

Evaluación del extracto de semillas de *Moringa oleífera* como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil

Susana Arango Mesa, Wendy Paola Ortega González^a

Alejandro Álvarez Vanegas, José David Medina Arroyave^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

RESUMEN

En el tratamiento de agua residual textil se utiliza tradicionalmente sulfato de aluminio como coagulante, sin embargo, este componente puede ser el causante potencial de afectaciones en la salud humana y en el ecosistema con el que interactúe. Este trabajo de grado presenta los resultados obtenidos de la evaluación del extracto de semillas de *Moringa oleífera* como coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil. Se realizó un diseño factorial 3^3 para determinar el efecto que tenían los factores concentración de *Moringa*, concentración de NaCl y dosificación del extracto sobre las variables de respuesta pH, conductividad y % de remoción de turbidez del agua residual resultante de proceso de elaboración de prendas textiles. Los resultados experimentales de la coagulación con *Moringa* se compararon con los resultados obtenidos haciendo uso de sulfato de aluminio. Se encontró que para 1 m^3 de agua residual, son necesarios 23.3 litros de coagulante extraído con una solución salina 0.15 M de NaCl y 30 g/L de semillas de *Moringa oleífera*; esta alternativa natural resultó eficiente en el tratamiento del agua residual, cumpliendo con los parámetros que fueron considerados de la resolución 0631: se alcanzó una remoción de turbidez del 82%, DQO de 355 mg O_2/L , pH de 6.43 y conductividad 3.9 mS/cm con un costo de insumos de \$7,409 pesos por m^3 tratado. Con los resultados obtenidos en la experimentación, se diseñó conceptualmente la planta de tratamiento para tratar un flujo de $100 \text{ m}^3/\text{día}$ y se analizaron los costos asociados a la operación de la planta, basados en el diseño de cada uno de los equipos, y los ahorros por la disminución en el costo de la tasa retributiva.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria textil, se utiliza uno de los recursos más preciados que hay en la tierra: el agua. Debido a que la gran mayoría del agua dulce disponible ya está comprometida para la agricultura y consumo humano, las industrias deben ser responsables en devolver el agua procesada a los cuerpos de agua en condiciones

que no impacten negativamente el ecosistema ni pongan en riesgo la disponibilidad de agua limpia. Las descargas industriales textiles se caracterizan por tener una alta Demanda Química de Oxígeno, baja biodegradabilidad, alto contenido de sal y coloración intensa y apreciable a simple vista [1], también presentan pH extremo y, agotamiento del oxígeno disuelto. La descarga de este tipo de aguas sin adecuado tratamiento provoca muerte de las bacterias aeróbicas y perturbación general del ecosistema acuático [2].

El agua contaminada con colorantes puede ser tratada por muchos métodos, ya sean químicos o biológicos, entre los químicos se incluyen procesos que hasta el momento se encuentran en fase de investigación y pruebas piloto, sin embargo, no son muy usados a escala industrial como lo son: los procesos avanzados de oxidación, la sonoquímica y electroquímica. Su principal limitante es que económicamente presentan costos más elevados que técnicas convencionales para tratar grandes volúmenes de agua, además, en ocasiones no es posible implementarlos como única etapa de tratamiento y es necesario aplicarlos en combinación de un pretratamiento, lo que finalmente aumenta los costos [3] [4]. En los procesos biológicos se encuentran tratamientos como los lodos activados y digestión anaeróbica [4], sin embargo, estos solo son aplicables cuando las aguas residuales son biodegradables, en el caso de la industria textil los vertimientos son poco biodegradables, presentando relaciones de biodegradabilidad DBO_5/DQO alrededor de 0.2 [5].

Por esta razón los procesos industriales se han centrado en los tratamientos convencionales como la coagulación química, cuya eficiencia es variable, dependiendo del tipo de efluente a tratar [4]. La coagulación, es un proceso que busca eliminar las especies químicas suspendidas y con esto la turbidez del agua. El tratamiento se lleva a cabo mediante la adición de agentes coagulantes, generalmente sales de aluminio o hierro [6] y en la mayoría de los casos la eficiencia del proceso es evaluada empleando Test de Jarras. El uso de coagulantes químicos tradicionales es cuestionable en unidades de tratamiento de agua porque crean problemas relacionados con la eliminación de lodos y generación de contaminación secundaria [7] debido a las reacciones no deseadas en el agua tratada [8]. Un estudio realizado en África reportó que el uso de sales de aluminio en aguas superficiales, promovía la acidificación del agua y efectos tóxicos sobre peces y otros organismos acuáticos invertebrados por la presencia de los cationes metálicos [9].

Respecto a la afectación a la salud humana, se han reportado indicios de la relación entre el aluminio y la aparición temprana de enfermedades como el Alzheimer [10] y la demencia senil en el ser humano [11]; la OMS tiene algunas estimaciones y aunque los resultados aún son imprecisos [12] esto impulsa la necesidad de buscar coagulantes alternativos.

Uno de los coagulantes naturales más investigados ha sido el extracto de semillas de *Moringa oleífera*, cuyo principio activo son proteínas catiónicas de peso molecular aproximadamente de 13 KDa y punto isoeléctrico a un pH de 10 y 11 [13]. La

Moringa es una especie nativa de la India, introducida [14] y cultivada [15] en Colombia que se ha utilizado para el tratamiento de aguas residuales en industrias como la de café, donde se evidenciaron reducciones en parámetros como Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) sin alterar significativamente el pH [16]. En el tratamiento de agua de ríos locales, se comparó el efecto coagulante de la *Moringa oleífera* y sulfato de aluminio alcanzando una remoción de color del 96% utilizando *Moringa* y del 80% con sulfato de aluminio [17]. Para el caso particular de la industria textil, pocos estudios se han realizado directamente en este tipo de aguas con alta turbidez, sin embargo, el estudio más reciente sobre tratamiento de efluentes textiles, se realizó con extracto de *Moringa oleífera* junto con un proceso de biodegradación para tratar los lodos generados en el proceso, se alcanzaron remociones de turbidez de hasta el 98% [18].

Si bien la *Moringa* actúa como coagulante, puede ser perjudicial su presencia en el agua potable después de 24 horas, debido al aumento en el Carbono Orgánico Disuelto (COD) que propicia el crecimiento de microorganismos [19], razón por la cual es importante evaluar su eficiencia como agente coagulante en procesos distintos a la potabilización. El objetivo de este estudio es evaluar la potencial aplicación del extracto de semillas de *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas residuales para reemplazar el uso de coagulantes químicos, evaluando su eficiencia como agente coagulante en agua residual proveniente de una industria textil ubicada en la ciudad de Medellín, estableciendo sus características fisicoquímicas antes y después del tratamiento, determinando mediante un diseño de experimentos el efecto de las variables de operación, comparando el proceso con sulfato de aluminio y así establecer las mejores condiciones para llevar a cabo el proceso y de esta forma establecer la viabilidad técnica y económica de implementarlo a escala industrial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Reactivos

En el proceso de extracción de las proteínas responsables de la coagulación de la *Moringa oleífera* se usó cloruro de sodio (NaCl) comercial marca Refisal. Se utilizó agua desionizada (conductividad $< 2 \mu\text{S}/\text{cm}$) para preparar todas las soluciones. El sulfato de aluminio tipo B se utilizó como coagulante químico, con el fin de compararlo con el extracto de semillas de *Moringa oleífera* provenientes del municipio de Santafé de Antioquia, ubicado en el occidente Antioqueño (latitud norte $6^\circ 33' 25.84''$, longitud oeste $75^\circ 49' 37.66''$, altitud 573 metros sobre el nivel del mar) en el tratamiento del agua residual textil.

2.2. Equipos

En el proceso de extracción del agente coagulante se usó un *horno de convección* para secar las semillas de *Moringa oleífera*. Luego en la trituración se usó una *licuadora domestica Oster* y un *mortero* de cerámica, posteriormente se tamizaron las semillas trituradas con un *tamiz 16* en la serie de Taylor, con el *equipo de tamizado Rotap*. Se usaron *agitadores magnéticos PC-420D Corning* con variaciones de velocidad entre 60 y 1150 revoluciones por minuto y *magnetos* de 3 cm de largo, en *Beakers* de 500 ml durante la extracción. Finalmente, con una *malla comercial* se filtró la solución sólo con el fin retirar las partículas más grandes de semilla de *Moringa oleífera*, quedando en el sobrenadante, el componente activo de interés.

Para el Test de Jarras (el cual se adaptó para esta experimentación) correspondiente al proceso de coagulación, se usaron agitadores magnéticos Corning PC-420D y magnetos para la agitación de las muestras de agua residual. Con el clarificado que quedó de la solución, se tomaron muestras con ayuda de una *pipeta de 10 mL* y se le midió el pH con el *pHmetro Metrohm 827*, la medición de la conductividad fue con el *conductímetro Extech* y la variable turbidez con el *turbidímetro Orbeco Hellige modelo 966* para la medición de las variables de respuesta: pH, conductividad eléctrica y turbidez específicamente.

2.3. MÉTODOS

2.3.1. Extracción coagulante de *Moringa oleífera*

El proceso de extracción del componente activo de las semillas de *Moringa oleífera* responsable de la coagulación se llevó a cabo en varias etapas de acuerdo al procedimiento propuesto por la investigación de Fayos García en el siguiente orden: Secado, trituración, tamizado, disolución del componente activo coagulante y filtrado [20].

En la etapa de secado se pusieron las semillas de *Moringa oleífera* en un horno de convección a 60°C durante 24 horas con el fin de facilitar la remoción de la cáscara de la semilla manualmente. Para la etapa de trituración se introdujeron las semillas sin cáscara en una licuadora y posteriormente en un mortero de cerámica para obtener partículas más pequeñas; con el polvo obtenido, se realizó la etapa de tamizado, haciendo pasar el polvo a través de los tamices (hasta que se quedaran en el tamiz 16 “U.S. Standar Sieve series [21]”) para asegurar la uniformidad de las partículas. En la etapa de disolución del componente activo coagulante se agregó el polvo de semilla a la solución con NaCl (según los valores definidos en el diseño de experimentos). Finalmente se agitó durante 30 minutos a una velocidad de 250 rpm y se filtró para retirar la fase sólida, quedando en la fase líquida el agente coagulante de interés.

2.3.2. Caracterización inicial y final del agua residual textil

El agua residual de estudio es proveniente de una industria textil ubicada en Medellín, cuyo nombre no es mencionado en este trabajo por motivos de confidencialidad. Esta agua residual fue recolectada el día 24 de enero de 2017, proveniente del tanque de homogenización, a donde llegan todas las aguas residuales de las lavadoras con las distintas referencias del día. Esta misma fue recolectada con un botellón plástico previamente desinfectado y se mantuvo refrigerada a una temperatura de aproximadamente 4°C [22] el tiempo que duró la experimentación (2 semanas) para su conservación. Los métodos usados para medir los siguientes parámetros fueron de acuerdo a los procedimientos estándar [23].

Para la medición del pH y la conductividad eléctrica (en mS/m) se introdujeron los electrodos correspondientes en la solución y se esperó hasta que la medida se estabilizara. El proceso de medición de los sólidos totales consistió en la adición de 25 mL de la solución a medir en una cápsula de porcelana la cual es sometida a evaporación lenta hasta que se remueve el agua completamente, una vez el agua termina la evaporación, la capsula es llevada a un desecador para alcanzar temperatura ambiente antes de ser pesada, la diferencia entre los pesos inicial y final es la medida de los sólidos totales. Para medir la turbidez en unidades nefelométricas de turbidez (UNT), primero se realiza la calibración del equipo con muestras estándar de 40 y 0 NTU, se llena el frasco completamente con la muestra, se ubicó en el instrumento y se procede a la lectura del resultado directamente en la pantalla del instrumento.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y color verdadero, estuvieron a cargo del Msc. José David Medina, profesional que, aunque tiene gran experiencia en el tema, no cuenta con las certificaciones del IDEAM.

Es importante resaltar que para esta investigación no se tuvo en cuenta la medición de las proteínas presentes en las semillas pues se encontraba fuera del alcance.

2.3.3. *Diseño estadístico de experimentos Moringa oleífera*

Se realiza un diseño factorial que se ajusta a un modelo de segundo orden para estudiar los efectos lineales, cuadráticos y las interacciones de los factores importantes para este estudio, con el fin de encontrar las condiciones de los 3 factores de estudio.

Para el análisis estadístico se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI con un grado de confiabilidad del 95%, los diagramas de interés fueron el diagrama de Pareto, la tabla ANOVA y algunos coeficientes con los que se comprobaron los supuestos del ANOVA (no se incluyen en este informe).

Se realizó un diseño factorial completo 3³, en el cual se consideran 3 factores con 3 niveles cada uno (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2012), así: 3x3x3, 27 tratamientos. Incluyendo las réplicas, la matriz de diseño queda formada por un total de 54 tratamientos.

Tabla 1. Variables de diseño para el proceso de coagulación.

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Concentración <i>Moringa</i> (g/L)	30	50	70
NaCl (M)	0.15	0.25	0.35
*Dosis (mL/L)	10	30	50

* Mililitros de coagulante por litro de agua residual a tratar

En la **Tabla 1** se enuncian los niveles escogidos para cada tratamiento y La experimentación se llevó a cabo según el procedimiento de Test de jarras descrito en el numeral 2.3.6.

La turbidez se reportó en % de remoción de turbidez y tiene en cuenta la condición inicial de la muestra y la medida de turbidez de cada corrida experimental, así:

$$\%Remoción\ Turbidez\ (\%RT) = \frac{Turbidez\ inicial - Turbidez\ final}{Turbidez\ inicial} * 100 \quad (1)$$

Se realizó un análisis estadístico con el fin de determinar qué variables tienen un efecto significativo sobre las variables de respuesta %RT, pH y conductividad eléctrica.

2.3.4. Costos asociados a los procesos de extracción y coagulación

2.3.4.1. Costos etapa de extracción y coagulación: *Moringa oleífera*

El cálculo de los costos se realizó con base al costo de cada reactivo (cantidad de semillas de *Moringa oleífera* y cantidad de *cloruro de sodio*) para producir la cantidad necesaria de coagulante capaz de tratar 1 m³ de agua residual textil. Las ecuaciones **1**, **2** y **3** corresponden al detalle de cada uno de los costos correspondientes a esta etapa:

$$\text{Costos} = \text{Costo de Moringa oleífera} + \text{Costo NaCl} \quad (2)$$

$$\text{Costo de Moringa oleífera} = C_m * D_c * P_m \quad (3)$$

Donde,

$$C_m = \text{Concentración de Moringa usada en el proceso de extracción} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{L}} \right)$$

$$D_c = \text{Dosis del coagulante establecido para el proceso de coagulación} \left(\frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_m = \text{Precio de la Moringa que se necesita para el tratamiento} \left(\frac{\$}{\text{Kg}} \right)$$

$$\text{Costo NaCl} = C_s * P_{Ms} * D_c * P_s \quad (4)$$

Donde,

$$C_s = \text{Concentración de sal} \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)$$

$$P_{Ms} = \text{Peso molecular de la sal} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{mol}} \right)$$

$$D_c = \text{Dosis del coagulante para el proceso de coagulación} \left(\frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_s = \text{Precio de la sal que se necesita para el tratamiento} \left(\frac{\$}{\text{Kg}} \right)$$

2.3.4.2. Costos etapa de coagulación: Sulfato de aluminio

Con el coagulante químico se tuvo en cuenta el costo por Kg del sulfato de aluminio para tratar 1 m³ de agua residual textil, tal como se expresa en la ecuación 4:

$$\text{Costo coagulación sulfato} = D_s * P_s \quad (5)$$

Donde,

$$D_s = \text{Dosis sulfato de aluminio} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_s = \text{Precio del sulfato que se necesita para el tratamiento} \left(\frac{\$}{\text{Kg}} \right)$$

2.3.5. Experimentación con sulfato de aluminio

Se realizaron 6 experimentos con el procedimiento de test de jarras, descrito en el numeral 2.3.6., variando la concentración de sulfato de aluminio que se debe adicionar al agua residual desde 100 mg/L a 1100 mg/L, con incrementos de 200 mg/L. Se midieron las mismas variables de respuesta: turbidez residual, pH y conductividad eléctrica.

2.3.6. Test de jarras

Se adaptaron los ensayos del test de jarras para el proceso de coagulación basándose en los lineamientos descritos en la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 “Procedimiento para el método en la coagulación-floculación del agua” [24], así:

1. Se tomó 0,5 L de muestra en beakers 1 L y se le introdujeron agitadores magnéticos ubicándolos de manera que quedaran centrados.
2. Se prepararon los productos químicos en soluciones acuosas con el mismo volumen con el fin de que fueran adicionados al mismo tiempo.
3. Se comenzó operando el agitador a 120 rpm en la plancha magnética y se le adicionan los productos químicos, dejándolo operar a esta velocidad durante 1 minuto. Pasado este tiempo se redujo la velocidad a 60 rpm durante 20 minutos para mantener en suspensión uniforme las partículas de flóculos.
4. Luego del periodo de agitación lenta se retiraron los agitadores y se dejaron sedimentar los flóculos durante 15 minutos. Mediante una pipeta se sacaron 20 ml del sobrenadante para realizarle las mediciones.

2.3.7. Diseño conceptual

2.3.7.1. Especificaciones de diseño del proceso (PDS)

Dentro de los principales aspectos se tuvieron en cuenta: capacidad de la planta, ubicación de la planta, características del agua antes y después de la coagulación y los servicios industriales que se requieren para el proceso.

2.3.7.2. Diagramas de proceso

Haciendo uso de la herramienta de Office Visio se construyeron los diagramas:

- **Diagrama de entradas y salidas**

- **Diagrama de flujo de proceso (PFD)**

Haciendo uso del software para diagramas online Draw.io, se construyó el diagrama de bloques descrito a continuación:

- **Diagrama de bloques (BFD)**

Los tres diagramas se realizaron con base en el estándar internacional ISO 10628 “Flow diagrams for process plants-General rules” [25].

2.3.7.3 Dimensionamiento de equipos

Los equipos se diseñaron con base a los parámetros propuestos en “Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes” [26] y las heurísticas establecidas en “Chemical Process Equipment, Selection and Design” [27]. Exceptuando el diseño de la trituradora y el horno de convección, los cuales se escogieron por catálogo.

2.3.7.4 Gastos operacionales

Para el cálculo de los principales gastos que tiene la planta de tratamiento de aguas se realizó lo siguiente:

- **Gastos de insumo:** Este valor se calculó haciendo el análisis del consumo anual de los insumos (semillas de *Moringa* y NaCl) con respecto al caudal a tratar.
- **Gastos de mano de obra:** Se determinaron los gastos anuales de la mano de obra con ayuda de la metodología presentada en “Chemical process equipment, selection and design” [27] para determinar la cantidad de operarios requeridos. Se tuvo en cuenta el smmlv (salario mínimo mensual legal vigente) y las respectivas prestaciones establecidas para el año 2017 [28] para cada operario.
- **Gastos energéticos:** Se determinó el consumo energético de cada equipo, multiplicando la potencia del equipo por las horas trabajadas, teniendo en cuenta el valor de la electricidad en COP/kWh [29].

2.3.7.5 Ahorros del proyecto

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, con el deber de proteger la biodiversidad e integridad del ambiente, cobran una tasa retributiva por vertimientos puntuales (explicada en el decreto número 2667 de 2012 [30]), ya sean directos o indirectos, basados en la carga de contaminantes que se desechan en los distintos cuerpos hídricos. Se calculó este valor antes y después del tratamiento al agua residual, y así se determinó el ahorro anual para el cumplimiento de este decreto.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la elección de los niveles de cada tratamiento (**Tabla 1**) se tuvieron en cuenta estudios: en donde se utilizaron dosis óptimas de coagulante de *Moringa* entre 10 y 50 mL por cada litro de agua residual y la extracción fue efectiva con 0.25 M de sal [31], concentraciones de *Moringa* de 20 g/L [32] y 50 g/L [33], las cuales resultaron óptimas para la remoción de turbidez y sólidos suspendidos totales en las muestras analizadas.

Respecto a las variables de respuesta, se encontró que varios estudios probaron que los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua en la coagulación incluían la conductividad eléctrica, turbidez residual y el pH [34]; el principal objetivo de tratamiento del proceso de coagulación es remover sólidos en suspensión, por lo tanto la turbidez residual se selecciona como principal variable respuesta debido a que esta es una alternativa rápida de medir los sólidos en suspensión y proporciona una medida directa de la eficiencia del proceso. Además, es importante evaluar el efecto de la coagulación sobre el pH y la conductividad eléctrica, razón por la cual se consideraron como variables respuesta. Otros parámetros importantes como la DQO y DBO₅ no fueron medidos para cada ensayo debido al alto costo de los reactivos para su medición en los equipos disponibles en la universidad (Alrededor de COP \$700.000), sin embargo, si fueron consideradas para las mejores condiciones seleccionadas del diseño experimental.

El objetivo del diseño de experimentos es encontrar una combinación de los factores de operación que permita llevar el agua a los límites permisibles por la legislación al menor costo posible de operación, esto representa un reto debido a que por disponibilidad presupuestal, parámetros fisicoquímicos importantes como la DQO y la DBO₅ no pueden ser incluidos en cada una de las condiciones experimentales, sin embargo, basados en la revisión bibliográfica se encuentra que cuando el proceso de coagulación es aplicado con éxito en aguas textiles en donde la remoción de turbidez es cercana al 100%, se presenta una simultánea remoción de DQO y DBO₅ entre el 70 y 50% [3]. GilPavas y colaboradores [5] mostraron que en un agua residual textil cuyo principal colorante era el índigo la DQO disminuía proporcionalmente con la turbidez hasta un máximo cerca al 50%. De acuerdo a esta información para el presente trabajo se asume inicialmente que una remoción

de turbidez del 100% representara la remoción de la mitad de la DQO, siendo estas variables directamente proporcionales. Bajo este supuesto se establecerán unas condiciones a las que se presupueste se cumpla la legislación, con el menor consumo posible de reactivos. Una vez seleccionadas las condiciones de operación se valida este supuesto.

3.1. Caracterización del agua residual textil

La **Tabla 2** presenta cada uno de los parámetros medidos a las condiciones iniciales del agua residual y después del proceso de la coagulación con *Moringa oleífera* y sulfato de aluminio bajo las mejores condiciones encontradas en los diseños de experimentos. Se observa que la *Moringa oleífera* es una alternativa natural eficiente para tratar aguas con alta turbidez, permitiendo el cumplimiento de los parámetros establecidos en la resolución 0631 sobre vertimiento de aguas residuales. Ambos coagulantes presentan disminución en los parámetros enunciados en la **Tabla 2**, únicamente para el tratamiento con sulfato, el pH baja considerablemente, y esto es debido a que se forman hidróxidos de aluminio, los cuales le roban alcalinidad al agua, para el DBO₅ hay mayor disminución por parte del sulfato que de la *Moringa*, esto se puede explicar ya que el mismo extracto de *Moringa* es materia orgánica biodegradable. En particular, la disminución de los sólidos totales verifica la eficiencia del proceso de coagulación, pues al disminuir la cantidad de sólidos totales, la turbidez del agua también bajó y esto se ve reflejado en el cambio del color verdadero de oscuro a transparente. La conductividad en ambos casos aumentó, esto es causa de que a ambas muestras se les adicionan sales (cloruro de sodio en el proceso de extracción del coagulante y sulfato de aluminio que de por sí es una sal). Se puede observar además que la relación de biodegradabilidad DBO₅/DQO aumentó, ya que el DQO disminuyó, dejando el agua con una mayor capacidad para tratar por medios biológicos en procesos posteriores.

Luego del proceso de coagulación, se puede observar que la *Moringa oleífera* presenta una leve turbidez y que se puede deber a que en el proceso de extracción no hay un filtrado tan minucioso y por esto quedan compuestos (también extraídos de la semilla e inclusive, el mismo componente activo) que aportan turbidez al agua. Esto podría confirmarse realizando análisis para identificar aquellos compuestos (como aminoácidos, ácidos grasos, etc.) que no son el componente activo para la coagulación.

Tabla 2. Efecto del tratamiento de coagulación en las características fisicoquímicas del agua residual

Parámetro	Inicial	<i>Moringa</i>	Sulfato	Resolución 0631	Unidades
Turbidez	410	57.4	9.8	N/A	UNT
pH	6.94	6.41	3.85	6-9	N/A
Conductividad	3.08	3.23	3.4	N/A	(mS/cm)
DQO	603	355	307	400	mg O ₂ /L

Color verdadero	1024	33	7	N/A	mg/L Pt- Co
Sólidos Totales	3.45	1.82	1.75	N/A	g/L
DBO₅	113	82	67	200	mg O ₂ /L
DBO₅/DQO	0.187	0.231	0.218	N/A	N/A

*N/A: No aplica

En la **Figura 1** se observa fuerte coloración azul del agua residual (izquierda) debido a los colorantes que utilizan en la empresa textil, específicamente el índigo, se observa que el agua presenta turbidez alta. Por el contrario, la muestra tratada con el extracto de Moringa (derecha) se observa más clara, con una turbidez menor a la inicial.

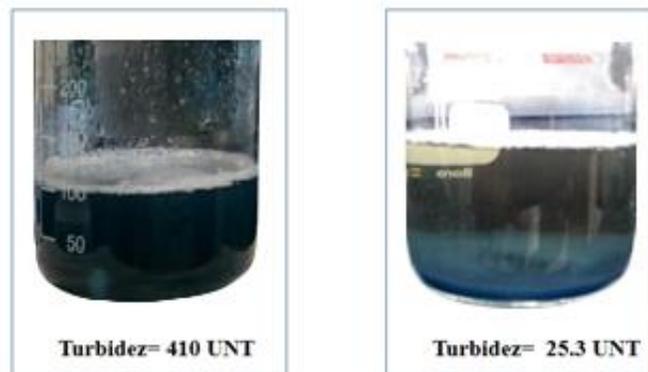


Figura 1. Muestra del agua residual antes y después de la coagulación con *Moringa oleífera*.

Cabe aclarar que en el estudio se escogieron las variables de la Resolución 0631 que fueron más accesibles en cuestión de disponibilidad de equipos y tiempo, ya que, por ejemplo, variables como: “metales y metaloides” y “aceites” no se contaba con el equipo para su medición, “sólidos sedimentables” no había en la muestra, ya que la muestra se tomó en el tanque de agitación donde previo a este hay un tanque de sedimentación.

3.2. Análisis estadístico

En la tabla del Anexo (1) se registra los resultados experimentales de cada ensayo de laboratorio según las condiciones establecidas.

3.2.1. Análisis de la tabla ANOVA

Tabla 3. Tabla ANOVA para % Remoción Turbidez.

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Efectos principales	-	-	-	-	-
A: Concentración <i>Moringa</i>	557.353	1	557.353	110.13	0.0000
B: NaCl	129.618	1	129.618	25.61	0.0000
C: Dosis	10485.8	1	10485.8	2072.02	0.0000
Interacciones	-	-	-	-	-
AA	342.579	1	342.579	67.69	0.0000
AB	51.363	1	51.363	10.15	0.0027
AC	163.282	1	163.282	32.26	0.0000
BB	135.05	1	135.05	26.69	0.0000
BC	14.415	1	14.415	2.85	0.0987
CC	8713.83	1	8713.83	1721.88	0.0000
Total (corregido)	20819.9	53	-	-	-
R²			98.95		
R²_{Adj}			98.71		
Error estándar			2.24		

En la **Tabla 3**, se observa que la concentración de *Moringa* (A), la concentración de NaCl (B), la dosis (C), con sus términos cuadráticos, las interacciones AA, AB, AC, BB y CC, resaltados con rojo, tienen un efecto significativo en el % de remoción de turbidez de la muestra de agua residual, debido a que el valor-p de cada uno es inferior a 0.05, siendo factores significativos; se puede afirmar que hay diferencias significativas en los tratamientos del diseño. Esto confirma que la eficiencia del coagulante depende principalmente de las interacciones entre los factores y cada una de las variables.

Del mismo modo, en la **Tabla 3**, se observa que los resultados de los experimentos se ajustan correctamente al modelo cuadrático, debido a que el coeficiente de determinación $R^2=98.95\%$, lo que significa que el 98% de la variabilidad de los datos lo explica el modelo utilizado. Así mismo, el $R^2_{Adj}=98.71\%$, indica el buen ajuste de los resultados al modelo cuadrático.

Las ecuaciones 6 y 7 se obtuvieron de Statgraphics, son los modelos matemáticos de estudio.

$$\begin{aligned} \%RT = & -30.8034 + 1.15179 * Cm + 100.563 * NaCl + 5.12458 * Dc \\ & - 0.0133576 * Cm^2 + 0.731458 * Cm * NaCl - 0.00652083 * Cm \\ & * Ds - 335.472 * NaCl^2 + 0.3875 * NaCl * Ds - 0.0673681 * Ds^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$Costo = 10 * Cm * Dc + 116.88 * NaCl * Dc \quad (7)$$

Donde,

$Cm =$ Cantidad de *Moringa* $\left(\frac{g}{L}\right)$

$NaCl =$ Concentración Sal (M)

$Dc =$ Dosis del coagulante $\left(\frac{mL}{L}\right)$

3.2.2. Diagrama de Pareto

En el diagrama de Pareto, las barras representan los efectos de los factores e interacciones sobre las variables de respuesta. Si superan la línea de significancia vertical hay un efecto significativo. El signo indica si es directa (+) o inversamente (-) proporcional. En la **Figura 2** se observa el diagrama de Pareto con los factores e interacciones sobre la conductividad. Según lo anterior, se observa que incrementos en la dosis (C), la sal (B) y las interacciones entre sal – dosis (BC) y dosis – dosis (CC), tienen un efecto directamente proporcional en el aumento de la conductividad del agua residual. Para el caso puntual de las interacciones, quiere decir que el efecto de uno de los factores depende del nivel del otro [36]. Este resultado indica que en el proceso de coagulación con la *Moringa*, las sales usadas en el proceso de extracción (debido a que la solubilidad de las proteínas aumenta con la concentración de sal y este fenómeno se presenta por la disminución de la asociación entre las moléculas de proteínas mediante la acción de un “blindaje” por parte de la sal [13].) inevitablemente terminan en el agua tratada, esto representa una desventaja del proceso debido a que precisamente se desea evitar que sales como el sulfato terminen en el agua tratada, sin embargo, en este caso la ventaja sería que no se tienen los iones de aluminio, los cuales han sido asociados con posibles problemas sobre la salud humana [10] [12].

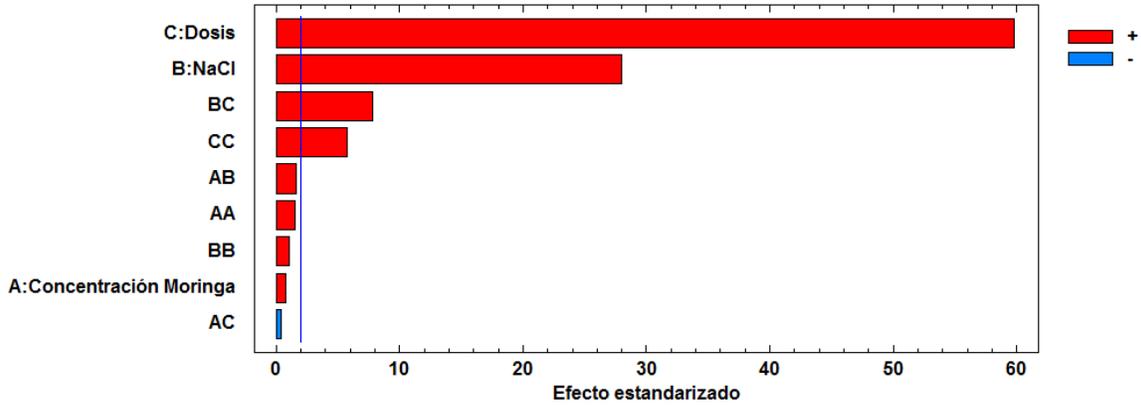


Figura 2. Diagrama de Pareto estandarizado para la conductividad

En la **Figura 3** se observa que la dosis (C) tiene un efecto directamente proporcional sobre la variable de respuesta pH, quiere decir que a medida que aumenta la dosis, en la mayoría de los casos, el pH tiende a aumentar. Respecto a la sal (B), se observa que este factor tiene un efecto positivo sobre el pH, por lo general, a medida que aumenta la concentración de sal, aumenta los valores de pH. Sin embargo, de acuerdo a la **Gráfica 1**, las variaciones sobre el pH son insuficientes para sacar este parámetro de los límites de la legislación (6-9), caso contrario de lo que ocurre con el sulfato de aluminio tal y como se muestra en la **Tabla 1**. Esto se explica debido a que las semillas de *Moringa oleífera*, al tener iones (por el alto contenido de proteínas catiónicas), se unen a los iones cargados negativamente que suelen tener los componentes del agua residual textil a través de atracciones electrostáticas [18] y, en consecuencia, se forman los flóculos sin variaciones considerables en el pH.

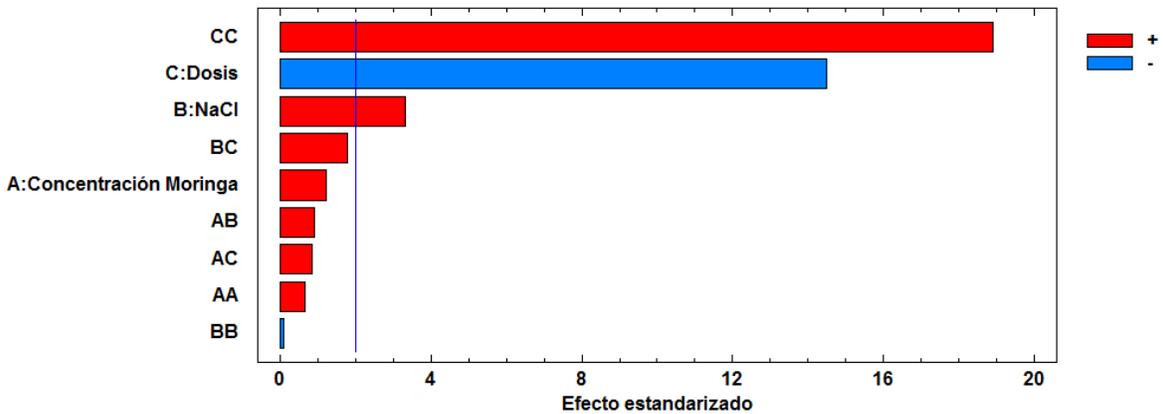
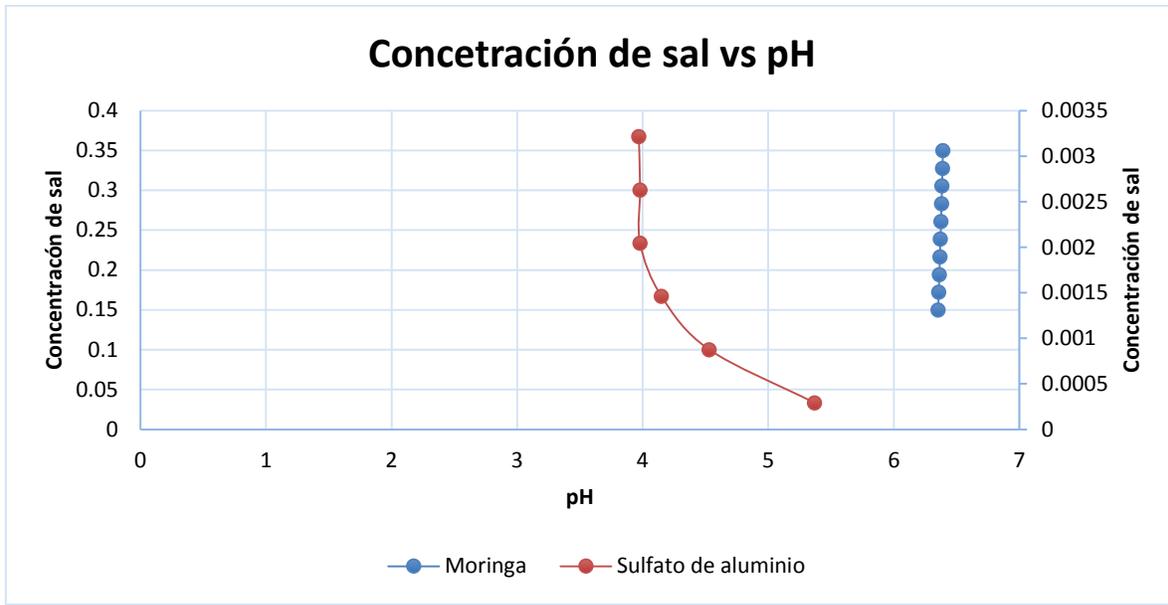


Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizado para el pH



Gráfica 1. Variación del pH respecto a la conductividad eléctrica con *Moringa* y sulfato de aluminio

En la **Figura 4** se observa que la dosis (C) tiene un efecto directamente proporcional sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez; mientras mayor es la dosis mayor remoción de turbidez habrá en el agua residual; sin embargo, se demostrará luego que existe un óptimo por encima del cual, mayores dosis no implican mayores remociones de turbidez, igual que lo que se ha encontrado en otras investigaciones [17]. La interacción dosis – dosis, concentración de *Moringa* (A), concentración de *Moringa* - concentración de *Moringa* (AA), concentración de *Moringa* – dosis, sal (B) y la interacción entre sal – sal presentan un efecto inversamente proporcional, mientras estos factores aumentan, la variable de respuesta % remoción de turbidez será menor.

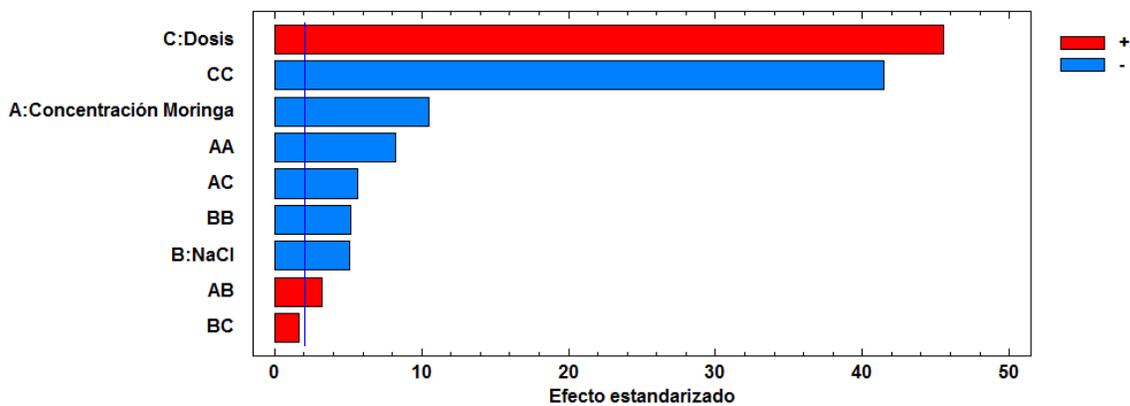


Figura 4. Diagrama de Pareto estandarizado para el %Remoción Turbidez

3.2.3. Superficie de respuesta

La **Figura 5** muestra la superficie de respuesta del % de Remoción de Turbidez como una función de concentración de *Moringa* y la dosis empleada para el proceso de coagulación con una concentración de sal de 0.15 M, esta última variable se fijó al mínimo valor porque según los resultados anteriores, para encontrar la mejor condición de la variable de interés (% RT), la concentración de sal, no es una variable tan relevante como sí lo es la cantidad de *Moringa* y la dosis del coagulante.

Se observa que la máxima remoción de turbidez es de aproximadamente 85%, remoción cercana a los resultados del único estudio reportado sobre agua residual textil, donde se reporta una eficiencia del 98% del extracto de *Moringa* para tratar aguas textiles [18]. En la **Figura 5** se observa que el %RT aumenta con la dosis hasta alrededor de los 39 mL/L, sin embargo, con dosis superiores a este óptimo, la eficiencia empieza a bajar y no hay mayores remociones de turbidez. En cuanto a la concentración de *Moringa*, se observa que, a diferencia de lo esperado inicialmente, mayores cantidades de *Moringa* generan un decrecimiento en la eficiencia de la remoción, esto puede ser porque el coagulante con *Moringa* presenta también una turbidez y luego de ser utilizada la cantidad óptima para coagular, queda *Moringa* sin reaccionar que le puede aportar turbidez adicional al agua.

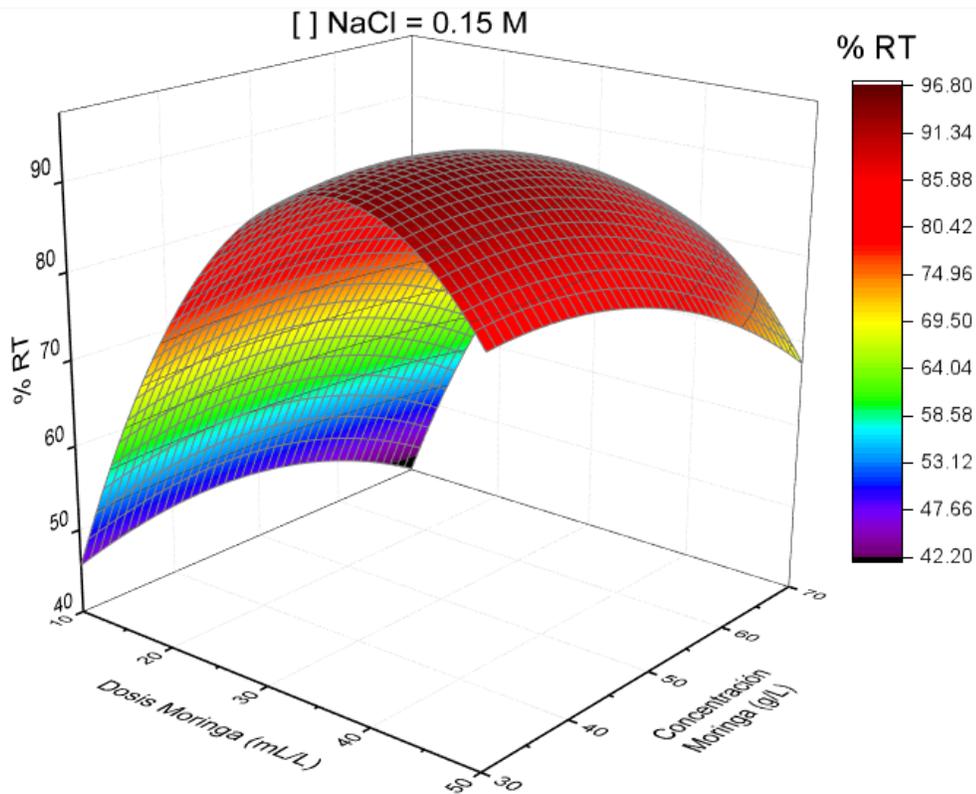


Figura 5. Superficie de respuesta para el %RT, condiciones óptimas según el modelo estadístico: dosis de coagulante *Moringa* (37 mL/L), concentración de *Moringa* (38 g/L), concentración NaCl (0.15 M)

3.2.4. Mejores condiciones para tratar 1 m³ de agua residual al menor costo

Las ecuaciones 6 y 7, expuestas anteriormente, corresponden al modelo matemático empleado para la optimización entre el %RT y el costo que se explica más adelante, de esta manera se predice el comportamiento del coagulante natural en los escenarios propuestos en los experimentos y se encuentran las condiciones óptimas de operación del proceso de coagulación con el extracto de *Moringa oleífera* como coagulante.

De acuerdo a lo descrito en el numeral 2.3.3 del diseño experimental se presupuestó que la DQO disminuía proporcionalmente con la turbidez hasta la mitad de la carga inicial, por tanto, para una DQO inicial de 603 mg/L una remoción del 63% de la turbidez se estima dejará la muestra con una DQO final alrededor de 400 mg/L, límite permisible de la legislación, sin embargo, para tener un margen de seguridad se establece un %RT del 80%, para el cual se buscarán las condiciones de operación que alcancen ese nivel involucrando los menores costos de operación.

Mediante un algoritmo de búsqueda exhaustiva en Excel Visual Basic (Anexo 3) se buscan las condiciones de operación que alcanzan un nivel específico de turbidez involucrando los menores costos de operación. La **Tabla 4** muestra las condiciones de operación para alcanzar diferentes niveles de %RT al menor costo posible de operación; se observa que las condiciones para alcanzar %RT mayor a 80% son Cantidad de *Moringa* 30g/L, 0.15 M de NaCl y 23.3 mL/L de coagulante, el costo de estas condiciones es \$7,409 pesos por m³.

Una vez seleccionada una turbidez objetivo (80%), se realizó un ensayo de coagulación adicional a las corridas del diseño de experimentos con las condiciones que arrojó el algoritmo y el porcentaje de remoción fue de 86%, valor cercano a la remoción sugerida por el programa de Excel: 82.2%. Cabe resaltar que los resultados experimentales de esta corrida se fijaron como condiciones finales después del tratamiento con *Moringa* (**Tabla 2**).

Tabla 4. Mejores condiciones para el tratamiento con *Moringa oleífera*

Turbidez deseada	Cantidad <i>Moringa</i> (g/L)	Concentración sal (M)	Dosis coagulante (mL/L)	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	% RT	Costo COP/m ³
97	39	0.22	36.67	6.23	3.65	97.1	\$ 15.188
90	34.44	0.15	27.78	6.25	3.26	90.08	\$ 10.055
80	30	0.15	23.33	6.35	3.18	82.24	\$ 7.409
70	30	0.15	18.89	6.48	3.09	72.72	\$ 5.998

60	30	0.15	14.44	6.66	3.02	60.54	\$ 4.587
50	30	0.15	14.44	6.66	3.02	60.54	\$ 4.587

3.2.5. Proceso de coagulación con sulfato de aluminio

Con el fin de comparar el efecto del extracto de *Moringa oleífera* con el efecto del sulfato de aluminio en el agua residual, se realizaron ensayos de coagulación con sulfato de aluminio. En la **Tabla 5** se observa que los resultados en cuanto a remoción de turbidez son buenos con bajas dosificaciones de coagulante, sin embargo, el pH baja a niveles por debajo de lo que permite la ley y en este caso sería necesario agregar una etapa en el proceso que corresponde al ajuste de pH. Para efluentes con contaminación alta, el coagulante natural de semillas de *Moringa* presenta mayor eficiencia, sin embargo, el sulfato de aluminio requiere menos dosis; a esta conclusión también llegaron en el estudio comparativo entre *Moringa* y sulfato realizado con agua de la quebrada “Picacha”, ubicada en Medellín, con una turbidez inicial de 3050 UNT, alcanzó remoción de turbidez del 100% y eliminación del color para el efluente [17].

Tabla 5. Experimentos de coagulación con sulfato de aluminio

*Dosis de sulfato (mg/L)	pH	Conductividad (mS/cm)	%RT	Costo (COP/m ³)
100	5.37	2.78	64.80%	\$ 220
300	4.53	2.89	95.78%	\$ 660
500	4.15	2.96	97.00%	\$ 1.100
700	3.98	3.19	97.41%	\$ 1.540
900	3.98	2.83	97.10%	\$ 1.980
1100	4.01	3.35	96.49%	\$ 2.420
100	5.36	2.95	64.83%	\$ 220
300	4.4	2.91	96.63%	\$ 660
500	4.16	2.97	97.51%	\$ 1.100
700	4.03	2.99	97.44%	\$ 1.540
900	3.85	3.4	97.61%	\$ 1.980
1100	3.83	3.2	96.49%	\$ 2.420

*Miligramos de sulfato por litro de agua residual a tratar

3.2.6. Diseño conceptual de la planta de tratamiento de aguas con *Moringa oleífera*

Aunque el sulfato de aluminio haya resultado más económico, el objetivo del trabajo es proporcionar una alternativa libre de iones de aluminio, por lo cual se realiza

como actividad académica el diseño de la planta con el extracto de *Moringa*. Una vez obtenidas las condiciones óptimas con base en los resultados experimentales, se realiza el diseño conceptual de la planta de tratamiento de agua residual, específicamente en la etapa de coagulación. El diseño de la planta incluye el dimensionamiento de los equipos y el balance de materiales del proceso para un caudal de operación de 100 m³ diarios de agua residual de la industria textil, caudal con el que trabaja la empresa en promedio por día (este dato fue proporcionado por la empresa).

3.2.6.1. Especificaciones de diseño del proceso (PDS)

Las especificaciones de diseño buscan conocer adecuadamente las necesidades y condiciones donde se va a diseñar la planta de tratamiento de agua.

Capacidad de la planta: La planta operará las 24 $\frac{\text{hora}}{\text{día}}$, 365 $\frac{\text{días}}{\text{año}}$. Esta será capaz de tratar los 100 $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$ de agua residual que se producen.

Ubicación de la planta: La planta está ubicada en Antioquia actualmente. El clima es templado y seco, la temperatura máxima oscila entre 26 y 28°C, la mínima entre 17 y 18 °C y la temperatura promedio es de aproximadamente 21.5 °C. La humedad relativa se encuentra entre 63-73% [37].

Características del agua después de la coagulación: Según lo estipulado en la resolución 0631 de 2015, las industrias que fabrican productos textiles deben cumplir con los parámetros mencionados anteriormente en la **Tabla 2** para verter el agua residual [38]:

Servicios industriales: La energía eléctrica es el servicio principal para el funcionamiento de la planta con los equipos (Bombas, tanques de agitación, trituradora, horno de convección, etc.)

3.2.6.2. Diagramas del proceso

3.2.6.3. Diagrama de entradas y salidas

Este diagrama es usado como una herramienta para entender conceptualmente el proceso [39]. Muestra las materias primas requeridas, el efluente de estudio, desechos, productos principales y secundarios correspondientes al tratamiento del agua tratada. En la **Figura 7** se observa el diagrama de entradas y salidas para el proceso de extracción y el proceso de coagulación.

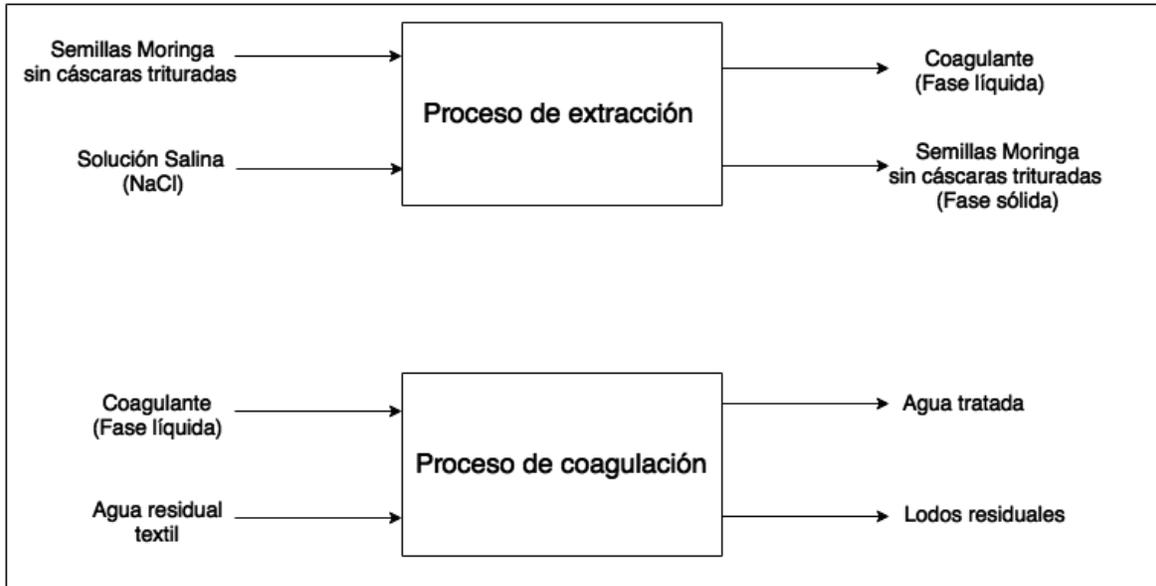


Figura 7. Diagrama de entradas y salidas proceso de extracción y proceso de coagulación.

3.2.6.4. Diagrama de bloques (BFD)

Presenta mediante bloques y flechas, las partes principales del proceso (equipos, o unidades de operación) y el flujo de este mismo. No contiene detalles puntuales del proceso pues sólo busca mostrar de manera global el proceso [26].

En la **Figura 8** y **Figura 9** se observan los diagramas de bloques del proceso de extracción y coagulación.

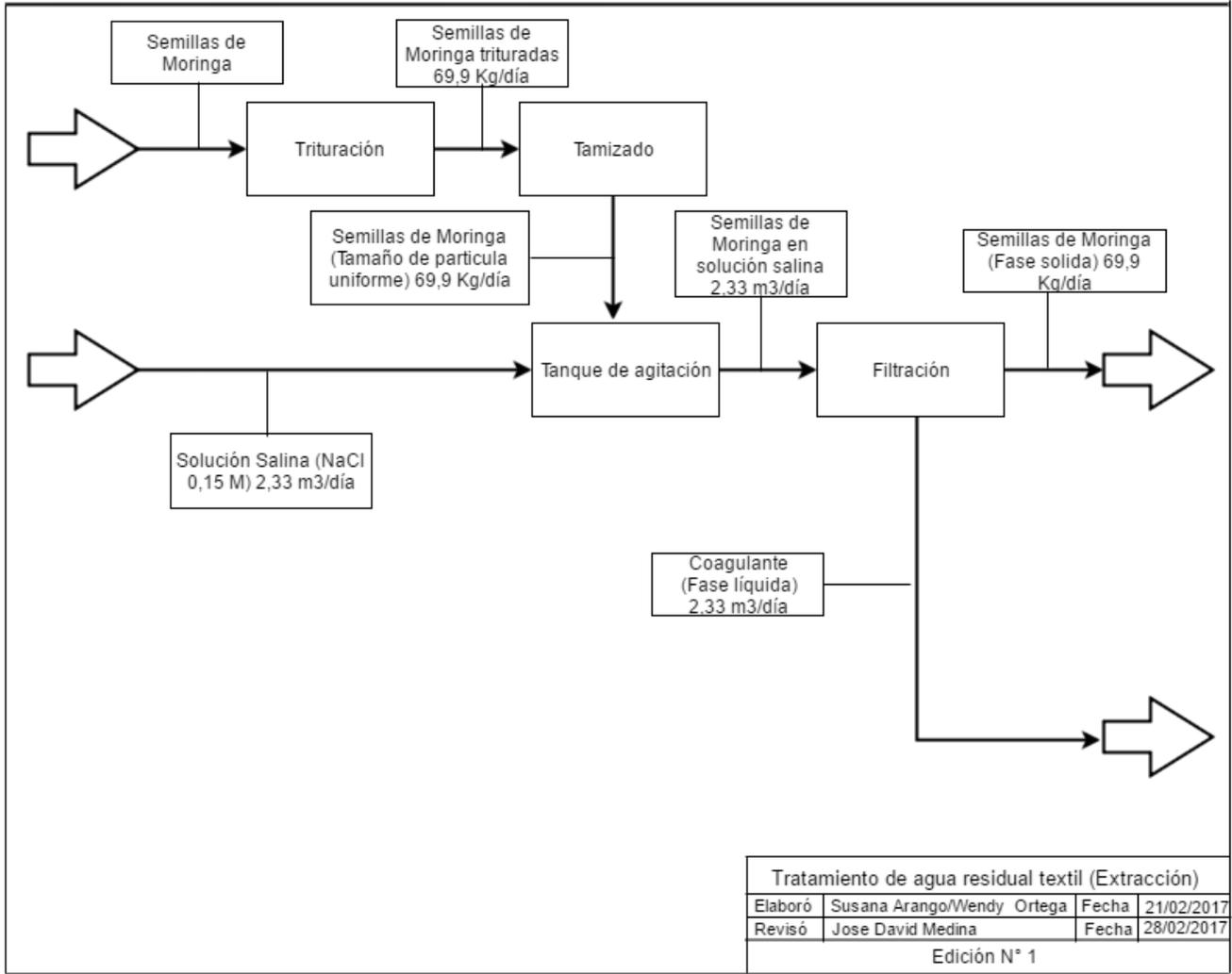


Figura 8. Diagrama de bloques proceso de extracción (proceso óptimo).

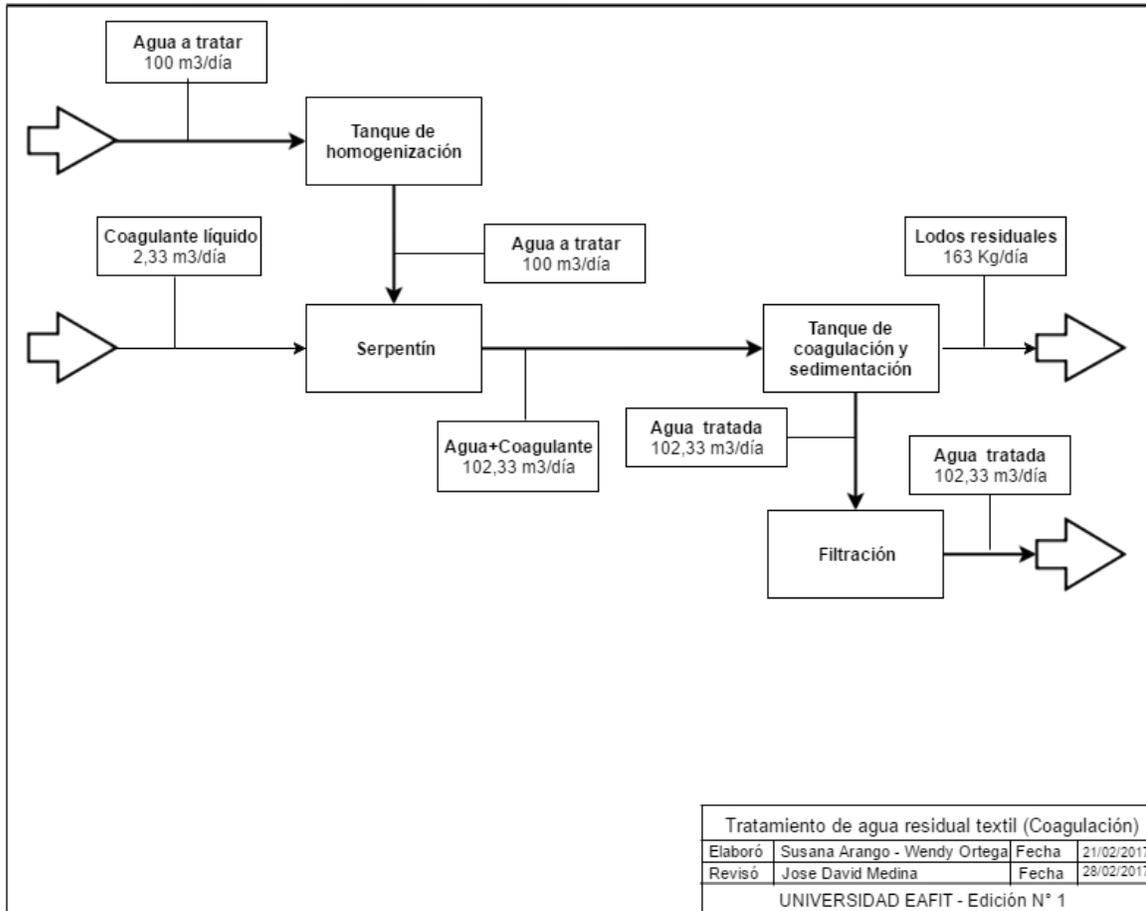


Figura 9. Diagrama de bloques proceso de coagulación (proceso óptimo).

3.2.6.5. Descripción del proceso

La planta textil es capaz de procesar 100 m³ al día de agua residual que va directamente al tanque de almacenamiento (T-100) con capacidad de 150 m³, por si existe la posibilidad de un paro en el proceso.

El proceso de tratamiento del agua residual es continuo y opera 24 horas y 7 días, comenzando en la etapa de coagulación, cuando el agua residual parte del tanque de almacenamiento y es bombeada por la bomba (P-100) hasta el serpentín, donde se mezcla rápidamente con el coagulante proveniente del Tanque de almacenamiento (T-102) durante 1 minuto (tiempo de residencia). Posterior a esto, es llevado a una unidad de coagulación (C-100) donde se lleva a cabo la mezcla lenta aproximadamente por 20 minutos; mientras se lleva a cabo el proceso de coagulación, los coágulos se van sedimentando por gravedad hasta llegar al suelo y formar el lodo que finalmente es retirado por la parte posterior del tanque. El agua tratada es bombeada finalmente por la bomba (P-102) hasta el filtro de arena

antracita donde se retiran gran parte de los sólidos suspendidos restantes que no se logró en la etapa anterior.

Por otro lado, el proceso de extracción del componente activo de la *Moringa oleífera* es un proceso batch y comienza cuando las semillas son llevadas al horno (H-100), donde son secadas durante 24 horas a una temperatura de 60°C. Las semillas ya secas se trituran en la licuadora industrial (L-100) hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 0.0555 mm, para luego ser mezclado con la solución de NaCl en un tanque de almacenamiento con agitación (T-101).

La solución con las semillas de *Moringa oleífera* es pasada por la unidad de filtración (F-100), para finalmente llegar a un tanque de almacenamiento (T-102) donde quedara disponible para el proceso de coagulación.

3.2.6.6. Diagrama de flujo de proceso (PFD)

El diagrama de flujo de proceso es el diseño fundamental del proceso, mostrando datos del proceso, unidades de operación, los equipos principales de operación y una parte de las tuberías [40].

Es una herramienta en las primeras etapas del diseño que corresponde a la ingeniería conceptual. En la **Figura 8** se encuentran las unidades del proceso que se van a diseñar conceptualmente.

T - 100: Tanque de homogenización del agua residual, de gran utilidad para homogenizar los diferentes efluentes de la industria y así garantizar un flujo estable y de características fisicoquímicas constantes para la etapa de coagulación.

H - 100: Horno industrial para tostar la cáscara de las semillas y facilitar la separación de la semilla.

L - 100: Licuadora industrial para pulverizar las semillas en partículas uniformes y de fácil mezcla

T - 101: Tanque de mezcla entre la solución de NaCl preparada a la concentración específica para el proceso de extracción y la semilla de *Moringa oleífera* triturada. La agitación se realiza con un mezclador mecánico.

F - 100: Filtro para separar la fase sólida (residuos de semilla de *Moringa oleífera*) y la fase líquida (coagulante natural).

T - 102: Tanque de almacenamiento del extracto de semillas de *Moringa oleífera*.

S - 100: Serpentín para mezcla rápida del coagulante y el agua residual. En este equipo se busca distribuir de forma homogénea el coagulante a utilizar en el agua residual.

C - 100: Unidad de clarificación donde termina formación de floculos o sólidos suspendidos aglomerados y se sedimentan por efecto de la gravedad y donde unas paletas eliminan los sólidos que quedan en el fondo del tanque arrastrándolos.

A - 100: Unidad de adsorción con carbón activado para remover los sólidos en suspensión que no fueron separados en la etapa de coagulación.

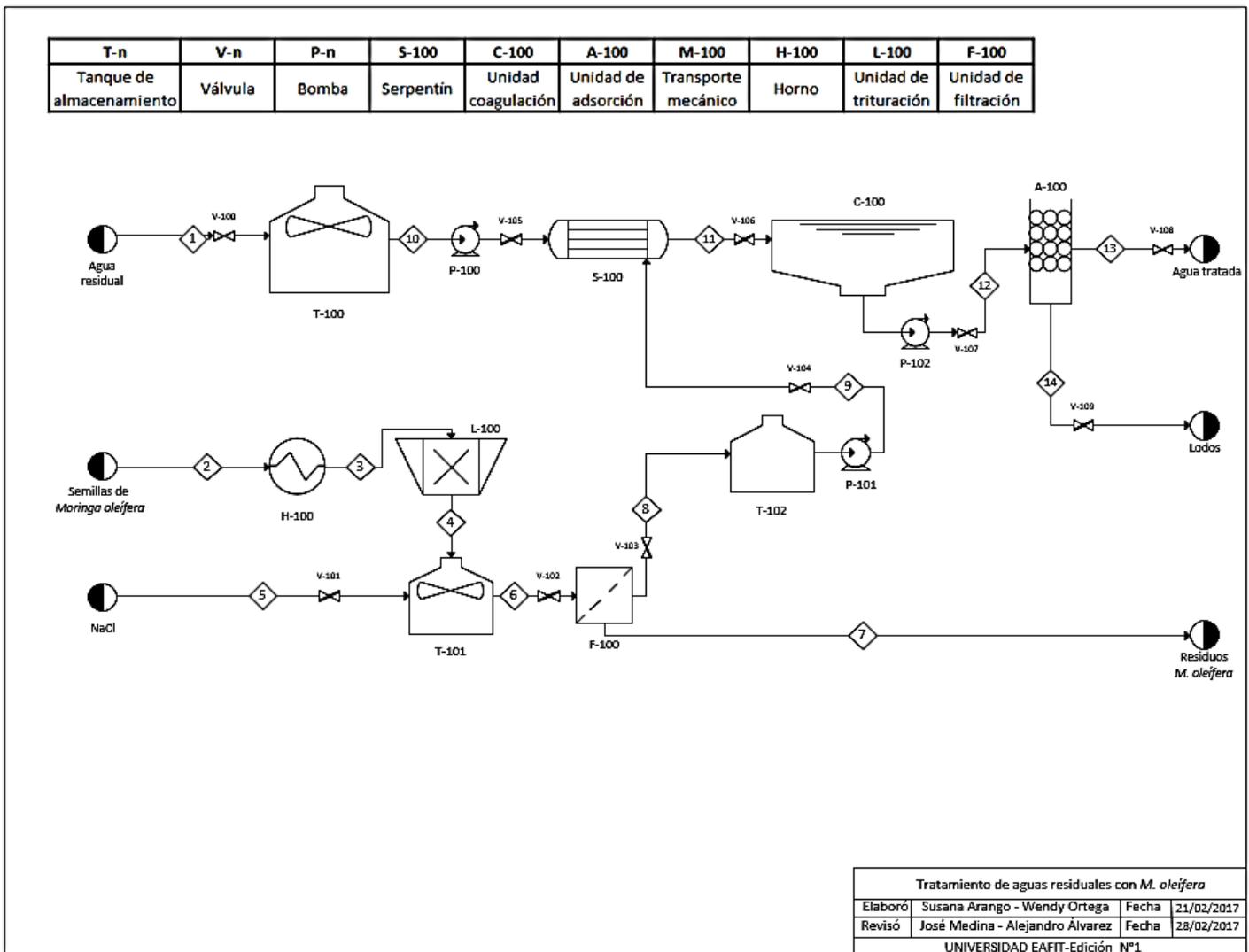


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de agua residual textil

3.2.6.7. Especificación de equipos

Resumen dimensionamiento de equipos

En la **Tabla 6** se muestran las características principales del diseño de cada equipo, la cantidad de unidades que se diseñaron y el material de construcción. En el Anexo (2) se explica detalladamente los modelos matemáticos utilizados.

Tabla 6. Resumen dimensiones equipos diseñados.

Unidad	Características de diseño	N° de Unidades	Material
Bombas (P-100, P-101, P-102)	Potencias: 0.1357, 0.00024, 0.1360 kW	3	-
T-100: Tanque homogenización	Capacidad: 150 m ³	1	Concreto
T-101: Tanque extracción coagulante	Capacidad: 3,5 m ³ , Potencia agitador: 0.023 kW	1	Fibra de vidrio
T-102: Tanque almacenamiento coagulante	Capacidad: 3,5 m ³	1	Fibra de vidrio
C-100: Tanque de sedimentación	Capacidad: 120 m ³	1	Concreto
S-100: Serpentín de mezcla	Diámetro: 31.38 mm, Diámetro comercial: 1 1/4 (35.1 mm)	1	Acero inoxidable
F-100: Filtro industrial	Tamaño de abertura: < 0.0555 mm	1	Plástico
L-100: Licuadora industrial	Potencia: 6.6 kW	1	-
H-100: Horno de convección	Potencia: 1.6 kW	1	-
A-100: Filtro arena antracita	Área de filtración: 1,064 m ²	1	Fibra de vidrio

3.2.6.7.1. Horno de convección forzada (H-100)

Marca BINDER, Modelo FD 115 [41]. Ver especificaciones en Anexos (4).

3.2.6.8. Análisis de costos

3.2.6.8.1. Costos de operación de la planta de tratamientos

- **Costos de insumos**

Los principales insumos usados en el proceso de coagulación son las semillas de *Moringa oleífera*, con un costo de COP \$ 10.000/Kg-semillas (costo variable según demanda actual) y la sal, con un costo de COP \$ 2.200/kg-sal (precio comercial), para la preparación del coagulante natural. En la **Tabla 7** se observan los costos anuales:

Tabla 7. Costos anuales insumos planta de tratamiento de agua residual

Insumo	Cantidad (kg/día)	Cantidad (kg/año)	Costo anual (COP)
Semillas de <i>Moringa</i>	70	25.513	\$ 254.019.917
NaCl	20	7.458	\$ 16.408.582
TOTAL	90	32.971	\$ 270.428.500

- **Costos energéticos**

En la **Tabla 8** se observan los costos energéticos anuales asociados a los siguientes equipos: Bombas P-100, P-101 y P-102, los tanques con agitación T-100 (Tanque de homogenización del agua residual) y T-101 (Tanque de agitación, extracción del coagulante), el tanque de coagulación y sedimentación (C-100), la licuadora industrial L-100 y el horno de convección H-100.

Para el cálculo del costo anual (C_{anual}) se realizó haciendo uso de la ecuación 8:

$$C_{anual} = P * t \quad (8)$$

Donde,

P = Potencia del equipo (KWh)

t = Horas trabajadas año (h)

El costo de la energía es la establecida por EPM en “Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado” [29], el costo es de $\frac{\text{COP } \$ 573.02}{\text{Kw}}$ y corresponde a la tarifa no residencial Industrial y comercial.

Tabla 8. Costos energéticos anuales de los equipos

	Potencia (KWh)	Consumo (kW)	COP/Anual
P-100	0,153	1337,20	\$ 766.242,26
P-101	0,003	27,69	\$ 15.869,73
P-102	0,156	1368,35	\$ 784.095,70
T-101	0,023	200,82	\$ 115.078,25
L-100	6,600	1204,50	\$ 690.202,59
H-100	1,600	14016	\$ 8.031.448,32
Total	8,535	18154,57	\$ 10.402.936,85

- **Costos de mano de obra**

Para el cálculo del gasto de mano de obra anual se deben saber cuántos operarios son necesarios. Se siguió la metodología descrita en “Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes.” [26].

El modelo de cálculo se explica detalladamente en Anexos (5). El resultado del costo anual por los 8 operarios es de *COP* \$ 103.577.664,00 durante el año 2017.

En la **Tabla 9** y en la **Figura 10** se muestran el resumen de los costos asociados al proceso del tratamiento del agua residual textil. Cabe resaltar que los costos de renta del lugar o de la ubicación de la planta no se tienen en cuenta pues este diseño se hace asumiendo que ya se tiene terreno.

Tabla 9. Resumen costos operativos del proyecto.

	COP/anual
Insumos	\$ 270.428.500
Mano de obra	\$ 103.577.664
Costos energéticos	\$ 10.402.936
TOTAL	\$ 384.409.100

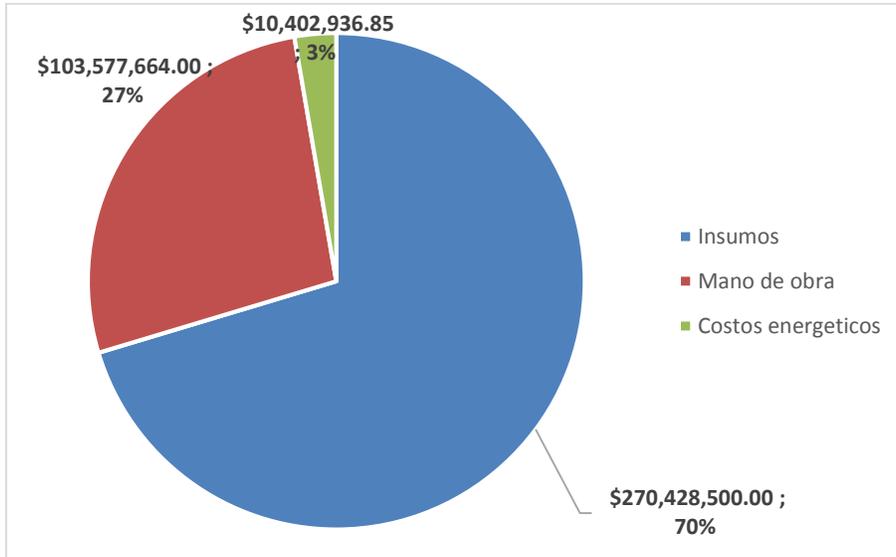


Figura 10. Resumen costos operacionales del proyecto.

3.2.6.8.2. Ahorros proyecto planta de tratamientos de aguas

El proyecto genera algunos ahorros por motivo de la reducción de contaminantes que habrá en el agua residual textil cuando sea descargada en el cuerpo hídrico.

El cálculo del monto de la tasa retributiva está dado en el decreto 2667 de 2012 por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [30] y se calcula con la ecuación 9:

$$\text{Monto tasa retributiva} = CC * Fr * tA * Q \left(\frac{COP}{\text{año}} \right) \quad (9)$$

Donde,

CC = Concentración contaminante $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

Fr =Factor regional

tA =Tasa retributiva por contaminante $\left(\frac{COP}{Kg} \right)$

Q =Caudal anual $\left(\frac{m^3}{\text{año}} \right)$

Con el fin de determinar el ahorro, se tuvo en cuenta el cambio en la concentración del contaminante en el agua residual:

$$CC = [] \text{ Contaminante inicial} - \text{Contaminante Final} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Los factores regionales se tomaron de la resolución No. 112-0858 presentada por la entidad ambiental Cornare [42], jurisdicción a la que pertenece la empresa. Las tasas retributivas para el año 2015 se tomaron del reporte de tasas retributivas por vertimientos puntuales del área metropolitana [43].

En la **Tabla 10** se presentan las variables para cada contaminante y su respectivo ahorro.

Tabla 10. Variables para el cálculo del ahorro

DBO5		
DBO5 Inicial (kg O₂/ m³)		0,113
DBO5 Final (kg O₂/ m³)		0,082
Caudal (m³/año)		36500
Tasa retributiva (COP/kg-DBO₅)	\$	122,89
Fr		2,64
Ahorrado	\$	367.092,09
SST		
SST Inicial (Kg/ m³)		1,7
SST Final (Kg/ m³)		0,3
Caudal (m³/año)		36500
Tasa retributiva (COP/Kg)	\$	52,56
Fr		5,5
Ahorrado	\$	14.771.988,00
TOTAL AHORRO (COP/anual)	\$	15.139.080,09

3.2.6.8.3. Flujo de caja del proceso

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se realizó una consulta con una empresa especializada para definir el costo aproximado del proyecto, y así establecer el valor de la inversión. El costo entregado fue de COP \$650.000.000 y se procedió a realizar el flujo de caja (**Tabla 11**), donde la inversión se deberá pagar a 10 años a una tasa efectiva anual de 11.81% [44]. Los ingresos son los ahorros que generan la tasa de contribución anual y los egresos son la anualidad que se debe pagar año a año y los costos de operación, cabe resaltar que para el ejercicio no se asumieron incrementos anuales para los costos, pero se tiene el conocimiento de que estos no son estáticos en el tiempo.

Tabla 11. Flujo de caja para el proyecto

	0	1	2	3	4
Inversión	-\$ 650 M		-\$ 483.416.444,03	-\$ 966.832.888,06	-\$ 1.450.249.332,10
Anualidad		-\$ 114.146.423,28	-\$ 114.146.423,28	-\$ 114.146.423,28	-\$ 114.146.423,28
Ahorros		\$ 15.139.080,09	\$ 15.139.080,09	\$ 15.139.080,09	\$ 15.139.080,09
Costo mano de obra		-\$ 103.577.664,00	-\$ 103.577.664,00	-\$ 103.577.664,00	-\$ 103.577.664,00
Costo Insumos		-\$ 270.428.500,00	-\$ 270.428.500,00	-\$ 270.428.500,00	-\$ 270.428.500,00
Costos energéticos		-\$ 10.402.936,85	-\$ 10.402.936,85	-\$ 10.402.936,85	-\$ 10.402.936,85
Flujo de caja	-\$ 650 M	-\$ 483.416.444,03	-\$ 966.832.888,06	-\$ 1.450.249.332,10	-\$ 1.933.665.776,13

	5	6	7	8	9	10
	-\$ 1.933.665.776	-\$ 2.417.082.220	-\$ 2.900.498.664	-\$ 3.383.915.108	-\$ 3.867.331.552	-\$ 4.350.747.996
	-\$ 114.146.423	-\$ 114.146.423	-\$ 114.146.423	-\$ 114.146.423	-\$ 114.146.423	-\$ 114.146.423
	\$ 15.139.080	\$ 15.139.080	\$ 15.139.080	\$ 15.139.080	\$ 15.139.080	\$ 15.139.080
	-\$ 103.577.664	-\$ 103.577.664	-\$ 103.577.664	-\$ 103.577.664	-\$ 103.577.664	-\$ 103.577.664
	-\$ 270.428.500	-\$ 270.428.500	-\$ 270.428.500	-\$ 270.428.500	-\$ 270.428.500	-\$ 270.428.500
	-\$ 10.402.936	-\$ 10.402.936	-\$ 10.402.936	-\$ 10.402.936	-\$ 10.402.936	-\$ 10.402.936
	-\$ 2.417.082.220	-\$ 2.900.498.664	-\$ 3.383.915.108	-\$ 3.867.331.552	-\$ 4.350.747.996	-\$ 4.834.164.440

El Valor presente neto (VPN) del proyecto es de – COP -\$ 2,233,124,043, el signo negativo indica que al ser un proyecto que busca suplir un requerimiento ambiental, no es un proyecto que genere beneficios económicos como tal. En 10 años la inversión todavía no se habría recuperado.

4. RECOMENDACIONES

- El modelo fue construido con una sola réplica, lo que no otorga una buena estimación del error experimental y como resultado no es posible afirmar con certeza que las diferencias en los resultados son estadísticamente significativas. Se recomienda hacer más de 1 réplica para los ensayos con el fin de refinar el modelo.
- Con respecto al proceso de extracción del componente activo, sería de gran interés determinar la calidad del extracto en componentes activos para el proceso coagulación (cantidad de proteínas catiónicas), para esto se podría realizar un proceso purificación como la diálisis, con tubos con

cortes de celulosa de entre 12 y 14 KDa para remover las impurezas y retener las proteínas catiónicas de interés [22], para su posterior cuantificación.

5. CONCLUSIONES

El tratamiento de agua residual textil con *Moringa oleífera* alcanzó eficiencias en remoción de turbidez cercanas a las del sulfato de aluminio, sin embargo, el costo con sulfato es alrededor de 5 veces menor que con la *Moringa*. Los parámetros evaluados pH, conductividad, turbidez residual y otros como la DQO y DBO₅, alcanzaron valores que se ajustan dentro del marco legal, por lo tanto, la coagulación con *Moringa oleífera* permite que el agua residual cumpla con algunos parámetros establecidos en la resolución 0631 del 2015 y se eviten así comparendos ambientales.

Los factores de estudio concentración de *Moringa*, concentración de NaCl y dosificación del extracto, demostraron tener incidencia directa en las diferentes variables de respuesta y en la relación costo-eficiencia, siendo la dosis, el factor que más incidencia tendría en la eficiencia de la remoción de turbidez, regulación de pH y conductividad y el costo necesario para esto. Las condiciones óptimas de operación para un 80% de remoción fueron cantidad de *Moringa* 30g/L, 0.15 M de NaCl y 23.3 mL/L de coagulante, el costo de estas condiciones es \$7,409 pesos por m³; superior al costo de otras empresas como EPM (2.669 COP \$/m³) y superior incluso al tratamiento con sulfato (aproximadamente COP \$ 1.980/m³).

Se identificó que la *Moringa oleífera* funciona como alternativa a los coagulantes tradicionales, esto resulta de gran interés para el tratamiento de aguas residuales no solamente de la industria textil, sino de otra naturaleza y condiciones, dando cabida a otra alternativa dentro de los tratamientos de agua residual. Al ser una alternativa al sulfato de aluminio que tiene indicios de ser tóxico y que es potencialmente reemplazable, sería interesante en otro estudio evaluar el agua tratada con *Moringa*, con más de dos réplicas para darle mayor peso a las pruebas y así determinar sus posibles impactos en la salud humana y el ecosistema, para asegurar que, en vez de estar ocasionando afectaciones, se están evitando

Con base en los resultados del diseño conceptual, basado en las mejores condiciones para el tratamiento del agua residual textil con *Moringa* y sus costos de operación, se demostró que es un proyecto viable técnicamente pero no es viable económicamente, debido a que es un proceso que no genera ganancias, sin embargo, genera ahorros asociados a la tasa retributiva por la disminución de vertimientos contaminados a cuerpos hídricos, que a pesar de ser ingresos, no son suficientes para el mantenimiento de la planta, ni el pago de la inversión inicial. A pesar de estos resultados, se debe comenzar a tener conciencia de que este tipo de alternativa son aquellas que en un futuro podrán entrar a competir con coagulantes tradicionales.

6. Tabla de anexos o apéndices

En la **Tabla 12** aparecen los anexos del trabajo de estudio correspondiente a toda la parte de diseño conceptual de los equipos involucrados dentro del proceso, las especificaciones de algunos equipos y el modelo de cálculo para el costo de la mano de obra.

Tabla 12. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo (propio /terceros)	Tipo de archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Anexo 1. Corridas experimentales	Propio	PDF	https://drive.google.com/file/d/0B-ZtvAJuM-_8ajlYOWI3SFphV3c/view?usp=sharing
Anexo 2. Dimensionamiento de equipos	Propio	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-ZtvAJuM-_8c085U0IQSjJ6WWc
Anexo 3. Mejores condiciones <i>Moringa</i>	Propio	Excel	https://drive.google.com/open?id=0B-ZtvAJuM-_8azdfS3FnbHF4N00
Anexo 4. Especificación de equipo	Tercero	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-ZtvAJuM-_8X01FVEcweW45M2c
Anexo 5. Costos de mano de obra	Propio	PDF	https://drive.google.com/open?id=0B-ZtvAJuM-_8dzBybjA4dGtFdEU

Referencias

- [1] A. Alinsafia, M. Khemisa, M. , L. Ponsa y A. Yaacoubib, «Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater,» *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, nº 2005, p. 461–470, 2004.
- [2] J. H. Souza Freitas, K. V. de Santana, A. C. do Nascimento y S. Carvalho de Paiva, «Evaluation of using aluminum sulfate and water-soluble Moringa oleifera seed lectin to reduce turbidity and toxicity of polluted stream water,» *Chemosphere*, vol. 163, pp. 133 - 141, 2016.
- [3] A. K. Verma, R. R. Dash y P. Bhunia , «A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters,» *Journal of Environmental Management*, vol. 93, nº 1, pp. 154-168, 2012.
- [4] I. Khouni, B. Marrot , P. Moulin y R. Ben Amar , «Decolourization of the reconstituted textile effluent by different process treatments: Enzymatic catalysis, coagulation/flocculation and nanofiltration processes,» *Desalination*, vol. 268, nº 1-3, pp. 27-27, 2011.
- [5] E. GilPavas, I. Dobrosz-Gómez y M. Á. Gómez-García , «Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment,» *Journal of Environmental Management*, vol. 191, pp. 189-197, 2017.
- [6] C.-Y. Yin, «Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment,» *Process Biochemistry*, vol. 45, p. 1437–1444, 2010.
- [7] M. Magesh Kumar, R. Karthikeyan, K. Anbalagan y M. Nishant Bhanushali, «Coagulation process for tannery industry effluent treatment using Moringa oleifera seeds protein: Kinetic study, pH effect on floc characteristics and design of a thickener unit,» *Separation Science and Technology*, vol. 51, pp. 2028-2037, 2016.
- [8] S. Lin y M. Chen, «Treatment of textile wastewater by electrochemical methods for reuse,» *Water Research*, vol. 28, pp. 277-282, 1994.
- [9] P. Oberholster, J. G. Myburgh, A. P.J, J. J. Coetzee y A. M. Botha, «Bioaccumulation of Aluminium and iron in the food chain of Lake Loskop,

South Africa.,» *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 75, p. 134–141, 2012.

- [10] R. Torrellas Hidalgo, «La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud,» *Revista Tecnogestión*, vol. 9, nº 1, pp. 3-11, 2012.
- [11] P. Shukla, A. Tiwari y P. Mishra, «Study on Moringa oleifera Lam. Syn. Seed as a Ecofriendly Coagulant and Antimicrobial agent for Water Purification,» *Research Journal of Science and Technology*, vol. 8, nº 1, pp. 45-50, 2016.
- [12] Organización Mundial de la Salud, «Aluminium in Drinking-Water,» 1998. [En línea]. Available: http://www.who.int/water_sanitation_health/.
- [13] T. Okuda , A. U. Baes , W. Nishijima y M. Okada, «Improvement of extraction method of coagulation active components from Moringa oleifera seed,» *Water Research*, vol. 33, nº 15, pp. 3373-3378, 1999.
- [14] Universidad Nacional de Colombia, «Agencia de noticias Unal,» [En línea]. Available: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/planta-de-moringa-con-propiedades-nutritivas-y-medicinales.html>. [Último acceso: 31 05 2017].
- [15] R. S. G. & M. C. Bernal, «Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,» 2015. [En línea]. Available: <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>.
- [16] W. Garde, S. G. Buchberger, D. Wendell y M. J. Kupferle, «Application of Moringa oleifera Seed Extract to Treat Coffee Fermentation Wastewater,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 329, pp. 102-109, 2017.
- [17] L. L. Salazar, M. Luna del Risco y R. E. Salazar Cano, «Comparative study between M. oleifera and aluminum sulfate for water treatment: case study Colombia,» *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 187- 668, 2015.
- [18] P. A. Bedekar, B. N. P. S. M. Bhalkar y S. Govindwar, «Moringa oleifera-mediated coagulation of textile wastewater and its biodegradation using novel consortium-BBA grown on agricultural waste substratum,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, p. 20963–20976, 2016.
- [19] B. A. Nordmark, T. M. Przybycien y R. D. Tilton , «Comparative coagulation performance study of Moringa oleifera cationic protein fractions with varying

water hardness,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, nº 4, pp. 4690-4698, 2016.

- [20] B. Fayos García, «Metodología de extracción In Situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2007.
- [21] Endecotts, «Endecotts,» [En línea]. Available: <http://www.endecotts.com/faq/sieves-and-calibration/american-standard-test-sieve-series-astm/>. [Último acceso: 24 Marzo 2017].
- [22] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales,» 2007. [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428. [Último acceso: 29 05 2017].
- [23] A. P. H. A. APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater: selected analytical methods approved and cited by the United States Environmental Protection Agency, twenty-second ed., Washington, DC, USA.: APHA-AWWA-WEF, 2012.
- [24] ICONTEC, *NTC 3903 Procedimiento para el Método de Jarras en la Coagulación-Floculación del agua*, 1996.
- [25] International Organization for Standardization, «Flow diagrams for process plants-General rules,» International Organization for Standardization, Switzerland, 1997.
- [26] R. Turton, R. C. Baile, W. B. Whiting y J. A. Shaelwitz, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes.*, Boston: Pearson education, 2009.
- [27] S. M. Walas, *Chemical Process Equipment- Selection and design*, Boston: Butterworth-Heinemann, 1990.
- [28] Ministerio de trabajo, «Ministerio de trabajo,» Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.mintrabajo.gov.co/diciembre-2016/6660-salario-minimo-en-2017-tendra-un-incremento-del-70.html>. [Último acceso: 27 Marzo 2017].
- [29] EPM, «EPM,» Marzo 2017. [En línea]. Available: <http://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/tarifas/2017/Publicaci%C3>

%B3n%20Marzo%2015%20de%202017%20Opci%C3%B3n.pdf. [Último acceso: 22 Marzo 2017].

- [30] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, «Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible,» 21 Diciembre 2012. [En línea]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2012/dec_2667_2012.pdf. [Último acceso: 26 Marzo 2017].
- [31] M. Mageshkumara y . R. Karthikeyan, «Modelling the kinetics of coagulation process for tannery industry effluent treatment using Moringa oleifera seeds protein,» *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, nº 32, pp. 14954-14964, 2015.
- [32] A. Ndabigengesere y S. Narasiah, «Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds,» *Pergamin*, vol. 32, nº 3, pp. 781-791, 1998.
- [33] H. Bhuptawat, G. K. Folkard y S. Chaudhari , «Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating Moringa oleifera seed coagulant,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, pp. 477-482, 2007.
- [34] F. Kweku Amagloh y A. Benang, «Effectiveness of Moringa oleifera seed as coagulant for water purification,» *African Journal of Agricultural Research*, vol. 4, nº 1, pp. 119-123, 2009.
- [35] T. Okuda , A. U Baes , W. Nishijima y M. Okada, «Improvement of extraction method of coagulation active components from Moringa oleifera seed,» *Elsevier*, vol. 33, nº 14, pp. 3373-3378, 1999.
- [36] H. Gutiérrez Pulido y R. de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos Tercera edición*, México: McGrawHill, 2012.
- [37] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia., «IDEAM,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>. [Último acceso: 27 Marzo 2017].
- [38] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, «Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible,» 17 Marzo 2015. [En línea]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf. [Último acceso: 27 Marzo 2017].

- [39] T. E. Welch, *Moving Beyond Environmental Compliance*, New York : Lewis Publishers , 1998.
- [40] T. McAviney y R. Mulley, «Control System Documentation,» *The Instrumentation, Systems, and Automation Society* , EEUU, 2004.
- [41] Binder, «Binder, Best conditions for your success,» [En línea]. Available: <https://www.binder-world.com/es/Productos/C%C3%A1maras-de-calor-y-de-secado-Avantgarde.Line/Serie-FD/FD-115#1>. [Último acceso: 24 Marzo 2017].
- [42] Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, «CORNARE,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.cornare.gov.co/instrumentos-economicos/tasas-retributivas/Resolucion-112-0858-2014.pdf>. [Último acceso: 26 Marzo 2017].
- [43] Área metropolitana del Valle de Aburra, «Área metropolitana del Valle de Aburra,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Pages/tasasretributivas.aspx>. [Último acceso: 26 Marzo 2017].
- [44] GrupoBancolombia, «GrupoBancolombia,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.grupobancolombia.com/wps/portal/personas/productos-servicios/creditos/consumo/libre-inversion/>. [Último acceso: 5 Abril 2017].
- [45] J. J. Perfetti, Á. Balcázar, A. Hernández y J. Leibovich, «Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia,» *La Imprenta Editores S.A*, Bogotá, 2013.
- [46] OA-FAO, «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/organicag/oa-faq/oa-faq6/es/>.
- [47] C. C. Internacional, «Asohofrucol,» 2006. [En línea]. Available: http://asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_28_PHN.pdf. [Último acceso: 02 2016].
- [48] L. Neufeld, M. Rubio , L. Pinzon y L. Tolentino, «Banco Interamericano de desarrollo,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.iadb.org/wmsfiles/products/publications/documents/35791560.pdf> . [Último acceso: 216].

- [49] R. Melgar, «Fertilizando,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.fertilizando.com/articulos/Impacto%20Ambiental%20de%20Fertilizantes.asp>. [Último acceso: 2016].
- [50] K. A. Ghebremichael, K. R. Gunaratna, H. Henriksson, H. Brumer y G. Dalhammar, «A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed,» *Water Research*, vol. 39, p. 2338–2344, 2005.
- [51] F. Pereira Camacho, V. Serrão Sousa, R. Bergamasco y M. Ribau Teixeira, «The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 313, p. 226–237, 2017.
- [52] V. Castillo Uribe, «Diseño y cálculo de un agitador de fluidos,» Octubre 2013. [En línea]. Available: http://repositorio.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf. [Último acceso: 17 03 2017].
- [53] C.T.F. Cienc. Tecnol. Futuro, Bucaramanga, «SciELO,» [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100006. [Último acceso: 24 Marzo 2017].
- [54] W. L. McCabe, J. C. Smith y P. Harriott, *Operaciones unitarias en ingeniería química*, México DF: McGraw-Hill, 2007.
- [55] American Water Works Association, *American Water Works Association Standards*, New Jersey: American Water Works Association, 2011.
- [56] E. E. Baruth, *Water Treatment Plant Design*, EEUU: McGraw-Hill, 2005.
- [57] M. Mageshkumar y R. Karthikeyanb, «Modelling the kinetics of coagulation process for tannery industry effluent treatment using *Moringa oleifera* seeds protein,» *Distillation and Water Treatment*, pp. 1-11, 2015.
- [58] C. Hawkes y M. Ruel, «The linkage between agriculture and health: an inter-sectoral opportunity to improve the health and livelihoods of poor,» *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 84, pp. 985-991, 2006.
- [59] A. K. Kumari, R. K. Kumar y N. C. Rao, «Adverse effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment,» *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, pp. 150-151, 10 2014.

- [60] P. A. Bedekar, B. N. P. S. M. Bhalkar y S. Govindwar, «Moringa oleifera-mediated coagulation of textile wastewater and its biodegradation using novel consortium-BBA grown on agricultural waste substratum,» *Environ Sci Pollut Res*, 2016.