con ocho unidades de filtración multimedia cuyos medios filtrantes son: grava, arena y carbón activado (**Figura 9**). Los medios filtrantes se acomodan unos sobre otros dentro del filtro, estos van deteniendo las partículas de mayor tamaño en los estratos superiores y las de menor tamaño en los inferiores (flujo descendente). Este proceso permite un filtrado más fino y eficiente, removiendo sólidos, partículas y eliminando el color del agua. El agua pasa por un filtro de anillos ubicado en la tubería de descarga de las

bombas centrífugas el cual está constituido por un cartucho de anillos ranurados que se aprietan unos con otros dejando pasar el agua y reteniendo aquellas partículas cuyo tamaño sea mayor al paso de las ranuras. Luego entra a los filtros por la parte superior, realiza el proceso de filtrado y sale por la tubería ubicada en el costado inferior de cada filtro para ir al tanque de cloración.

En la tubería de descarga de los filtros se encuentra un medidor de agua marca Bermad que funciona bajo el principio woltman con aletas helicoidales las cuales giran sobre un eje central paralelo a la dirección del agua en la tubería, permitiendo medir la cantidad de agua que sale de los filtros. Luego se encuentra una válvula de compuerta que abre o cierra el flujo de agua hacia el tanque de cloración. Finalmente, en la tubería de descarga del agua de retrolavado de los filtros se encuentra un medidor de agua octave, medidor ultrasónico de gran precisión para medir el agua de salida cuando se han retrolavado los filtros.



Figura 9 Tren de Filtración, (Fuente: Manual de operaciones PTARII).

5.3.9. Tanque de Oxidación

Es un tanque de fibra de vidrio de 2.5 m de altura y 3 m de diámetro. Este tanque se encuentra al final del proceso y tiene instalada una bomba dosificadora con la cual se inyecta cloro al agua para realizar la desinfección final en donde se eliminan microorganismos y se puede obtener una mejor calidad de agua ya que se podría disminuir el DQO. El agua entra por la parte superior del tanque, baja a través de una tubería hasta el fondo y al llenarse sale por una tubería ubicada en la parte superior que lleva el agua hasta el alcantarillado.

5.3.10. Tanque de recepción de lodos

El tanque de recepción de lodos se ubica entre el sedimentador y el primer tanque de retención. Tiene 1.3 m de alto x 1.21 m de largo x 1.03 m de ancho, para un volumen de 1.68 m³. La función de este tanque es recibir los lodos que se forman en el tanque primario y en los sedimentadores. En el tanque primario y en cada uno de los sedimentadores hay una bomba sumergible que bombea los lodos a este tanque, donde posteriormente se vuelven a bombear los lodos a los lechos de secado.

5.3.11. Lechos de Secado

La PTARII cuenta con dos lechos de secado de arena de 1.49 m de largo x 0.97 m de ancho x 0.70 m de alto cada uno (**Figura 10**). En estos ocurre el proceso de deshidratación de lodos que consiste en extraer el agua para formar una masa manejable de sólidos. Los lodos se colocan sobre camas de arena durante varios días (7 – 15 días normalmente). El agua pasa a través de los lechos y los sólidos quedan en la superficie. Cuando están suficientemente secos, se retiran los lodos de forma manual y son dispuestos como residuos sólidos ordinarios.



Figura 10 Lechos de Secado, (Fuente: Manual de operaciones planta ASITEX)

5.3.12. Tableros de control y mando

En el tablero de control y mando se encuentran conectados todos los equipos eléctricos de la planta (bombas dosificadoras, bombas centrifugas, bombas sumergibles, actuadores de los filtros). Este tablero cuenta con un Controlador Lógico Programable (PLC) el cual permite operar la planta de manera manual encendiendo los equipos manualmente o de manera automática cuando es seleccionada esta opción.

5.4. CAMBIOS IMPORTANTES DE LA PTARI EN EL TIEMPO

La empresa ASITEX ha invertido en modificaciones a lo largo del tiempo, con el fin de mejorar los procesos o ajustar caudal de operación, a continuación los principales cambios:

Tabla 9 Modificaciones de la PTARI en el tiempo

AÑO	ADECUACIÓN
2012	Se realizó Proceso de Sand Blasting y aplicación de resina en tanque de reacción principal del sistema de tratamiento. Esta mejora se realizó debido a la problemática asociada a la generación de sulfuro dentro del sistema, la cual atenúo la corrosión por la generación de ácido sulfúrico.
2014	Se adquiere una nueva torre de enfriamiento con mayor capacidad, teniendo en cuenta el incumplimiento de temperatura superior a 30 grados centígrados de acuerdo a la normatividad ambiental vigente en su momento.
2015	Reconversión total del sistema de tratamiento de aguas residuales: compartimiento floculación, módulos, barredor manual, bombas dosificadoras, tanque de química, medidor de pH, tren de filtración 8 unidades, cambio de drenajes a PVC e Instalación del PLC.
2017	Aumento en la capacidad de agua del sistema de tratamiento y sustitución del clarificador principal.

5.5. ESTADO ACTUAL DE LA PTARI

La planta está operando actualmente con un caudal promedio de 14 L/s de manera semicontinua dependiendo de la demanda de producción, el caudal está dentro del rango de operación según diseño (11 a 19 L/s).



Figura 11 Panorámica PTARII, (Fuente: Manual de operaciones planta ASITEX)

Inicialmente el agua llega al tanque de homogenización que tiene un volumen aproximado de 150m³, el cual recibe las aguas residuales de todos los procesos industriales de la planta de producción.

Desde el tanque de homogenización se bombean las aguas residuales a una torre de enfriamiento la cual baja la temperatura del agua de 60°C a 28°C aproximadamente. Después de la torre de enfriamiento se hace un control de pH, el cual está entre 8.5 y 12.2.

ASITEX también cuenta con un medidor de cloruros, se hacen mediciones diarias encontrando un promedio de 2200 ppm aproximadamente, según registro de los últimos 6 meses.

Como se mencionó anteriormente el proceso fisicoquímico se compone de coagulación, floculación, filtración y desinfección.

A continuación el listado de químicos usados en el tratamiento:

1. Ácido nítrico: Se usa como nivelador de pH.
2. Poliacrilamida: Se usa como decolorante.
3. Hidroxicloruro de aluminio: Se usa como coagulante.
4. Floculante catiónico de bajo peso molecular.
5. Hipoclorito de sodio: Se usa para desinfección.

El proceso al final tiene un costo promedio de \$2100/m³ de agua tratada.

Según información recopilada en visitas de campo se nota que la problemática principal que tiene la planta es que no hay una carga constante debido a la diversidad de elementos usados en los procesos productivos, dentro de los que se destacan: colorantes directos, reactivos y dispersos además de secuestrantes, aglomerantes y gomas. Esta variedad en los productos y concentraciones genera que las dosis de los elementos usados para tratamiento sean variables y dificulta la operación.

Para la operación no se cuenta con equipo de jarras, elemento con el que se podría determinar la cantidad de químicos óptima a usar dependiendo de las características del afluente.

Lo anterior ocasiona que en momentos se genere incumplimiento de la normativa, es decir que si bien los procesos de tratamiento pueden ser los apropiados, las dosis usadas

pueden ser insuficientes o excesivas generando que no sea óptimo el sistema de dosificación, lo que puede implicar sobrecostos en tratamiento y parámetros por fuera de norma.

5.6. PORCENTAJES DE REMOCIÓN

Inicialmente se definirá como sistema el conjunto de procesos que componen la planta de tratamiento de agua residual, debido a que no se cuenta con mediciones an la entrada y salida de cada uno de los procesos, se determinará el balance considerando las caracterizaciones de entrada y salida de la PTARI en los años en que se tienen ambas mediciones, a continuación, las tablas que resumen los resultados obtenidos para los diferentes elementos.

Tabla 10 Resultados afluente PTARI

PARÁMETRO	UNID	ENTRADA PTARI				
		2012	2013	2016	2017	2018
Cadmio Toztal	mg/L	0.013	<0.007	<0.015	<0.01	<0.002
Cinc	mg/L	ND	ND	<0.014	0.22	0.07
Cloruros	mg/L	ND	ND	427	761	713.8
Cobalto	mg/L	ND	ND	<0.048	<0.05	0.016
Cobre Total	mg/L	0.44	0.22	<0.055	<0.05	0.037
				8.31	23.6	10
Color	m-1	22	>500	3	15.5	5.4
				1.68	10.2	3.6
Compuestos Fenólicos	mg/L	<0.07	0.293	0.193	<0.07	<0.049
Cromo Total	mg/L	<0.05	<0.05	<0.18	<0.05	<0.011
DBO5	mg/L	327	789	628	365	132
DQO	mg/L	810	1160	937	1024	1204.3
Grasas y Aceites	mg/L	170	60.7	56.2	21	46.2
Hidrocarburos Totales	mg/L	NR	NR	18.9	10	20.2
Níquel	mg/L	NR	NR	<0.204	<0.05	0.02
pH	Und	8.4	9.54	8.87	*10.44	* 8.735
Plomo Total	mg/L	0.1	<0.05	NR	NR	NR
Solidos Sedimentables	mg/L	0.1	0.1	<0.1	<0.1	*8.75
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	179	117	78	71	128.7
Sulfuros Totales	mg/L	<1.2	0.6	<0.52	<0.08	<0.8

Temperatura	°C	44	41.5	40.3	*44	*43.75
Tensoactivos	mg/L	1.42	2.71	0.379	5.18	0.939

NR: No Registro; * Promedio

Tabla 11 Resultados efluente PTARI

PARÁMETRO	UNID	SALIDA PTARI						
		2012	2013	2015	2016	2017	2018	2019
Cadmio Total	mg/L	0.015	<0.007	0.014	<0.015	<0.01	<0.002	<0.002
Cinc	mg/L	NR	NR	NR	<0.014	0.05	0.07	0.02
Cloruros	mg/L	NR	NR	NR	1400	1776.9	639.5	251.4
Cobalto	mg/L	NR	NR	NR	<0.048	<0.05	0.01	<0.01
Cobre Total	mg/L	0.2	0.212	0.18	<0.055	<0.05	0.014	0.03
					24.7	20.8	0.9	NR
Color	m-1	**12	**>500	6	19	14	0.4	NR
					9.41	9.3	0.4	NR
Compuestos Fenólicos	mg/L	<0.07	<0.04	<0.07	0.115	<0.07	<0.049	<0.049
Cromo Total	mg/L	<0.05	<0.05	0.009	<0.18	<0.05	<0.011	0.011
DBO5	mg/L	410	447	813	229	238	102	557.9
DQO	mg/L	1020	893	1236	393	710	475.5	1012.2
Grasas y Aceites	mg/L	20	51.7	43	2.34	7	12.8	22.3
Hidrocarburos Totales	mg/L	NR	NR	NR	0.683	<10	2.94	18.8
Níquel	mg/L	NR	NR	NR	<0.204	<0.05	0.013	<0.011
pH	Und	6.7	8.2	8.5-8.9	6.85	*7.59	*7.68	6.37
Plomo Total	mg/L	0.09	<0.05	0.09	NR	NR	NR	NR
Solidos Sedimentables	mg/L	0	0.1	<0.1-0.3	60	<0.2	<0.4	0.3
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	58	113	74	266	34	72	64
Sulfuros Totales	mg/L	23.2	5.7	1.6	<0.52	<0.8	<0.8	NR
Temperatura	°C	32	25.3	19.7-22.3	25.2	*21.5	*24.25	NR
Tensoactivos	mg/L	1.21	2.49	5.05	3.97	2.29	<0.14	3.4

NR: No registro de dato; **: unidades platino cobalto

Debido a que no se tienen resultados a la entrada de la PTARI para los años 2014, 2015 y 2019, el balance de materia no se pudo realizar para esos años, en la tabla 12 se muestra el porcentaje de remoción obtenido para el resto de años analizados desde 2012 hasta 2018

Tabla 12 Remoción histórica

PARÁMETRO	UNID	Porcentajes de remoción (%)				
		2012	2013	2016	2017	2018
Cadmio Total	mg/L	0	N/A	N/A	N/A	N/A
Cinc	mg/L	NR	NR	N/A	77	0
Cloruros	mg/L	NR	NR	0	0	10
Cobalto	mg/L	NR	NR	N/A	N/A	38
Cobre Total	mg/L	55	4	N/A	N/A	62
				0	12	91
Color	m-1	45	0	0	10	93
				0	9	89
Compuestos Fenólicos	mg/L	N/A	86	4	N/A	N/A
Cromo Total	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
DBO5	mg/L	0	43	64	35	23
DQO	mg/L	0	23	58	31	61
Grasas y Aceites	mg/L	88	15	96	67	72
Hidrocarburos Totales	mg/L	ND	ND	96	0	85
Níquel	mg/L	ND	ND	N/A	N/A	35
pH	Und	20	14	23	27	12
Plomo Total	mg/L	10	N/A	NR	NR	NR
Solidos Sedimentables	mg/L	100	0	0	N/A	95
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	68	3	0	52	44
Sulfuros Totales	mg/L	0	0	N/A	N/A	N/A
Temperatura	°C	27	39	37	51	45
Tensoactivos	mg/L	15	8	0	56	85

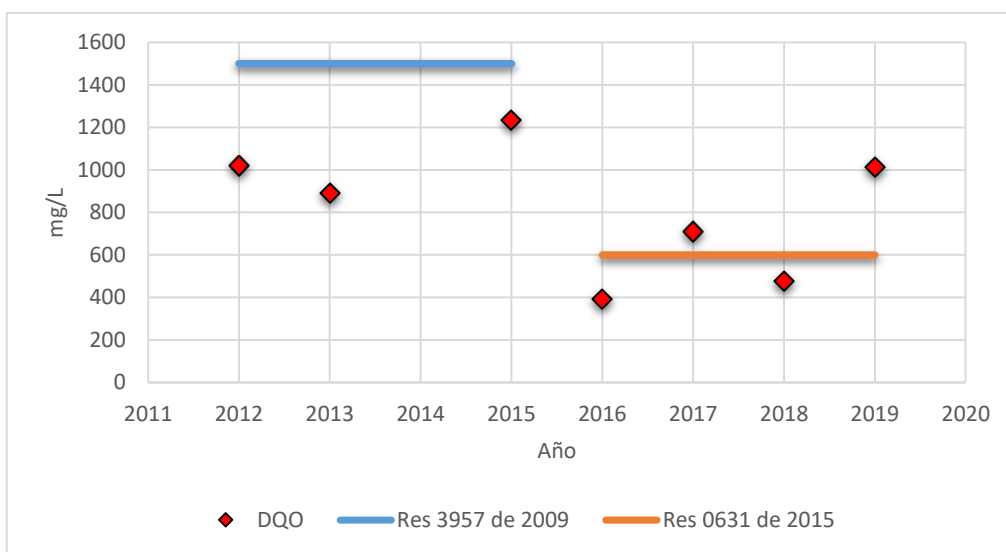
ND: No registro de dato; **N/A:** No Aplica

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. CUMPLIMIENTO NORMATIVO

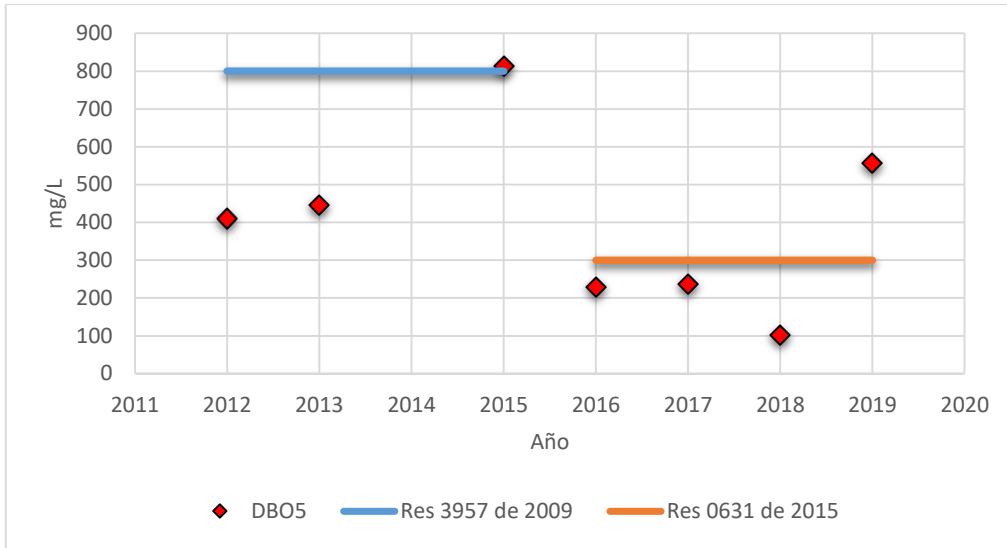
A continuación se muestran gráficamente los resultados de los análisis realizados a los diferentes parámetros desde el año 2012 hasta el año 2019, en las gráficas se puede ver el cambio en la exigencia normativa (resolución 3957 de 2009 a resolución 0631 de 2015) y el comportamiento histórico de las concentraciones para los parámetros de estudio.

6.1.1. Verificación gráfica



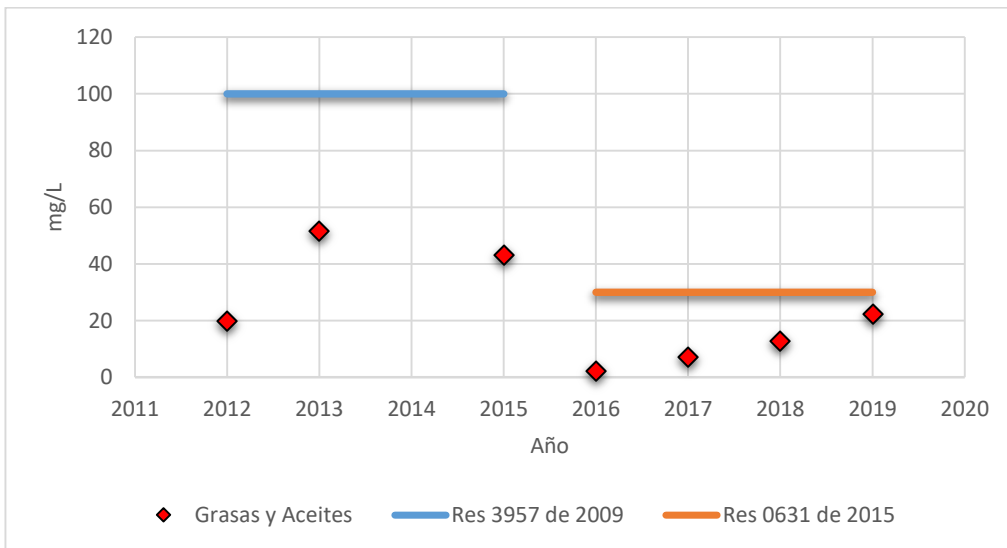
Gráfica 1 Resultados y normativa para el parámetro DQO

Se observa que el límite máximo permisible tiene un notable cambio con la entrada en vigencia de la resolución 0631 de 2015, pasando de exigir 1500 mg/l a 600 mg/l, los resultados a la salida de la PTARI también tienen una tendencia a disminuir sus concentraciones, sin embargo se presenta incumplimiento en los años 2017 y 2019.



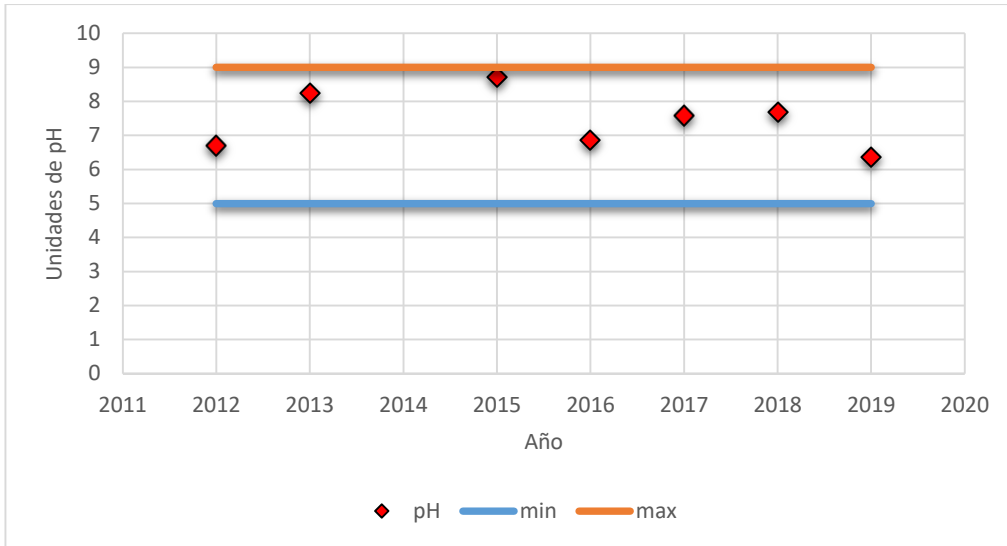
Gráfica 2 Resultados y normativa para el parámetro DBO5

Al igual que con la DQO se observa una mayor exigencia actual de este parámetro, pasando de 800 mg/l a 300 mg/l, los años que presentan un mayor valor al límite exigido en su momento son 2015 y 2019.



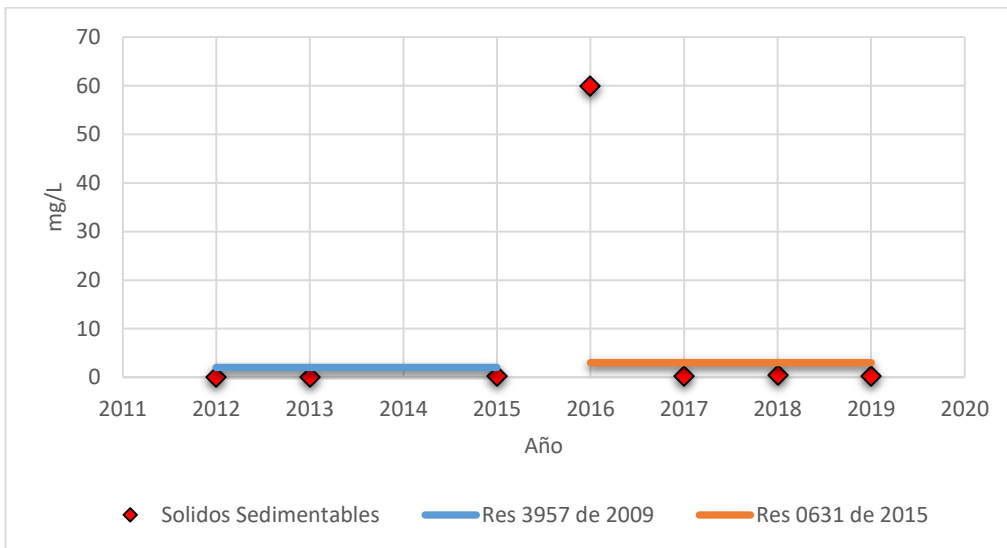
Gráfica 3 Resultados y normativa para el parámetro Grasas y aceites

Grasas y aceites están presentes en los vertimientos de ASITEX, la normativa actual también es más exigente que con los anteriores parámetros analizados, pasando de 100mg/l a 30mg/l, se nota el esfuerzo de la empresa por mejorar sus procesos ya que es notable que cuando cambio la norma, los efluentes también bajaron sus concentraciones, generando que en ningún año se presenten valores por fuera de norma en cuanto a este parámetro.



Gráfica 4 Resultados y normativa para el parámetro pH

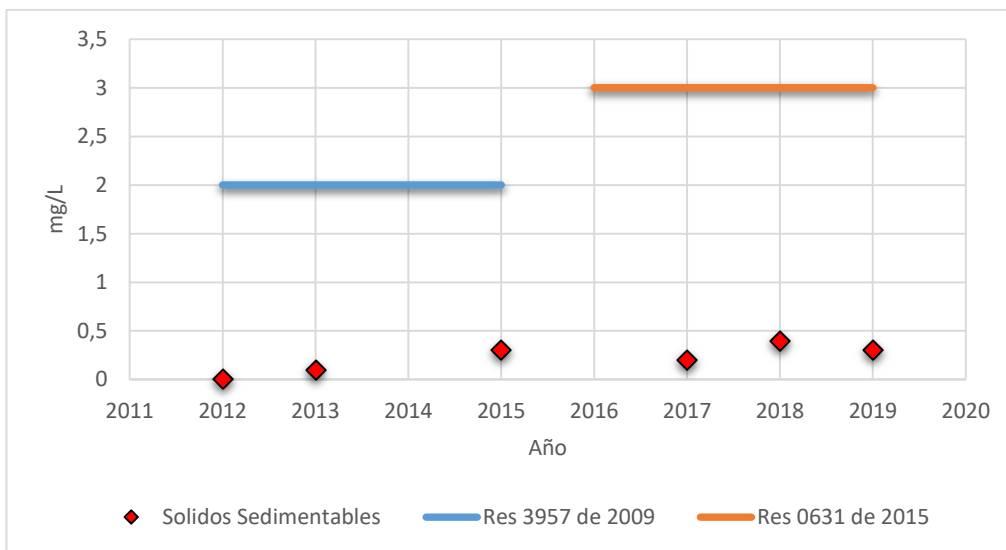
El parámetro pH presenta cumplimiento en todas las caracterizaciones presentadas, su exigencia no varió con el cambio de la normativa, se exigen valores entre 5 y 9 unidades de pH.



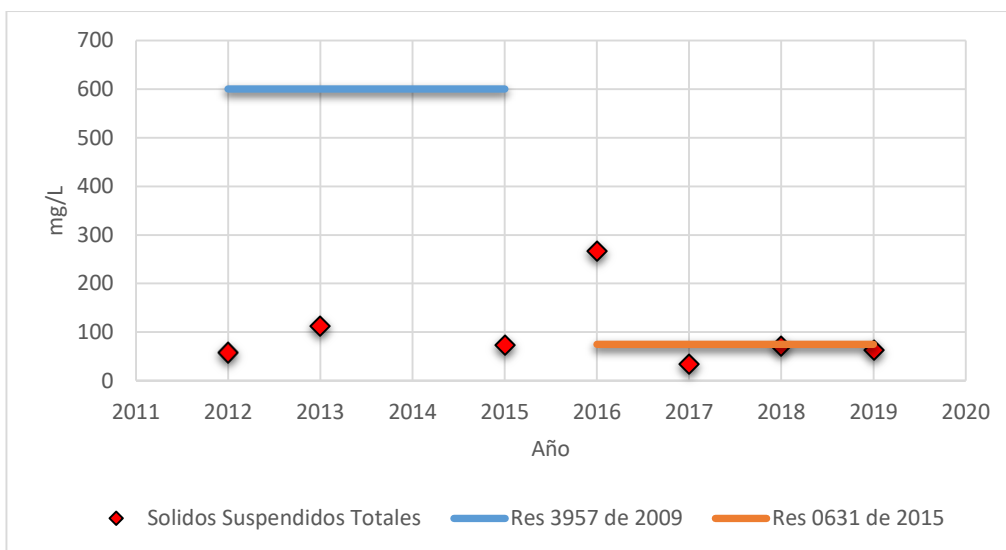
Gráfica 5 Resultados y normativa para el parámetro SSED

El parámetro SSED tuvo un cambio leve en la exigencia normativa, pasando de 2 mg/l en la resolución 3957 de 2009 a 3mg/l en la resolución 0631 de 2015, sin embargo en general se han presentado valores menores a 0.4mg/l excepto en el año 2016 donde se obtuvo un valor de 60mg/l que al ser tan elevado y sin concordar con la tendencia, se concluye que pudo ser un error de digitación o análisis, por lo que se toma la decisión de omitir este

parámetro, obteniendo así la siguiente gráfica que por su escala muestra los resultados más claramente.

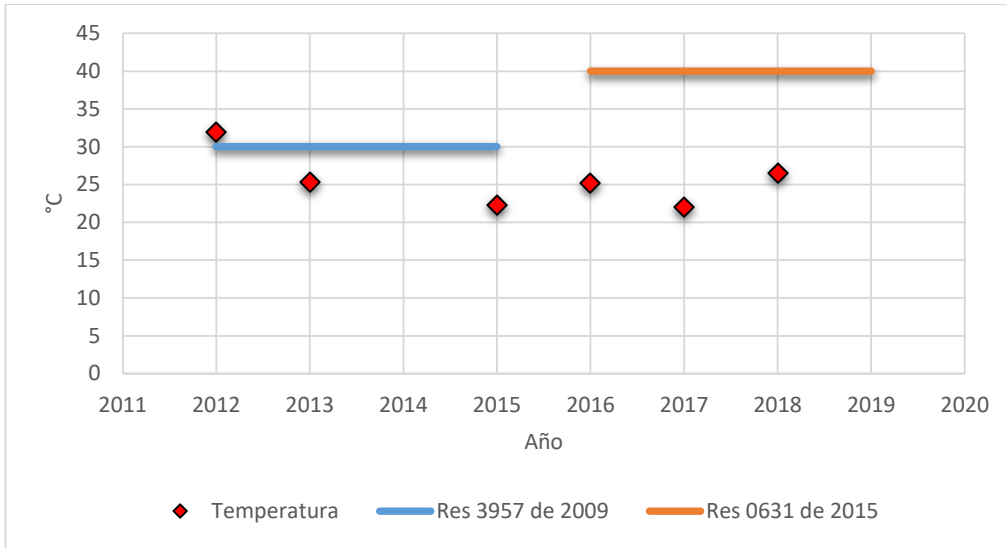


Gráfica 6 Resultados y normativa para el parámetro SSED 2



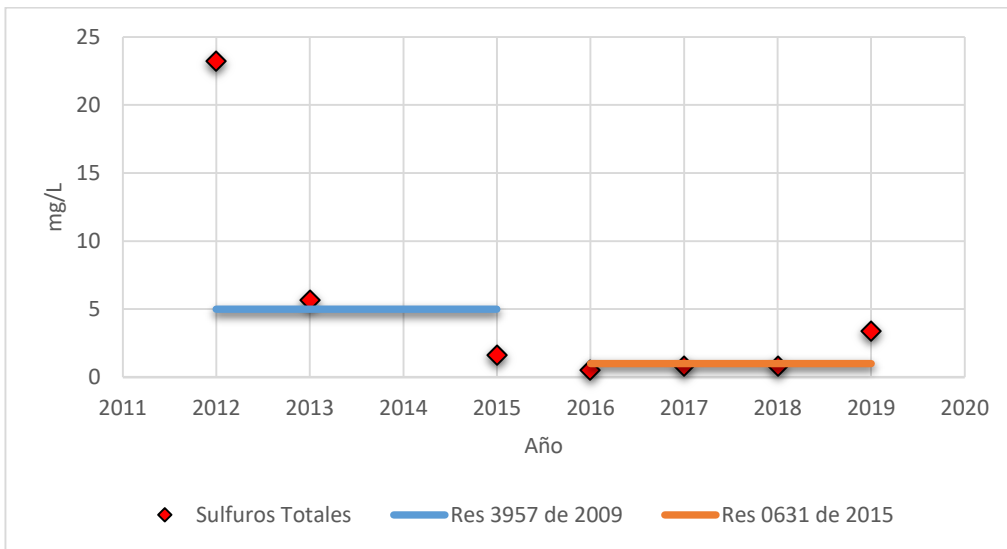
Gráfica 7 Resultados y normativa para el parámetro SST

Los SST también tuvieron un cambio considerable en la exigencia normativa, pasando de 600mg/l a 75mg/l. En el año 2016 el reporte de la caracterización está por encima del límite máximo permisible.



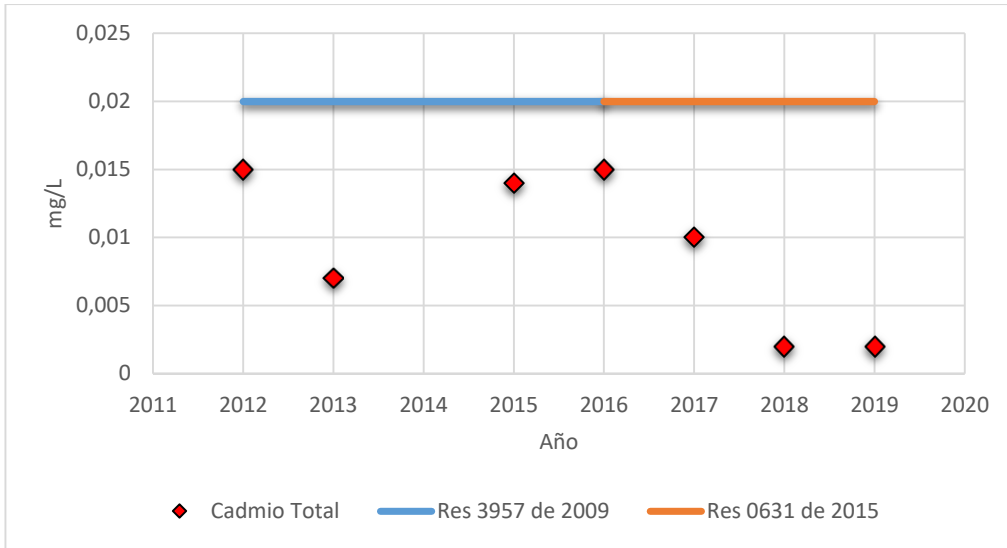
Gráfica 8 Resultados y normativa para el parámetro Temperatura

El parámetro temperatura exigido actualmente es de 40°C para todas las actividades que generen vertimiento de tipo no doméstico al alcantarillado público, anteriormente la exigencia era de 30°C, las aguas provenientes de la industria textil tienen valores relativamente altos, lo que se nota en el año 2012 donde se presentó incumplimiento.



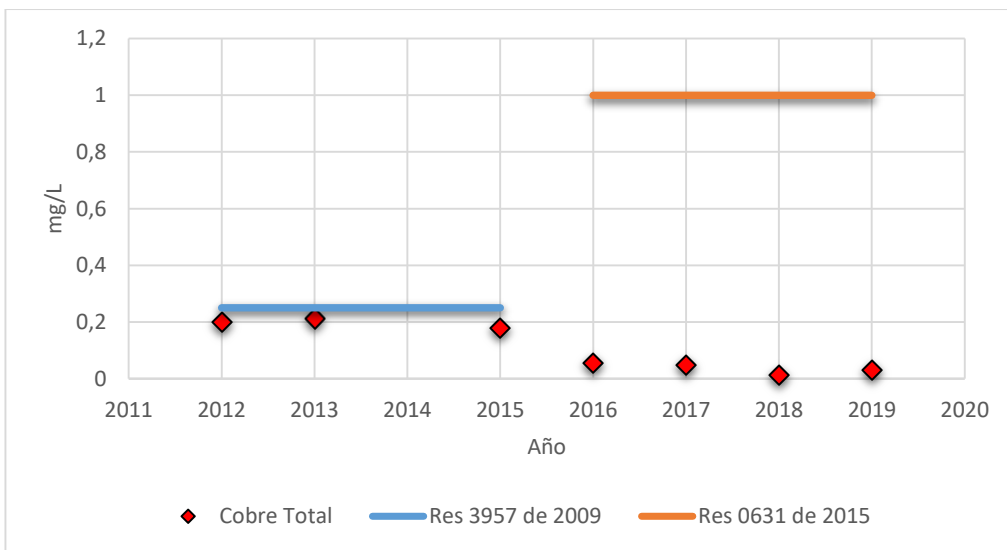
Gráfica 9 Resultados y normativa para el parámetro Sulfuros totales

En ASITEX también se nota un problema con este parámetro, ya que se muestra incumplimiento en 3 de los 7 años analizados, la normativa pasó de exigir 5mg/l a 1mg/l para empresas textiles. Valores elevados de este parámetro pueden generar mal olor.



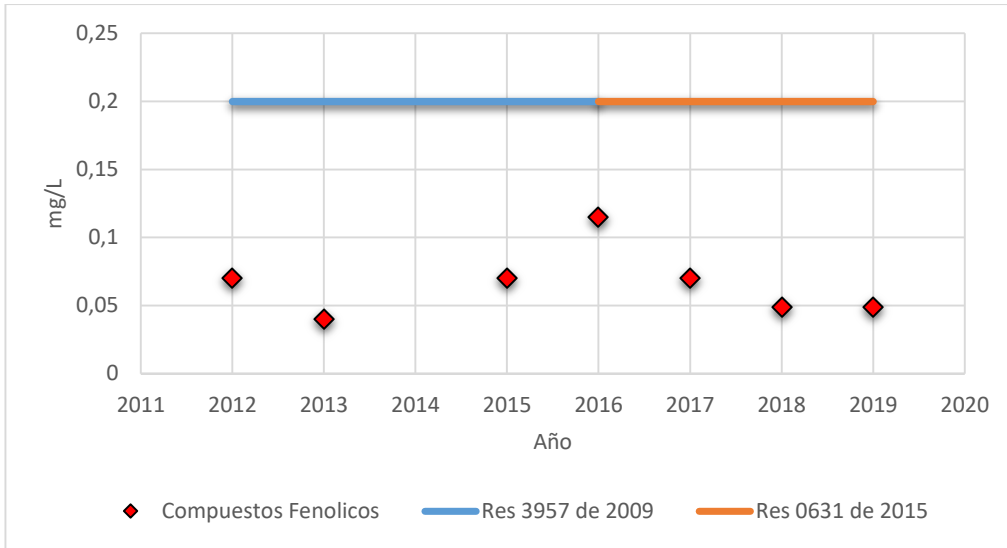
Gráfica 10 Resultados y normativa para el parámetro Cadmio total

Este parámetro presenta cumplimiento a lo largo del tiempo, la normativa exige una concentración de 0.02mg/L.



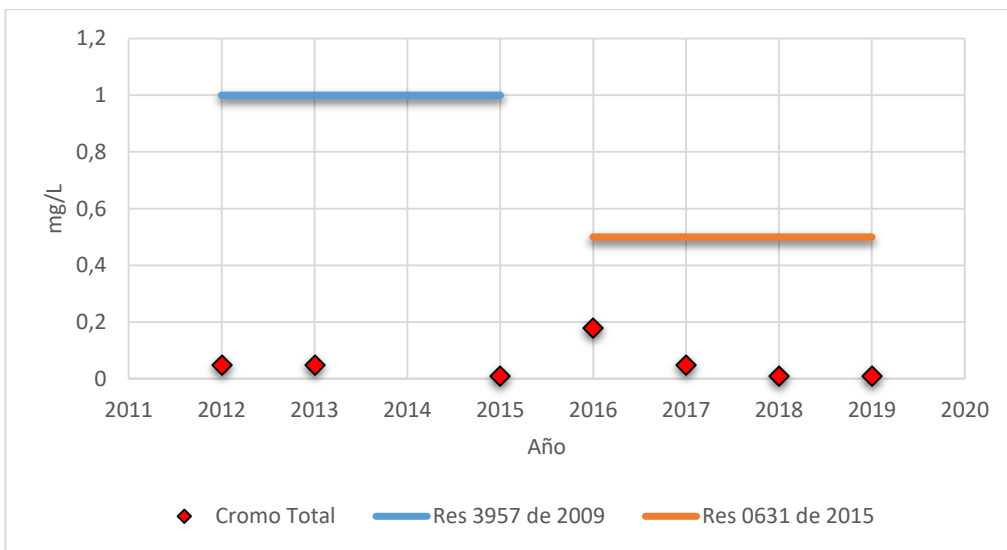
Gráfica 11 Resultados y normativa para el parámetro Cobre total

El cobre es un parámetro que cuya exigencia en la normativa anterior era más exigente que la actual, pasando de 0.25mg/l en la resolución 3957 de 2009 a 1mg/l en la resolución 0631 de 2015. Este parámetro no ha tenido complicaciones en cuanto a cumplimiento en ninguno de los años analizados.



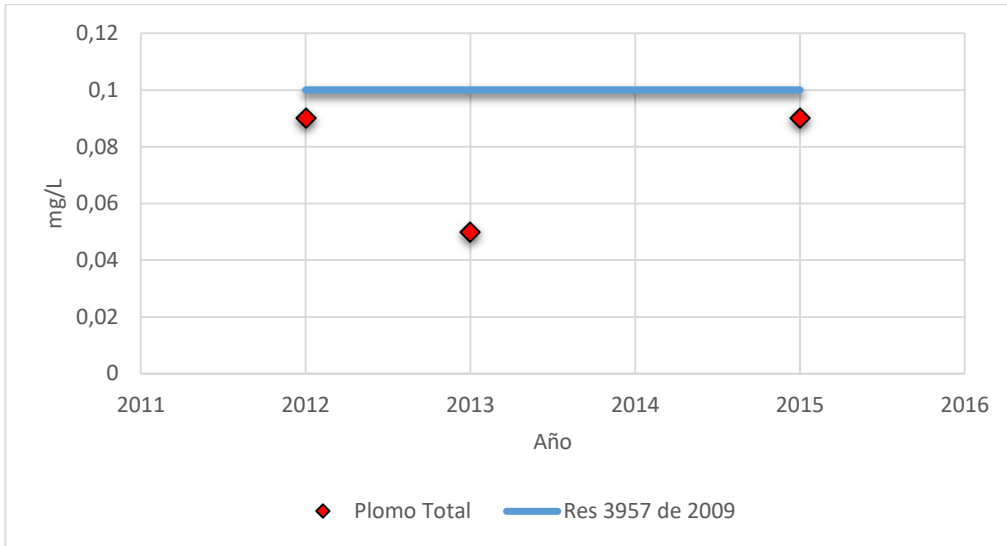
Gráfica 12 Resultados y normativa para el parámetro Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos han mantenido una exigencia de 0.2mg/l como máximo a través de los años, los resultados reportados indican cumplimiento.



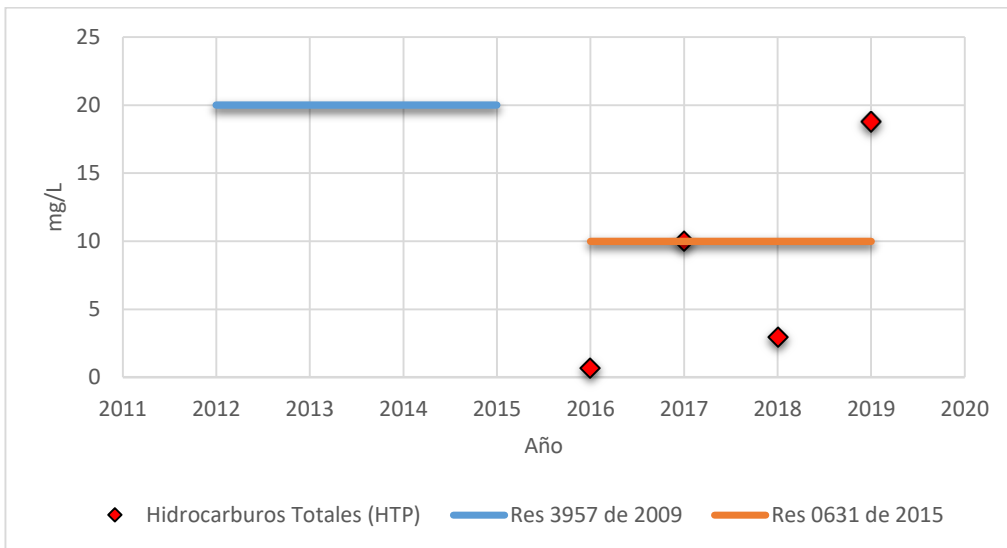
Gráfica 13 Resultados y normativa para el parámetro Cromo total

Como se observa en la gráfica, la normativa cambió, pasando de 1mg/l exigidos como máximo en la resolución 3957 de 2009 a 0.5mg/l en la resolución 0631 de 2015, los reportes indican cumplimiento.



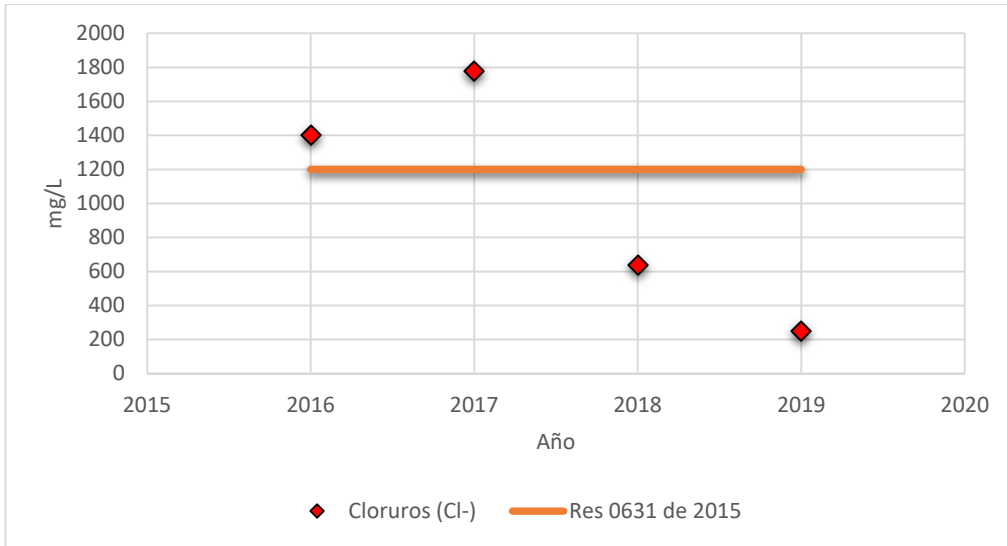
Gráfica 14 Resultados y normativa para el parámetro *Plomo total*

Este metal pesado solo fue analizado del 2015 hacia atrás debido a que cuando se adoptó la resolución 0631 de 2015 como normativa vigente se quitó la exigencia de análisis del mismo para empresas textiles, de los reportes obtenidos se evidencia cumplimiento.



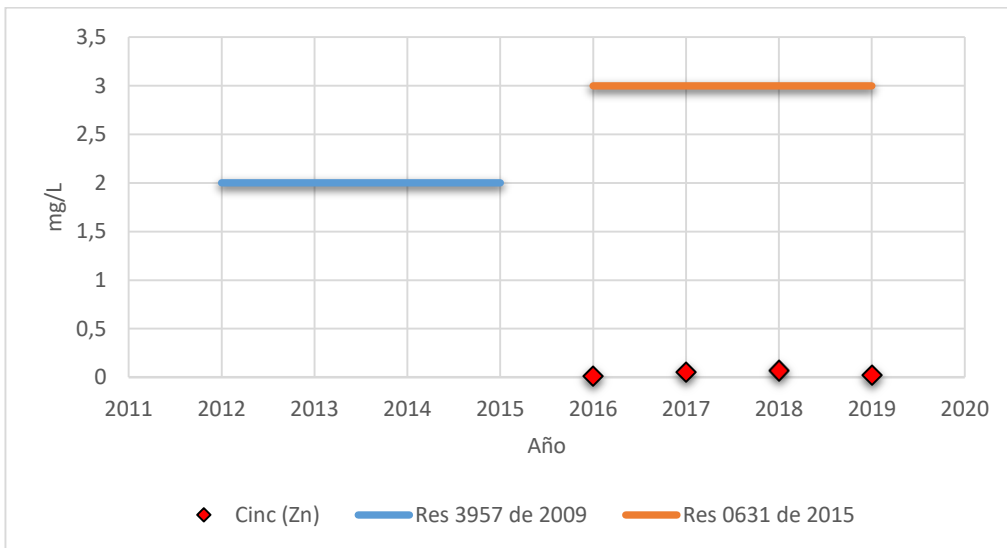
Gráfica 15 Resultados y normativa para el parámetro *Hidrocarburos totales*

El parámetro hidrocarburos totales cambio en cuanto a su exigencia normativa pasando de 20mg/l a 10 mg/l. De los resultados obtenidos se observa incumplimiento en el año 2019, se debe tener en cuenta que no se pudo hacer la comparación del 2015 hacia atrás ya que no se analizó el parámetro en esos años.



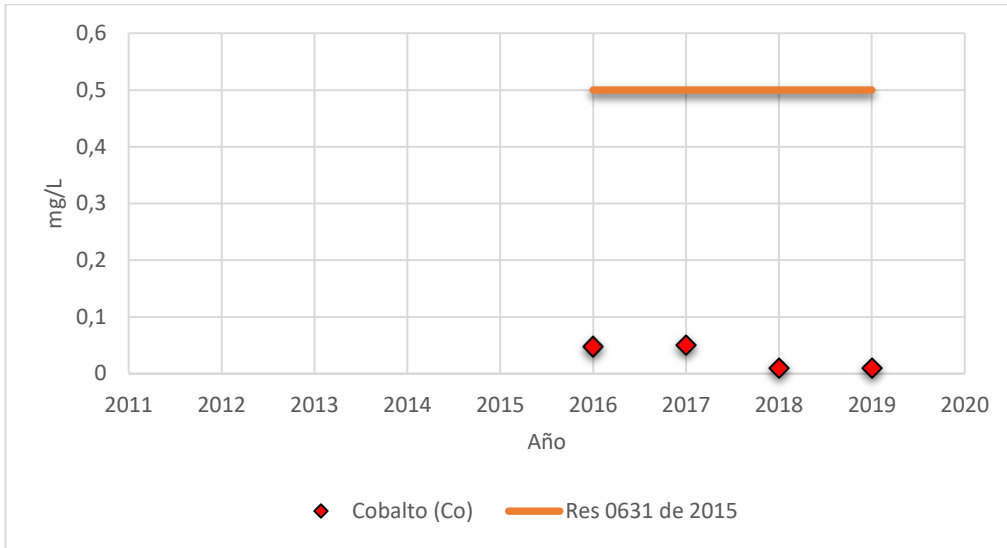
Gráfica 16 Resultados y normativa para el parámetro Cloruros

El ion cloruro se analiza solamente desde al 2016 ya que en la normativa anterior no se exigía, razón por la cual no se tienen valores con los cuales hacer una comparación. Se observa incumplimiento en los años 2016 y 2017.



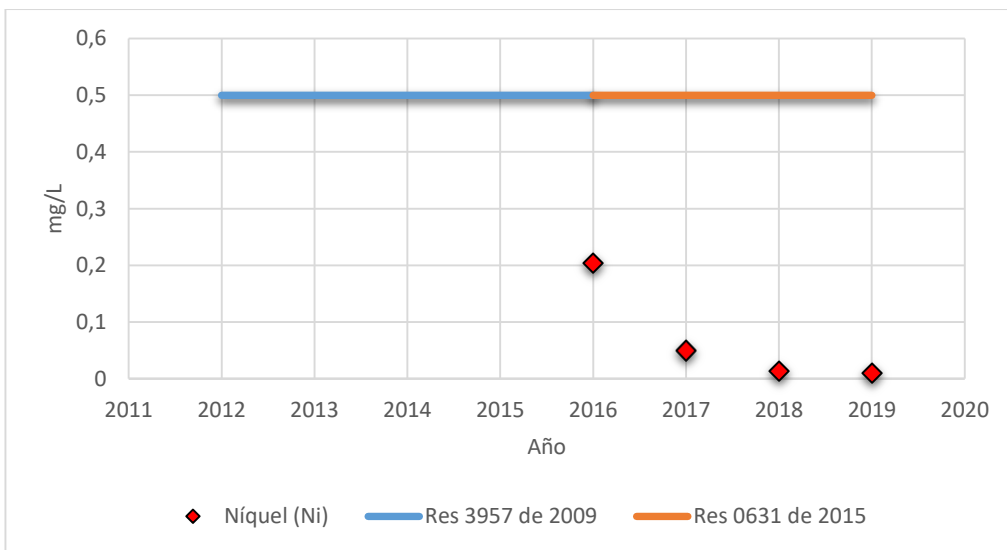
Gráfica 17 Resultados y normativa para el parámetro Zinc

Al comparar los resultados con la normativa actual se observa que este metal presenta bajas concentraciones a la salida de la PTARI de ASITEX aunque del 2015 hacia atrás no se tienen resultados; se nota también que para vertimientos al alcantarillado público la resolución 0631 de 2015 es un poco más laxa que la resolución 3957 de 2009, pasando de exigir 2mg/l a exigir 3mg/l.



Gráfica 18 Resultados y normativa para el parámetro Cobalto

El parámetro cobalto se empezó a exigir a partir del 2016, los resultados indican cumplimiento normativo.



Gráfica 19 Resultados y normativa para el parámetro Níquel

El níquel es un parámetro que aunque la resolución 3957 de 2009 también lo pedía, solo se reportó desde el 2016, sin embargo se nota que la tendencia es a tener valores por debajo del máximo permisible.

6.1.2. Parámetros por fuera de norma

A continuación se presentan los parámetros cuyos valores sobrepasan los límites máximos permisibles de la norma vigente en el momento de su caracterización, resolución 3957 de

2009 para los análisis desde el 2012 hasta el 2015 y resolución 0631 de 2015 para los análisis desde el 2016 hasta la actualidad. Se debe tener en cuenta como se mencionó anteriormente que hay parámetros que debían reportarse pero no se tienen registros de su análisis, por lo cual no se pudo hacer una comparación de los mismos, por otra parte, desde el año 2016 se presentan también parámetros catalogados como de análisis y reporte, el MADS no fijó un valor restrictivo para estos parámetros por lo cual no tienen valor comparativo en la norma.

Tabla 13 Cuadro resumen de parámetros que presentan incumplimiento de la normativa por año

PARÁMETRO	UNIDAD	NORMATIVA VIGENTE	VALOR SALIDA PTARI	% QUE SOBREPASA EL LÍMITE
2012				
Sulfuros Totales	mg/L	5	23.2	364
Temperatura	°C	30	32	7
2013				
Sulfuros Totales	mg/L	5	23.2	364
Color	UPC	50	500	900
2015				
DBO5	mg/L	800	813	2
2016				
SST	mg/L	75	266	255
Cloruros (Cl-)	mg/L	1200	1400	17
2017				
DQO	mg/L	600	710	18
Cloruros (Cl-)	mg/L	1200	1776.9	48
2019				
DQO	mg/L	600	1012.2	69
DBO5	mg/L	300	557.9	86
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10	18.8	88
Sulfuros (S2-)	mg/L	1	3.4	240

Como se observa en la tabla anterior en los años 2014 y 2018 no se muestra información de incumplimiento, sin embargo, de los análisis realizados el único año en el cual se presenta cumplimiento total de la normativa es el 2018 ya que del año 2014 no se tiene información.

6.2. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

De las caracterizaciones de agua realizados en la entrada y salida del proceso de tratamiento de agua residual industrial, se encontraron los siguientes parámetros fuera del rango de cumplimiento de la normatividad ambiental, también se observa en la tabla 14 los porcentajes de remoción adicional al tratamiento existente requeridos:

Tabla 14 Parámetros que incumplen y eficiencia requerida

PARÁMETRO	UNIDAD	NORMATIVA	SALIDA PTAR	EFICIENCIA REQUERIDA
DBO5	mg/L	300	557.9	46%
DQO	mg/L	600	1012.2	41%
Color	UPC	50	500	90%
Cloruros	mg/L	1200	1776.9	32%
Sulfuros Totales	mg/L	1	23.2	96%
SST	mg/L	75	266	72%
Hidrocarburos Totales	mg/L	10	18.8	47%

Como se mencionó en el marco teórico, actualmente hay una gran variedad de procesos para el tratamiento de las aguas residuales, al revisar los procesos de la planta de tratamiento se encuentra que están dentro de los mencionados en la literatura, sin embargo se plantean algunas alternativas para mejorar las eficiencias de remoción y optimizar los procesos.

Para el tipo de agua residual de ASITEX, se plantean las siguientes alternativas:

- Procesos de oxidación avanzados.
- Optimización hidráulica y química de procesos existentes.
- Implementación de un sistema terciario adicional (electrocoagulación, ultrafiltración u osmosis inversa)

Cabe mencionar que la operación de la PTARI se ha ido optimizando y la descripción realizada de procesos no es la misma desde la construcción de la PTARI, por ejemplo, a raíz del incumplimiento con el parámetro de temperatura y de un proceso sancionatorio que se inició por parte de la SDA, a causa de este hallazgo ASITEX decidió invertir en una torre de enfriamiento, donde la temperatura del agua paso de 30°C a 40°C en la resolución 0631

de 2015, por lo tanto, actualmente no hay problema con las altas temperaturas que se tienen en los vertimientos de la PTARI.

En el año 2016, ASITEX presenta otro incumplimiento del parámetro hidrocarburos, sin embargo este parámetro no está presente en las materias primas que se usan en ASITEX, tampoco es un parámetro que se utilice como aditivo en los procesos de tratamiento; por lo anterior, se asume que la presencia de este parámetro no es común y posiblemente fue un vertimiento puntual derivado del mantenimiento de alguno de los equipos.

Los demás parámetros que presentan incumplimiento son típicos de aguas residuales industriales de este tipo de industria, en el caso del parámetro de cloruros normalmente puede presentar incremento en su concentración debido al uso de hidroxiclорuros usados en el tratamiento como coagulantes.

A continuación se presentarán de manera general dos alternativas que ayudarán con el tratamiento de la PTARI y que conllevan al cumplimiento de la norma actual.

6.3. SOLUCIONES PROPUESTAS

A continuación se presentarán dos alternativas de tratamiento que se pueden implementar para mejorar las condiciones actuales de la PTARI.

6.3.1. Electrocoagulación antes de coagulación química complementado con aplicación de polímero orgánico

Esta alternativa consiste en la implementación de un sistema de electrocoagulación por medio de celdas con electrodos de hierro y aluminio, con posterior tratamiento químico usando un polímero orgánico, la cual surge de pruebas que se realizaron con una muestra de agua sacada del agua cruda del tanque de homogenización en la PTARI de ASITEX.

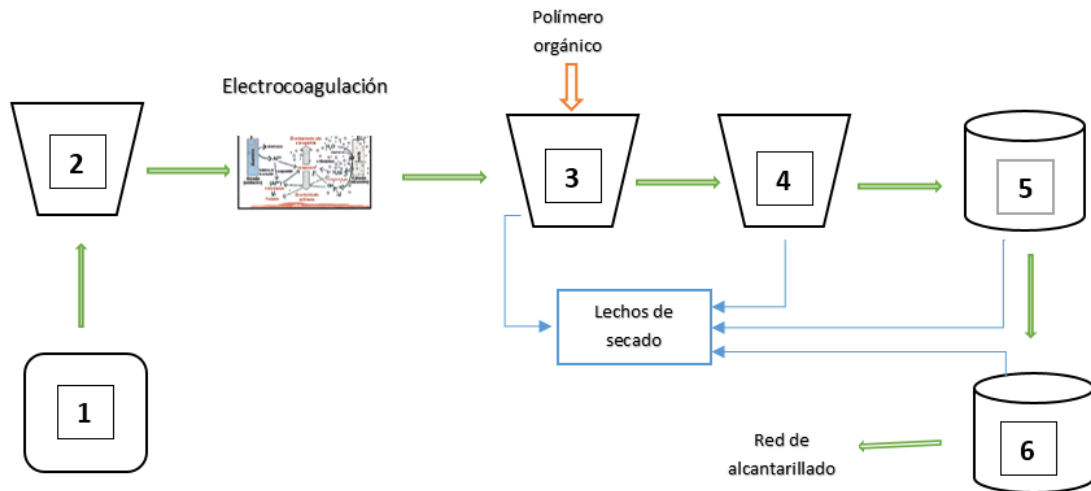


Figura 12 Diagrama de flujo alternativa 1

En las reacciones electroquímicas se da básicamente un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución mediante la aplicación de una diferencia de potencial que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo.

Los dos procesos unitarios más importantes que se presentan en una reacción electroquímica son:

- **Transferencia de masa:** es el movimiento de masa desde la solución a la superficie del electrodo, debido a diferencias en el potencial eléctrico (migración), químico (difusión) y por el movimiento global del líquido.
- **Transferencia de electrones:** existe una contribución de cada densidad de corriente parcial (anódica y catódica) a la densidad de corriente total, esta corriente de intercambio junto al sobre potencial afecta la velocidad de la reacción, a mayor corriente circulando mayor será la velocidad de reacción.

Los hidróxidos y poli hidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por iones y partículas dispersas, lo que permite la coagulación. Los gases formados (Oxígeno e Hidrogeno) son los que realizan la flotación del material suspendido en el líquido.

Algunas ventajas del sistema son las siguientes

- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.

- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Los contaminantes que permanecen en disolución son arrastrados por las burbujas de gas producidas en la reacción electroquímica a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con facilidad.
- El polímero orgánico hace que los lodos sean más compactos.

El sistema tiene algunas desventajas que se deben considerar:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

El proceso electroquímico tiene las siguientes variables importantes para controlar la eficiencia de remoción de contaminantes: Voltaje, intensidad de corriente, tiempo de reacción, material de los electrodos, tiempo de reacción, conductividad y pH del agua residual a procesar.

En la prueba realizada inicialmente se midieron las siguientes condiciones iniciales:

pH: 8.8

Conductividad: 1756 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Temperatura: 21.6 °C.



Figura 13 Muestra de agua cruda.

Volumen inicial de muestra: 5 litros

Adición de sal (NaCl): 3 gramos

Conexión eléctrica: Monopolar Paralelo

Voltaje: 34 V

Tiempo: Operación 24 minutos

Transcurridos los 24 minutos de operación, se dejaron 5 minutos de reposo y se procedió a pasar 3.9 litros de agua tratada al tanque de sedimentación, quedando en la celda de Electro floculación un residuo de aproximadamente 1,1 litros de lodo y agua.

El agua tratada por Electro floculación tiene una apariencia turbia y coloración amarillenta, a diferencia del agua sin tratar que tiene una coloración azul oscura. El agua tratada presenta las siguientes características:

pH: 8,7.

Conductividad: 3026 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Temperatura: 17,8 ° C



Figura 14 Celda de electrofloculación

Se realizaron 3 pruebas de jarras con diferente dosificación del polímero natural orgánico polyfloc 125. Las condiciones son: mezcla rápida (280 RPM) durante 2 minutos, agitación lenta (4 minutos) y sedimentación de 3 minutos

Polyfloc 3 ppm

Polyfloc 30 ppm

Polyfloc 500 ppm

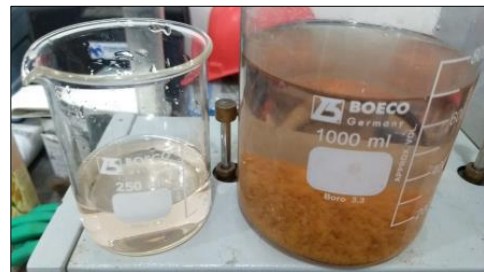
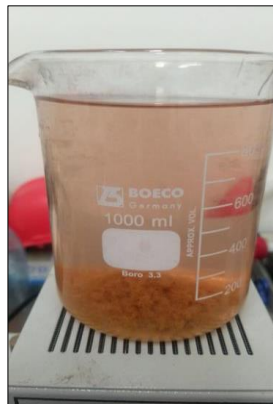
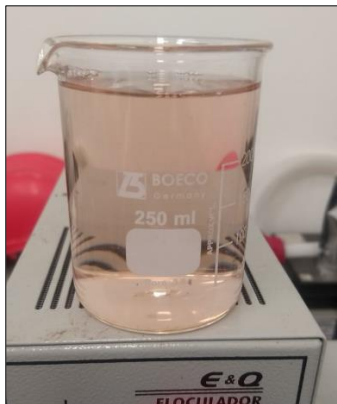


Figura 15 Pruebas de jarras

El agua clarificada se sometió a aeración por 2 minutos y posteriormente se hizo pasar por un filtro de carbón activado obteniendo la siguiente muestra:

pH: 8,2

Conductividad 2542 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Temperatura 18,5 ° C



Figura 16 Agua filtrada

Aunque no se midieron los parámetros relevantes que presentan incumplimiento, se observa la claridad del agua posterior al tratamiento, el resultado en conductividad es debido a la adición de sales para mejorar el proceso de electrocoagulación, lo que puede repercutir en un aumento en la concentración de cloruros, por lo que se recomienda realizar más pruebas para determinar si es necesario un sistema posterior para disminuir la concentración de este parámetro.

6.3.2. Oxidación avanzada con ozono complementado con electrocoagulación

Como primer paso de esta alternativa de tratamiento se propone realizar oxidación avanzada con nano-burbujas de ozono puro en primer tanque, antes de la torre de aireación, de esta manera desde el inicio se reducirá la DQO, DBO, fenoles, color y olor en el agua debido a la degradación de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua, esto permitirá que los químicos usados en los procesos siguientes de coagulación y floculación se reduzcan, mejorando así la concentración de todos los parámetros causantes de generar el incumplimiento de la norma.

A continuación las ventajas de implementar el proceso de oxidación por gas ozono disuelto

- Degradación de la materia orgánica e inorgánica.
- Tendrá un efecto germicida y bactericida.
- Eliminación de olor, color y sabor en el agua.
- Mejoramiento en la producción de lodos.

- Garantiza el cubrimiento total del volumen del agua a tratar en los tanques de oxidación, permitiendo una mayor eficiencia en la flotación de los flocs y por ende una mejor formación de lodos.
- El uso de un sistema de inyección de gas que produce nanoburbujas garantiza que la superficie de contacto del ozono en el agua sea un 95% más efectivo que los sistemas convencionales de tratamiento con ozono.

Para la implementación del sistema se debe incluir:

- Sistema para filtración de aire.
- Sistema de producción de oxígeno.
- Sistema de producción de ozono.
- Sistema de compresión de gas ozono.
- Sistema de inyección de gas ozono.
- Sistema difusor de gas ozono en el tanque.
- Controladores electrónicos y componentes eléctricos.
- Modificación del tanque de 150m³ (Limpieza y adecuación del sistema de difusión de ozono).

El segundo paso del proceso de reingeniería consiste en la instalación de un electrolizador para realizar pulimento al agua y terminar de bajar DQO y DBO toda vez que con el proceso físico químico no se logra dar el punto óptimo al agua en las 24 horas, a su vez se busca retirar las trazas de color que quedan presentes ya que el proceso físico químico no está eliminando todo el color del agua.

Las ventajas de implementar este sistema terciario son las siguientes:

- Electrocoagulación del agua, lo que genera la desestabilización coloidal del agua residual permitiendo una extracción efectiva de los contaminantes presentes que fueron oxidados en el proceso inicial con ozono.
- Electroflotación de los contaminantes debido a la producción de nanoburbujas resultantes del proceso de electrólisis es posible la obtención de lodos muy secos y estables de fácil extracción.
- Excelente para pulimento del agua puesto que termina de extraer todo lo que en el proceso con ozono no fue retirado.

Para implementar el sistema de electrocoagulación es necesario:

- Sistema de electrólisis.
- Instalación de tolvas de lodos.
- Electrolizadores.
- Fuentes de energía.

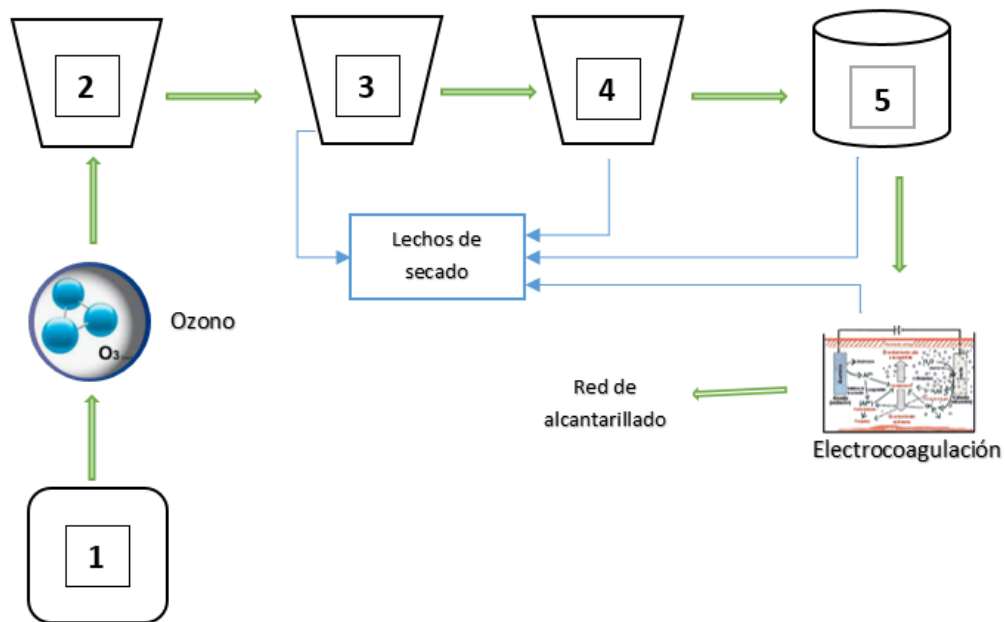


Figura 17 Diagrama de flujo alternativa 2

Los procesos anteriormente descritos tienen un elevado consumo energético lo que puede incrementar los costos de tratamiento. Sin embargo, la calidad del agua del efluente tendría características tales que podría reusarse en el proceso productivo de ASITEX, generando un ahorro en consumo de agua.

Otra alternativa viable a implementar como complemento de cualquiera de las opciones planteada para minimizar el gasto energético es instalar un sistema de paneles solares aprovechando el área que tienen de cubierta (aproximadamente 10.000m²).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a la variabilidad de los efluentes que llegan a la PTARI, no es suficiente con el tanque homogenizador con el que se cuenta, se deben tener elementos internos para el control de las principales variables como pH, conductividad, color, sólidos sedimentables y DQO.

Las máquinas con las que se realizan los procesos productivos y que originan el vertimiento son las mismas usadas para diferentes tipos de productos, por lo cual, es difícil hacer una separación de los drenajes con el fin de dosificar los químicos dependiendo del tipo de colorante usado; por esta razón, se recomienda simplemente tratar de usar los colorantes y productos por tipo en días específicos o tandas de colores y de esta manera disminuir un poco la variabilidad del afluente, haciendo más fácil la dosificación química y la operación general de la PTAR.

Con el fin de cuantificar la química necesaria para los procesos de floculación, coagulación, sedimentación y blanqueamiento según lo que esté llegando puntualmente se debe tener un equipo de jarras y hacer los ensayos por tanda de colorante usado cada vez que varíe el vertimiento.

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el proceso de electrocoagulación complementado con aplicación de polímero orgánico, se observa una disminución considerable de color, se recomienda desarrollar esta alternativa para diferentes clases de tintes y auxiliares, con análisis de jarras y medición de DQO post tratamiento, con el fin de analizar un rango más amplio y determinar las dosis adecuadas para las distintas clases de aguas que puedan llegar a la PTAR, pudiendo así analizar los costos y calcular la viabilidad de la propuesta.

El proceso de oxidación del agua por medio de ozono y el uso de una electrocelda para precipitar contaminantes, genera una disminución en la cantidad de químicos usados actualmente, de igual manera se debe profundizar en el desarrollo de esta alternativa, haciendo un cálculo de del consumo energético, estudios de jarras y cálculo de lodos generados, de esta manera hacer un análisis costo beneficio más completo y poder así comparar las dos alternativas propuestas.

A futuro el tratamiento del agua residual debe ser sostenible y eliminar contaminantes para que dé como resultado un grado en el que se pueda reusar el efluente en los procesos productivos, de esta manera compensar los costos adicionales que pueda originar el tratamiento en ahorro en la factura de acueducto y alcantarillado.

La infraestructura de la empresa posee un área mayor a una hectárea, por lo cual se puede pensar en utilizar paneles solares para suplir los requerimientos energéticos de las alternativas propuestas.

Finalmente se puede decir que el presente trabajo puede ser una base para la evaluación, análisis y profundización de alternativas de tratamiento de las aguas residuales no domésticas de la empresa ASITEX y otras empresas textiles con afluentes similares a los presentados en las caracterizaciones de entrada en la PTAR evaluada.

BIBLIOGRAFIA

Amor C., Torres-Sociás E., Peres J.A., Maldonado M.I., Oller I., Malato S., Lucas M.S. (2015). Mature landfill leachate treatment by coagulation-flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes. *J. Hazard. Mater.* 286, 261-268

Anjaneyulu, Y., Chary, N.S., Raj, D.S.S., (2005). Decolourization of industrial effluents - available methods and emerging technologies - a review. *Environment Science Biotechnology*, volumen (4), 245-273. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-005-1246-z>.

ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, (2004). Resumen de salud pública. Departamento de salud y servicios humanos de los EE.UU.

Bolaños, R., (2010). *Propuesta de recuperación del agua residual proveniente de la industria textil*, Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, El Salvador.

Brillas, E., Martínez-Huitle, C.A., (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B Environment*, volumen 166-167, 603-643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>

Buscio V., Marín M.J., Crespi M. y Gutiérrez-Bouzán C. (2015). Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Journal*, volumen (265), 122-128. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/26369>

Camacho C., (2009). *Compuestos fenólicos y el medio ambiente*. Facultad de Agronomía. Centro de Tecnología Enzimática (CETENZ). Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Cuba.

Carvalho J.C., Bessegato G.G. y Zanoni M.V., (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Res.* 98, p. 39-46.

Crespi M. y Huertas J.A., (1987). Industria textil: ¿Depuración biológica o Físicoquímica? En: Boletín Intextar del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial Terrasa. Vol. 2, No. 92; p. 75-90. España.

Deive, F.J., Domínguez, A., Barrio, T., Moscoso, F., Moran, P., Longo, M.A., Sanroman, M.A., (2010). Decolorization of dye Reactive Black 5 by newly isolated thermophilic microorganisms from geothermal sites in Galicia (Spain). *J. Hazard. Mater.* 182, 735e742. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.096>.

Dewil, R., Mantzavinos, D., Poullos, I., Rodrigo, M.A., (2017) New perspectives for advanced oxidation processes, *J. Environ. Manage.* 195, 93–99.

Ganzenko, O., Huguenot, D., Van Hullebusch, E.D., Esposito, G., Oturan, M.A., (2014), Electrochemical advanced oxidation and biological processes for wastewater treatment: a review of the combined approaches, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21 8493–8524.

Garzon, E., (2018). Industria Textil Colombiana. Telas inteligentes y tendencias ecológicas. Economía al día, Minuto30.com, Recuperado de: <https://www.minuto30.com/industria-textil-colombiana-2018-telas-inteligentes-y-tendencias-ecologicas/573057/>

Gilpavas, E., Arbelaez, P.E., Medina, J.D., Gomez C.M., (2017). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia, Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT), Medellín, Colombia.

Guapo, J.C., (2016). Seguimiento y evaluación del cumplimiento normativo ambiental de las tintorerías del sector textil de la localidad de Puente Aranda seleccionadas en un proceso de inversión de producción más limpia administrado por el fondo de desarrollo local de Puente Aranda, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Hang, G., Liang, C., Chung, T., Weber, M., Staudt, C., Maletzko, C., (2016). Combination of forward osmosis process with coagulation/flocculation for potential treatment of textile wastewater, *Water Research*, Volume 91, 15 Marzo 2016, Pag 361-370, recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135416300306?via%3Dihub>

Hessel, C., Allegre, C., Maisseu, M., Charbit, F., Moulin, P., (2007). Guidelines and legislation for dye house effluents. *J. Environ. Manage* 83, 171e180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.02.012>.

Holkar, C.R., Pandit, A.B., Pinjari, D.V., (2014). Kinetics of biological decolorisation of anthraquinone based Reactive Blue 19 using an isolated strain of *Enterobacter*

sp. F NCIM 5545. Bioresour. Technol. 173, 342e351. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.108>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM., (2007). hidrocarburos en aguas por extracción soxhlet o líquido – líquido y gravimetría. Colombia.

Jorfi, S., Barzegar G., Ahmadi, M., Cheshmeh, R., Jafarzadeh, N., Takdastan, A., Saeedi, R. y Abtahi M. (2016). Enhanced coagulation-photocatalytic treatment of Acid red 73 dye and real textile wastewater using UVA/ synthesized MgO nanoparticles. J. Environ. Manage. 177, 111-118.

Ileri, S., Karaer, F., (2013). Removal of acute toxicity with ozonation in textile plant waste water, J. Biol. Cal Environ. Sci. 7 1–8.

Ivester A.L., Neefus J.D., (1998). Industrias textiles y de la confección. En: Industria de Productos Textiles. Enciclopedia de salud y seguridad en el Trabajo, p 1-36. Madrid, España: Ed. Chantal Dufresne, BA

Li, H.-X., Xu, B., Tang, L., Zhang, J.-H., Mao, Z.-G., (2015). Reductive decolorization of indigo carmine dye with Bacillus p. MZS10. Int. Biodeterior. Biodegrad. 103, p. 30 - 37.

Llive W.R. (2012). Análisis y Evaluación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de una Industria Textil. (Tesis de pregrado) Universidad san francisco de Quito, Ecuador.

Lockuan, F.E., (2012). Tejeduría. En: La industria textil y su control de calidad, 2nda version. Licencia Creative Commons. Libros textiles gratuitos [en línea] <<http://fidell-lockuan.webs.com>>

Londoño L.F., Londoño, P.T., Muñoz, F.G., (2016). Risk of heavy metals in human and animal health, Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, V. 14 No. 2. p. 145-153.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, (1984). Decreto 1594. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Colombia.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, (2015). Resolución 0631. Por la 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. Colombia.

Mohan, J.; Prakash, R.; Behari, J.R., (2004). Electrochemical detection and catalytic oxidation of phenolic compounds over nickel complex modified graphite electrode. *Applied Ecology and Environmental Research* 2, v. 2. p. 25 - 33.

Neill, C.O., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Lourenc, N.D., Pinheiro, H.M., Delee, W., (1999). Colour in textile effluents - sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 74, 1009e1018.

Patarroyo, M., (2013). Procesos de estabilización de residuos generados en la industria textil en Colombia mediante lodos activados. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Paździor, K., Bilińska, L., Ledakowicz, S., (2018). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment, *Chemical Engineering Journal*. Poland.

Peris, M.M., (2006). Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellon (España) [PhD. Tesis, Ingeniera Química]. Valencia (España): Universidad de Valencia, Facultad de Ingeniería, 247 p.

Quintero, L., Cardona, S., (2009). Tecnologías para la decoloración de tintes índigo e índigo carmín. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Colombia.

Rayaroth, M.P., Aravind, U.K., Aravindakumar, C.T., (2015). Sonochemical degradation of Coomassie Brilliant Blue: Effect of frequency, power density, pH and various additives. *Chemosphere*, v. 119, p. 848-855.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., Nigam, P., (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour. Technol.* 77, 247e255.

Romero, J.A., (2016). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Escuela colombiana de ingeniería. Bogotá, Colombia.

Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S., Govindwar, S.P., (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 42, 138e157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>.

Secretaría distrital de ambiente, (2009). Resolución 3957. Por la cual se establece la norma técnica, para el control y el manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el distrito capital. Bogotá, Colombia.

Shaolan D., Zhengkun L., Wangrui, (2010). Overview of dyeing wastewater treatment technology. *Water Resour. Protec.* 26, p. 73-78.

Solís, M., Solís, A., Perez, H.I., Manjarrez, N., Flores, M., (2012). Microbial decolouration of azo dyes: a review. *Process Biochem.* 47, 1723e1748. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2012.08.014>.

Tellez M.J., Carvajal R.M. Gaitan A.M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres, *Revista Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia*, V. 52, No. 1.

Tintorería ASITEX S.A., (2016). Manual de operaciones planta de tratamiento de agua residual industrial. Bogotá. Colombia.

Vandevivere, P.C., Bianchi, R., Verstraete, W., (1998). Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, v. 72, p. 289 - 302.

Villanueva-Rodríguez, M., Hernández-Ramírez, A., Peralta-Hernández, J.M., Bandala, E.R., Quiroz-Alfaro, M.A., (2009). Enhancing the electrochemical oxidation of acid-yellow 36 azo dye using boron-doped diamond electrodes by addition of ferrous ion. *J. Hazard. Mater*, v. 167, p. 1226 - 1230.

Wang, C., Shih, Y., (2015). Degradation and detoxification of diazinon by sono-Fenton and sono-Fenton-like processes. *Sep. Purif. Technol.* 140, 6-12.