

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento <b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	Código <b>F-AC-DBL-007</b>	Fecha <b>10-04-2012</b>	Revisión <b>A</b>
Dependencia <b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	Aprobado <b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		Pág. <b>1(1)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTOR	JORGE ANDRES DUARTE DUARTE
FACULTAD	CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA AMBIENTAL
DIRECTOR	MARIA ANGELICA ACOSTA PEREZ
TÍTULO DE LA TESIS	EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LAS SEMILLAS DE <i>Moringa oleífera</i> COMO AGENTE UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA Y RESIDUAL EN OCAÑA, COLOMBIA.

### RESUMEN

EL PRESENTE ESTUDIO TIENE POR FINALIDAD EVALUAR LA EFICACIA QUE PRESENTAN LA SOLUCIÓN DE SEMILLAS DE *Moringa oleífera* EN COMPARACIÓN CON EL SULFATO DE ALUMINIO, APLICADAS PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUA CRUDA DE ORIGEN SUPERFICIAL Y AGUA RESIDUAL EN OCAÑA, REALIZANDO ESTUDIOS COMPARATIVOS DESDE TRES EJES DE TRABAJO. EL PRIMERO CORRESPONDE AL EJE OPERATIVO QUE CORRESPONDE A PRUEBAS DE JARRAS, EVALUACIÓN DE FLOCULACIÓN Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN PARÁMETROS EXIGIDOS POR LA NORMATIVA VIGENTE. SEGUIDAMENTE, SE REALIZÓ UNA COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE LOS DOS COAGULANTES Y COMO TERCER EJE EVALUATIVO SE DESARROLLÓ UN ESTUDIO DE TOXICIDAD AGUA Y CRÓNICA POR MEDIO DE BIOENSAYOS DE TOXICIDAD CON *Panagrellus redivivus* y *Lactuca sativa* COMO ORGANISMOS DE PRUEBA.

### CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 130	PLANOS:	ILUSTRACIONES:33	CD-ROM: 1
--------------	---------	------------------	-----------



VÍA ACOLSURE, SEDE EL ALGODONAL, OCAÑA N. DE S.  
 Línea Costeórea Nacional 01 8000 1 11033 / PBX: 003 5608000  
[www.ufpsocoduro.com](http://www.ufpsocoduro.com)



EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LAS SEMILLAS DE *Moringa oleífera*  
COMO AGENTE UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA Y RESIDUAL  
EN OCAÑA, COLOMBIA.

AUTOR:  
JORGE ANDRES DUARTE DUARTE

Proyecto de grado como requisito para optar el título de Ingeniero ambiental

Directora:  
MARIA ANGELICA ACOSTA PEREZ  
PhD. Ingeniera mecánica

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE  
INGENIERÍA AMBIENTAL

Ocaña, Colombia

agosto de 2017

## Dedicatoria

*“Jehová es bueno, fortaleza en el día de la angustia; y conoce a los que en él confían”*

*Nahúm 1:7*

Este logro está dedicado al Topoderoso que es nuestro fortaleza en todo momento, permitiendo que todo suceda bajo su control divino. De igual forma, lo dedicó a mi familia y amigos que fueron de gran apoyo durante todo el proceso académico, especialmente a mi madre Cecilia Rosa, mi abuela Luz Marina, mi hermana Tania Yineth y mi tía Yulied que desde mis primeros años de estudio fueron apoyo incondicional y me animaron a dar lo mejor de sí con gran esfuerzo y dedicación.

## **Agradecimientos**

A Dios por toda su provisión y cuidado durante todos los años de estudio. Gracias al apoyo de mi familia y amigos por su respaldo. Agradecimientos especiales a mi directora y querida profesora María Angélica Acosta Pérez por toda su dirección, paciencia, apoyo indudable y todas sus enseñanzas que mostraron la forma de ser un profesional íntegro y eficiente.

De igual forma, agradezco al Grupo de investigación Ambiental agropecuario y Desarrollo sostenible GI@DS de la Facultad de Ciencias Agrarias y del ambiente por su gestión y apoyo logístico para el cumplimiento del acometido investigativo. Asimismo, agradezco a la coordinadora de laboratorio de biología, la zootecnista Viviana Rodríguez Álvarez y al Magister Henry Jaimes Díaz por su actuación y apoyo incansable durante el proceso. Gracias a la empresa ESPO S.A. y a los operarios de la PTAP Algodonal por su apoyo prestado y calidad humana en el desarrollo de las actividades investigativas.

Agradecimientos al personal del Laboratorio de Aguas, al Laboratorio de Nutrición y al de Biología de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por su apoyo por su paciencia en la realización de cada una de las pruebas.

## Índice

	Pág.
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Evaluación de la eficacia de las semillas de <i>Moringa oleífera</i> como agente utilizado en el tratamiento de agua cruda y residual en Ocaña, Colombia.....</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Delimitaciones.....	9
1.5.1 Delimitación operativa.....	9
1.5.2 Delimitación conceptual.....	10
1.5.3 Delimitación geográfica.....	11
1.5.4 Delimitación temporal.....	11
<b>Capítulo 2: Marco referencial.....</b>	<b>12</b>
2.1. Marco histórico.....	12
2.2 Marco contextual.....	16
2.3 Marco conceptual.....	18
2.4 Marco teórico.....	20
2.4.1 Sustancias solidas presentes en aguas crudas naturales.....	20
2.4.2 Fuerzas coloidales.....	22
2.4.3 Coagulación.....	23
2.4.4 Floculación.....	24
2.4.5. Moringa oleífera.....	24
2.4.6 Ecotoxicología, batería de ensayos y pruebas de toxicidad.....	27

2.4.7 Evaluación del impacto ambiental.....	29
2.5 Marco legal.....	30
2.5.1 Constitución Política de Colombia de 1991.....	30
2.5.2 Leyes.....	31
2.5.3 Decretos.....	31
2.5.4 Resoluciones.....	32
2.5.5 Normas Técnicas Colombianas.....	33
<b>Capítulo 3: Diseño metodológico.....</b>	<b>35</b>
3.1. Tipo de investigación.....	35
3.2. Población.....	36
3.3. Muestra.....	37
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	38
3.5. Procesamiento y análisis de la información.....	47
<b>Capítulo 4: Resultados.....</b>	<b>48</b>
4.1. Preparación de la solución coagulante de semillas de <i>Moringa oleífera</i> .....	48
4.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua cruda y residual.....	49
4.2.1. Caracterización fisicoquímica de agua cruda.....	50
4.2.2 Caracterización fisicoquímica de agua residual.....	60
4.2.3. Caracterización microbiológica de agua cruda y residual.....	69
4.3.Comparación de la eficacia operativa, económica y Ecotoxicología de la solución de <i>Moringa oleífera</i> y el sulfato de aluminio.....	75
4.3.1. Comparación de la eficacia operativa.....	75
4.3.2. Comparación económica.....	81
4.3.3. Comparación Ecotoxicología.....	83
<b>Capítulo 5: Conclusiones.....</b>	<b>93</b>
<b>Capítulo 6: Recomendaciones.....</b>	<b>96</b>

<b>Referencias.....</b>	<b>97</b>
<b>Apéndices.....</b>	<b>103</b>
Apéndice A.....	104
Apéndice B.....	105
Apéndice C.....	106
Apéndice D.....	114

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Clasificación científica de <i>Moringa oleífera</i> .....	25
Tabla 2 Identificación de lugares de muestreo .....	37
Tabla 3 Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua para consumo humano .....	40
Tabla 4 Parámetros y valores límites máximos permisible para aguas residuales .....	42
Tabla 5 Parámetros de condiciones normales para ensayos de jarras.....	43
Tabla 6 Resultados de pruebas NMP para coliformes totales.....	74
Tabla 7 Resultados de pruebas de jarras .....	76
Tabla 8 Índice de Willcomb.....	78
Tabla 9 Evaluación de floculación.....	78
Tabla 10 Matriz de análisis de costos para coagulantes .....	82
Tabla 11 Resultados de mortalidad de <i>P. redivivus</i> en agua cruda con sulfato de aluminio .....	84
Tabla 12 Análisis probit para prueba crónica de agua cruda con sulfato de aluminio .....	84
Tabla 13 Resultados de mortalidad de <i>P. redivivus</i> en agua cruda con <i>M. oleífera</i> .....	85
Tabla 14 Análisis probit para prueba crónica de agua cruda con <i>M. oleífera</i> .....	86
Tabla 15 Resultados de mortalidad de <i>P. redivivus</i> en agua residual con sulfato de aluminio ...	86
Tabla 16 Análisis probit para prueba crónica de agua residual con sulfato de aluminio.....	87
Tabla 17 Resultados de mortalidad de <i>P. redivivus</i> en agua residual con <i>M. oleífera</i> .....	88
Tabla 18 Análisis probit para prueba crónica de agua residual con sulfato de aluminio.....	88
Tabla 19 Análisis probit para bioensayo de toxicidad con <i>Lactuca sativa</i> .....	90

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Vista general del árbol de Moringa oleífera .....	25
Figura 2. Frutos de Moringa oleífera. ....	26
Figura 3. Secuencias de etapas, fases y flujo de operaciones del proyecto. ....	36
Figura 4. Diseño del etiquetado para muestras de aguas .....	38
Figura 5. Variables independientes y sus respectivos valores .....	44
Figura 6. Diagrama esquemático de la Prueba de toxicidad crónica con <i>P. redivivus</i> .....	46
Figura 7. Diagrama esquemático de la prueba de toxicidad aguda.....	46
Figura 8. Molido de semillas de Moringa oleífera.....	48
Figura 9. Solución de M. oleífera .....	49
Figura 10. Análisis de pH en muestra de agua cruda.....	51
Figura 11. Análisis de color en muestra agua cruda .....	52
Figura 12. Análisis de turbiedad en muestra de agua cruda .....	53
Figura 13. Análisis de conductividad en muestra de agua cruda.....	54
Figura 14. Análisis de nitritos en muestra de agua cruda .....	55
Figura 15. Análisis de nitratos en muestra de agua cruda.....	56
Figura 16. Análisis de Aluminio en muestra de agua cruda .....	57
Figura 17. Análisis de dureza total en muestra de agua cruda.....	58
Figura 18. Análisis de sulfatos en muestra de agua cruda. ....	59
Figura 19. Análisis de hierro en muestra de agua cruda. ....	60
Figura 20. Análisis de pH en muestra de agua residual.....	61
Figura 21. Análisis de DQO en muestra de agua residual .....	62
Figura 22. Análisis de DBO5 en muestra de agua residual. ....	63
Figura 23. Análisis de SST en muestra de agua residual.....	64
Figura 24. Análisis de SSED en muestra de agua residual .....	65
Figura 25. Análisis de nitritos en muestra de agua residual. ....	66
Figura 26. Análisis de nitratos en muestra de agua residual.....	67
Figura 27. Análisis de nitrógeno amoniacal en muestra de agua residual.....	68
Figura 28. Tabla NMP para coliformes totales.....	70

Figura 29. Revisión de coloración en tubos múltiples para Coliformes Totales .....	71
Figura 30. Imágenes de los ensayos de jarras. ....	76
Figura 31. Eficacia porcentual de coagulante en agua cruda. ....	79
Figura 32. Eficacia porcentual de coagulantes en agua residual. ....	80
Figura 33. Cajas de petri con coloración de análisis.....	89

## Listas de Abreviaturas

APHA: Asociación América de Salud Pública

Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, Sulfato de aluminio

ARD: Aguas Residuales Domesticas

ARnD: Aguas Residuales no Domesticas

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno, medida a 5 días

DQO: Demanda Química de Oxígeno

E. Coli: Escherichia Coli

ESPO S.A: Empresa de Servicios Públicos de Ocaña

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales

L/s: Litros por segundo

OMS: Organización Mundial de Salud

M. oleífera: Moringa oleífera

OPS: Organización Panamericana de Salud

pH: Potencial de Hidrogeno

PPM: Partes por millón.

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

SSED: Sólidos Sedimentables

SST: Solidos Suspendidos Totales

UFPSO: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

UNT: Unidades Nefelométrías de Turbidez

VLMP: Valor Límite Máximo Permisible

## Introducción

La sustitución de sustancias empleadas en el tratamiento de agua por compuestos de origen natural que sean alternativas sostenibles y mayormente eficaces que las sustancias convencionales, se ha tornado en una temática de estudio de gran bagaje a nivel internacional, debido a los diferentes beneficios que trae consigo la aplicación de sustancias de origen natural para el tratamiento de aguas en comunidades con recursos monetarios limitados, permitiendo reemplazar productos convencionales que devengan altos costos y residuos del procesos no inocuos, que repercutan de alguna manera en el equilibrio del ambiente.

Cabe destacar que en el desarrollo de este tipo de estudios, se hace necesario realizar una evaluación de lo eficaz que puede ser determinado compuesto frente a un patrón de referencia, es por ello que el proyecto corresponde a una investigación de tipo evaluativo, que confronta el efecto que tiene el agente natural como las semillas de *M. oleífera* frente al efecto generado por el coagulante tradicional que de manera puntual corresponde al sulfato de aluminio. No obstante, la evaluación se realiza desde diferentes puntos de vista, no tan solo enfocado al tema paramétrico sino también, bajo una mirada al contexto económico, el cual representa un análisis de que costos se requieren asumir para la utilización de los coagulantes, además del efecto de exposición que los residuos generados en el tratamiento de agua pueden provocar en la flora y la fauna de los ecosistemas.

Es por ello que la presente investigación tiene como finalidad evaluar la eficacia operativa, económica y ecotoxicológica de las semillas de *Moringa oleífera* en comparación con el efecto

producido por el sulfato de aluminio en el tratamiento de agua cruda y residual en la ciudad de Ocaña, Colombia.

En relación con la finalidad del proyecto, el estudio cuenta con un diseño de tres etapas, las cuales cada una consta de fases para el alcance de la finalidad. La primera etapa corresponde a la preparación del coagulante natural de semillas de *M. oleífera*; seguidamente la segunda etapa es determinada para la caracterización fisicoquímica y microbiológica de muestras de agua cruda y residual que revelan las condiciones pre y pos tratamiento, para posteriormente contar con la última etapa que corresponde a la comparación operativa, económica y toxicológica de los dos coagulantes evaluados.

# **Capítulo 1: Evaluación de la eficacia de las semillas de *Moringa oleífera* como agente utilizado en el tratamiento de agua cruda y residual en Ocaña, Colombia.**

## **1.1 Planteamiento del problema**

Buscando nuevas alternativas que ayuden al proceso de descontaminación de aguas, se ha analizado la utilización de diferentes productos químicos, sin importar los efectos negativos en términos socio ambientales que estos pueden ocasionar. No obstante, el uso de estos insumos ha generado falencias económicas, sociales y ambientales que repercuten en el ambiente y la salud humana. Las sales de hierro y de aluminio, son los productos químicos mayormente utilizados como coagulantes en los métodos tradicionales para el tratamiento de agua (Furtado y Vendramini, 2015).

Económicamente, los coagulantes químicos han representado altos costos de adquisición para las empresas prestadoras del servicio de tratamiento de agua. Además, autores señalan que este tipo de insumo presenta la desventaja de generar grandes cantidades de lodo como residuo del proceso de tratamiento, aumentando los costos de operación haciendo necesario la tratabilidad de grandes cantidades de flóculos resultantes; también el sulfato de aluminio requiere un control en la concentración residual en el agua a tratar, debido a que una concentración indeseada en el organismo humano puede ocasionar enfermedades a la población que consume el agua tratada (Nishi, y otros, 2011). Si bien es cierto, el aluminio es utilizado en diferentes procesos y productos tales como la fabricación de medicamentos, antitranspirantes, herramientas de construcción civil, de vehículos, además también es usado como agente coagulante de agua,

donde las partículas suspendidas se agrupan y forman una masa mayor que permita la decantación de las mismas presentes en el agua (Droxaine , 2016).

De acuerdo a European Aluminum Association (2011) el cuerpo humano contiene en promedio entre 35 mg a 50 mg de aluminio natural. Sin embargo, se habla de que solo el 0,1% de aluminio ingerido es absorbido por el tracto digestivo, siendo excretado rápidamente por los riñones, siempre y cuando la persona no presente insuficiencia renal, ya que tendrá dificultad en excretar el metal. Donde se debe tener en cuenta que a pesar de que el cuerpo humano absorbe un porcentaje mínimo del aluminio, existen otros compuestos, como los ácidos cítricos, ascórbicos, laticos y málicos que permiten una mayor absorción del aluminio, originando la formación de compuestos complejos con el metal.

Aunque el Aluminio no es un metal pesado, Solórzano (2014) lo considera como un agente altamente tóxico, porque puede generar diferentes anomalías de tipo neurodegenerativas. Por otra parte, se afirma que el aluminio residual presente en las aguas, tiene una estrecha relación con el Alzheimer (Caldera, Mendoza, Briceño, García, y Fuentes, 2007) y síndromes de demencia y reducción de la capacidad motora y mental (Mas y Rubí, Martínez, Carrasquero, y Vargas, 2011). Ferreira y otros (2008) apoyan esta postura, expresando de que es posible que exista una relación entre el aluminio y las enfermedades neurológicas mencionadas, ya que se realizó un estudio en donde se inyectaba sales de aluminio directamente en el cerebro de conejos, y estos presentaban degeneraciones neurofibrilares semejantes a las de la enfermedad de Alzheimer padecida por el ser humano.

Investigadores en el Reino Unido, encontraron aluminio en el núcleo de las placas seniles, las cuales tienen relación con la enfermedad neurodegenerativa, así mismo en un estudio realizado en Nueva York, se detectó el metal acumulado en las placas seniles y en enmarañamientos neurofibrilares (European Aluminum Association, 2011).

Con el objeto de contextualizar la problemática de estudio, es válido mencionar que Ocaña se encuentra ubicada en el nororiente colombiano, siendo la segunda ciudad del departamento de Norte de Santander con una población no mayor de 120.000 habitantes, y que en la actualidad es una ciudad que cuenta con tres plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) para la prestación del servicio dentro de la zona urbana del municipio, en donde se viene utilizando el sulfato de aluminio para la coagulación en el tratamiento de agua. Además no existe una planta de tratamiento de aguas residuales, existiendo un grave problemática de tipo ambiental y sanitario, ya que este tipo de aguas se vierten a cauces hídricos, produciendo proliferación de vectores, generación de olores ofensivos, entre otros efectos negativos.

Sin embargo, no se ha realizado algún estudio relacionado con la aplicación de las semillas de *Moringa oleífera* para el tratamiento de agua cruda y residual teniendo en cuenta las condiciones ambientales y sociales del municipio de Ocaña. Además, no se cuenta con un estudio de costos que reflejen la factibilidad de utilizar el agente natural, así como conocer si estos agentes generan residuos tóxicos del proceso de tratamiento.

De acuerdo a lo expresado anteriormente, es necesario evaluar agentes alternativos que sustituyan insumos contaminantes empleados como en procesos de tratamiento de aguas, se

evalúa la eficacia que presenta la solución de semillas de *Moringa oleífera*, al aplicarse en procesos de coagulación y floculación de agua cruda y residual como operaciones unitarias pertenecientes al tratamiento, que permita obtener resultados ambientales y socioeconómicos sostenibles y pertinentes a la situación de la ciudad de estudio.

## 1.2 Formulación del problema

En función de la problemática anteriormente expresada, surge el siguiente interrogante de estudio: ¿Qué eficacia operativa, económica y toxicológica puede presentar la solución de semillas de *Moringa oleífera* en comparación con el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , al ser aplicados a procesos de coagulación y floculación en el tratamiento de agua cruda y residual en Ocaña, Colombia?

## 1.3 Objetivos

**1.3.1 Objetivo General.** Evaluar la eficacia operativa, económica y ecotoxicológica de las semillas de *Moringa oleífera* como agente natural en los procesos de tratamiento de agua cruda y residual en Ocaña, Colombia.

**1.3.2 Objetivos Específicos.** Obtener mediante procesos físicos y químicos la solución coagulante de *Moringa oleífera* que será aplicada como agente natural en agua cruda y residual para su posterior evaluación.

Realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica a agua cruda y residual para establecer condiciones operativas pre y pos tratamiento, utilizando solución de *Moringa oleífera* y sulfato de aluminio como coagulantes.

Comparar la eficacia operativa, económica y ecotoxicológica de la solución de *Moringa oleífera* y el sulfato de aluminio, por medio de ensayos de jarras, análisis de costos y bioensayos de toxicidad.

#### **1.4 Justificación**

En diversas investigaciones avaladas por la Organización Mundial de la Salud, se afirman que graves enfermedades se encuentran vinculadas al consumo de agua no potable como la fiebre tifoidea, la salmonelosis, la disentería amebiana y bacilar, la amibiasis y la gastroenteritis, entre otras, las cuales ocasionando la muerte de una niño cada 8 segundos y además generan el 80% del total de las enfermedades y muertes en el desarrollo, situación que es lamentable, debido a que desde hace muchos años se conocen formas para prevenir este tipo de enfermedades (Melo & Turriago, 2012).

Ante tal problemática ha surgido como reto la necesidad de estudiar tecnologías que además de dar solución al problema, sean sostenibles desde diferentes puntos de vista y pertinentes a las condiciones y posibilidades de las comunidades. Una de estas tecnologías, es aquella que reemplace agentes químicos por naturales e inocuos utilizados en procesos de tratamiento de agua, siendo las semillas de *Moringa oleífera*, el agente con poder coagulante

más estudiado a nivel internacional (Lo Mónaco, Matos, Ribeiro, Nascimento y Sarmiento, 2010).

Si bien es cierto, la Moringa es una planta a la que se le atribuye múltiples beneficios por su elevado contenido de proteínas, vitaminas y minerales (Palada y Chang, 2003), se ha venido utilizando para la alimentación animal, usos medicinales por su actividad antimicrobiana, terapéutica, antioxidante, antiinflamatoria, antihipertensiva, asimismo se ha empleado para la alimentación humana y usos como en el tratamiento de aguas (Martín, y otros, 2013), comprendiéndose de que no tan sólo la Moringa posee propiedades coagulantes sino también bactericidas (Folkard y Sutherland, 1996).

Desde el punto de vista operativo, económico y toxicológico, Martín, y otros (2013) afirma que el extracto de semilla de *M. oleífera* representa múltiples beneficios, ya que la dosis de extractos de semilla que se necesitan para el tratamiento de agua es similar a la utilizada de sulfato de aluminio, además no altera el pH ni la conductividad del agua, el lodo producido por la coagulación es inocuo y de menor volumen con relación al coagulante convencional; conjuntamente, el autor afirma que la Moringa es biodegradable y no es toxica, reflejando los extractos de semillas, elevados márgenes de seguridad (Jahn, 1988).

No obstante, Nishi y otros (2011) advirtieron que en la actualidad los productos químicos siguen siendo los más utilizados, sin importar las deficiencias que estos presentan, ya que los costos de adquisición son altos, además se presenta un incremento de costos operativos, por las grandes cantidades de lodos resultantes que se requieren tratar.

El presente estudio es de gran relevancia puesto que evaluó la eficacia de un agente natural de importancia internacional como son las semillas de *M. oleífera*, aplicado a procesos de coagulación y floculación de agua cruda y residual, evaluando que eficaz puede ser desde enfoques operativos, análisis de costos de adquisición y ecotoxicidad, con el fin de que sirva como base sólida para la futura toma de decisiones relacionadas con la implementación y uso de este agente natural dentro de las plantas de tratamiento de agua.

De igual forma, la investigación será un importante referente teórico y metodológico, sirviendo como base científica para futuras investigaciones relacionadas con este tipo de productos naturales, apuntando al estudio de agentes naturales que sean sostenibles, eficaces y que den respuesta a la problemática ambiental de la región, en especial, como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, aplicando procesos de coagulación para estos tipos de aguas, debido a la disponibilidad de las semillas en la región. Es por ello que se hace necesario evaluar la eficacia de la solución de la *M. oleífera* como una alternativa sostenible que sea económicamente viable, ambientalmente amigables y que no genere repercusiones sobre la salud humana. Se espera que el uso de esta alternativa permita obtener el máximo beneficio con la reducción de los impactos negativos que generan los coagulantes convencionales al medio ambiente y la salud humana (Molano, 2011).

## **1.5 Delimitaciones**

**1.5.1 Delimitación operativa.** Para el desarrollo de la presente investigación, se presentaron limitantes en cuanto a la realización de la prueba de jarras y las pruebas

fisicoquímicas y microbiológicas, ya que las primeras fueron realizadas en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la empresa ESPO S.A., y las segundas pruebas en laboratorios académicos de la UFPSO, en donde se desarrollaron bajo tiempos de disponibilidad de área de trabajo y equipos.

Dichas pruebas se gestionaron en las instalaciones de la Empresa de Servicios Públicos de Ocaña, ESPO S.A., debido a que la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña no cuenta con los instrumentos necesarios para tal fin (Véase Apéndice A).

**1.5.2 Delimitación conceptual.** Durante la ejecución del estudio, se abordaron temáticas relacionados con tipos de aguas, procesos unitarios de tratamiento de aguas como coagulación, floculación y decantación, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para agua potable y residual, recolección, preservación de muestras, valores permisibles de tratamiento por la legislación vigente, eficacia de tratamiento, parámetros hidráulicos, carga contaminante, bioensayos de ecotoxicidad y coagulantes naturales.

Desde la eficacia operativa de tratamiento se tuvo en cuenta dos variables, la primera corresponde a la carga final contaminante en cada uno de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluadas en el agua cruda y residual y la segunda atañe al índice de Willcomb como valoración cualitativa de lodos. Para la eficacia económica, en donde se realizó un análisis de costos, se abordaron variables como costos de transporte, costos de producción, disponibilidad en el mercado, entre otros. Mientras que en la evaluación de toxicidad se determinó la toxicidad crónica y elongación de raíz.

**1.5.3 Delimitación geográfica.** El presente proyecto de investigación se desarrolló en la zona urbana y suburbana del municipio de Ocaña, Norte de Santander, específicamente se muestreó el agua cruda y residual en el río Algodonal y el río Tejo respectivamente.

**1.5.4 Delimitación temporal.** Este proyecto en mención, se realizó por un lapso de ocho semanas, como se define en el cronograma de actividades (Apéndice B)

## Capítulo 2: Marco referencial

### 2.1. Marco histórico

El sulfato de aluminio como coagulante en la purificación del agua se utilizaba desde el siglo XIX. En 1880, en una población holandesa, un ingeniero alemán construyó un sistema de sedimentadores para coagulación con sulfato de aluminio como pretratamiento de agua. Y fue así como en el siglo XX se difundió este producto químico como agente coagulante y se incrementó su utilización exponencialmente. La república de Argentina lo utiliza en el tratamiento de agua para el año 1901, 51 años más tarde es empleado en Ecuador y hasta 1955 comenzó a utilizarse en Colombia.

Los coagulantes son agentes de importancia en el tratamiento de aguas, siendo los coagulantes más utilizados el sulfato de aluminio y el cloruro férrico. Ndabigengesere y Narasiah, (1998) advirtieron ciertos efectos negativos en la utilización de coagulantes químicos, tales como la enfermedad de Alzheimer y alteraciones de salud semejantes relacionadas con aluminio residual en aguas tratadas.

Para finales de la década de 1970, se reportaron publicaciones de la remoción de turbidez de agua cruda para el abastecimiento público hasta la caracterización morfológica de las semillas de *Moringa oleífera* en Brasil, Malasia e India (Martins de Paula y Sangoi de Oliveira, 2016).

Diversos autores indican como ventaja del crudo extraído de *Moringa oleífera*, la disminución del volumen de lodo generado después del tratamiento en comparación con la utilización de coagulantes químicos u inorgánicos (Ademiluyi, 2007; Gupta y Chaudhuri, 1992). Según Muyibi y Evison (1995) el crudo extraído de *Moringa oleífera* es capaz de actuar en el ablandamiento de aguas duras, sin tener cambios significativos de pH.

Conforme a estudios realizados por Ndabigengesere, Narasiah, y Talbot (1995), los principales componentes presentes en las semillas de *Moringa oleífera* son las proteínas, los lípidos y los carbohidratos en bajas concentraciones. Teniendo esta planta propiedades eficientes para la aplicación en remoción de cianobacterias, suplemento nutricional, purificación de agua, ración animal, extracción de biodiesel y otros usos, mayormente medicinales.

Las semillas de la planta de *Moringa oleífera*, produce una sustancia soluble en agua que tiene buenas propiedades de coagulación de agua y de residuos. Los mencionados autores estipulan el tratamiento de agua con bajos niveles de turbidez iniciales y determinaron una dosis óptima de coagulante natural, muy cerca de la dosis de sulfato de aluminio, señalando como ventaja para la *Moringa oleífera*, el no ser tóxica y más bien biodegradable, que reduce los residuos pos-tratamiento (Gupta y Chaudhuri, 1992).

Muchos investigadores han emprendido un juego de variables para determinar la mejor eficiencia en la aplicación de las semillas de *Moringa oleífera* para el tratamiento de agua. En el 2010 se publicó un estudio en donde se tuvieron tres formas de preparación del coagulante:

el polvo de semilla fue lanzado directamente sobre el líquido a tratar, semillas trituradas extraídas en agua destilada y semillas trituradas con una extracción por medio de NaCl ( $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ); en donde los autores afirman que el extracto coagulante producido en agua destilada presente una buena capacidad de drenaje de agua libre, considerada la mejor forma para el uso y aplicación (Tat, y otros, 2010).

Mientras que se compararon la remoción de turbidez para el extracto producido en agua destilada y NaCl, determinando que para coagular el 95% de turbidez inicial con valores de 50 NTU será necesario utilizar  $4 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$  de crudo coagulante a base de sal y  $32 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$  del extracto en agua destilada. (Martins de Paula y Sangoi de Oliveira, 2016) En este caso, se afirma que el pH óptimo para que el componente activo de la *Moringa oleífera* tenga una acción coagulante en NaCl debe ser mayor o igual que 8. (Gassenschmidt, Jany, Tauscher, y Niebergall, 2001)

En el 2006, Dorea asegura que la eficiencia de la remoción de turbidez depende de características de la fuente hídrica, la técnica de preparación del coagulante y el tipo de semillas a utilizar. Si bien, las semillas de *Moringa oleífera* han tenido un excelente desempeño en el tratamiento de aguas superficiales o cruda, han demostrado presentar eficacia en el tratamiento de aguas residuales, sean domésticos e industriales.

Para el tratamiento de aguas residuales domésticas, se han efectuado estudios de remoción de turbidez (Lo Mónaco y otros, 2010), de sólidos suspendidos y microorganismos (Ndabigengesere & Narasiah, 1998), obteniendo efectos positivos al final del proceso. Se indago el agente natural de estudio, como coagulante para la clarificación de un efluente de un sistema de lagunas de estabilización de una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas durante

el periodo lluvioso y de sequía, alcanzando una remoción de turbidez de 95,5% y 89,8% respectivamente. (Más y otros, 2011).

También, las semillas de *Moringa oleífera* son prometedoras para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria. Se evaluó aguas residuales generadas en curtiembres, alcanzando una remoción de sólidos suspendidos entre 30 y 37%, así como la remoción de cromo estuvo entre el 38 y 46%. (Song, Williams y Edyvean, 2004). Del mismo modo, se ha comprobado la efectividad del coagulante natural para el tratamiento de efluentes de origen textil. (Santos, Rabelo, & Scrhank, 2007) desarrollaron una investigación en el tratamiento de efluentes textiles con coagulantes naturales, presentando resultados óptimos en cuanto a la remoción de turbidez, pues alcanza un 80% de eficacia. De igual forma los autores comprobaron que la utilización del crudo coagulante, no altera significativamente el pH del agua a tratar.

De acuerdo con Martins de Paula & Sangoi de Oliveira (2016), se ha estudiado la aplicación de la *Moringa oleífera* en el tratamiento de agua para recirculación y utilización en el procesamiento de los frutos de café, basado en el trabajo realizado por Matos, Cabanellas, Cecon, Brasil, & Mudado (2007), afirman que existe una remoción óptima de sólidos suspendidos en con un pH de 4,0 a 5,0 y una dosis de 10 ml. l<sup>-1</sup>. Usando el coagulante natural trataron efluentes de lacticinoso, en donde se alcanzó una eficiencia de remoción de hasta el 98% para color y turbidez, teniendo en cuanto un pH entre 5 a 8 (Vieira, y otros, 2010). Mientras que la *Moringa* es considerada como una alternativa viable para el tratamiento de efluentes lácteos, removiendo el 92% y el 91% de color y turbidez respectivamente (Pisano, y otros, 2015).

Las semillas de Moringa también presenta gran capacidad de biosorción de herbicidas como glifosato e diurón (Aparecida dos Santos, 2014). Presentando un buen desempeño en la biosorción del cadmio, cromo y otros metales pesados presentes en el agua.

## **2.2 Marco contextual**

El agua es un elemento que acondiciona el desarrollo de los países, debido a que es un recurso inapreciable para el desarrollo de actividades agrícolas, industriales, de conservación y medio ambiente y salud humana. Y es así que la OMS declara que “la relación entre el agua y la salud pública está directa e indirectamente vinculada con factores como la cantidad, calidad de agua y tamaño de la población”, haciendo hincapié en que cada persona debe contar con 2 litros de agua por día, para poder cubrir sus procesos fisiológicos (Min Ambiente, 2012).

La situación en cuanto a saneamiento básico y acceso a agua potable ha sido una temática preocupante durante muchos años. Según (Pro familia, 2010), existe un paralelo abismal entre el sector rural y urbano en cuanto al saneamiento ambiental; Se estima que tan solo el 17% de las viviendas rurales tienen acceso a agua potable, frente al 91% de las viviendas pertenecientes al sector urbano; mientras que el 92% de las viviendas en la zona urbana cuentan con conexión a alcantarillado en comparación con el 22% de las viviendas ubicada en la olvidada zona rural colombiana.

Ocaña ubicada en el nororiente colombiano, siendo la segunda ciudad del Departamento de Norte de Santander cuenta con una población que asciende a los 100.000 habitantes de acuerdo a estimaciones realizadas por el censo en el año 2005. Se encuentra ubicada a 8° 14'15" latitud

Norte y 73° 2'26" longitud Oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 1.202 m, la temperatura promedio es de 22° C, un área superficial de 463 km<sup>2</sup>, los cuales representan el 2.2% del departamento (Alcaldía Municipal de Ocaña, 2010). La ciudad de Ocaña cuenta con 3 acueductos, la Empresa de Servicios Públicos (ESPO S.A.), el acueducto Independiente La Esmeralda y la Asociación de Amigos y Usuarios del Acueducto Independiente (ADAMIUIAN).

El Área de Desarrollo Rural de la Secretaría de Desarrollo Humano afirma que existe una baja cobertura del abastecimiento de agua potable para el sector rural, debido a que los acueductos existentes se encuentran ubicados en el casco urbano. Hasta el año 2011 se contaba con 13 acueductos en veredas, de los cuales pocos distribuían agua apta para consumo humano. (Concejo Municipal de Ocaña, 2012).

Por otra parte, en el 2011 el Sistema único de Información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios afirma que la cobertura en servicios del sistema de alcantarillado es del 91.40%, es decir, se presta el servicio a 23.962 viviendas que vierten un caudal de 150.65 l/s de agua residual. La mayor parte del sistema alcantarillado es combinado de aguas domiciliarias pluviales, lo cual dificulta un eventual tratamiento por incremento de caudal.

En la actualidad, Ocaña no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas servidas, existiendo como único mecanismo de disposición final los vertimientos de aguas negras, sin previo tratamiento, causando contaminación y deterioro en las cuencas de los ríos Algodonal, Tejo, Chiquito, de Oro y algunas quebradas afluentes de dichos ríos. Asimismo, en la prestación del servicio de alcantarillado por parte de ADAMIUIAN, el alcantarillado es de tipo sanitario y

las aguas residuales se vierten directamente al río Tejo, de acuerdo al Análisis de la situación en Salud de la Alcaldía Municipal de Ocaña. (Concejo Municipal de Ocaña, 2012).

Conjuntamente, en el Plan de Desarrollo de Ocaña 2012-2015, se expresa que la problemática hídrica que se viene presentando en el municipio es alarmante. Se señala que existe un alto porcentaje de ocañeros residentes en el sector rural que están consumiendo aguas contaminadas con subproductos de actividades agropecuarias, agroquímicos, residuos sólidos, vertimientos industriales y aguas servidas de origen doméstico (Concejo Municipal de Ocaña, 2012).

El Informe del estado de los recursos naturales y del ambiente del departamento Norte de Santander emitido por la (Contraloría General del departamento Norte de Santander, 2013), el municipio de Ocaña, con 24.336 usuarios de alcantarillado vierte un caudal promedio de aguas residuales de 123 l/seg a través de veintiuno puntos de vertimientos a la fuente receptora conocida como Río Tejo.

Es un gran caudal de aguas residuales que se vierten a un afluente sin su previo tratamiento, pues el municipio actualmente no cuenta con una PTAR, pese a la serie de proyectos que ha venido adelantando las administraciones municipales, en cuanto al mejoramiento del sistema de alcantarillado.

### **2.3 Marco conceptual**

**Agua potable.** Es aquella que por reunir requisitos físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas por la normatividad vigente, al ser consumida por población humana no produce efectos adversos a su salud.

**Agua residual.** Agua que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria.

**Bioensayos de ecotoxicidad.** Son definidos como aquellas herramientas de diagnóstico para determinar el efecto de agentes físicos y químicos sobre organismos de prueba bajo condiciones experimentales específicas y controladas. Estos mismos proporcionan información para la evaluación ecológica de los efectos que generan los contaminantes tóxicos, por medio de los estudios con organismos en laboratorio bajo condiciones controladas. (Moscoso, 2014)

**Coagulación.** Aglutinación de las partículas suspendidas y coloides presentes en el agua mediante la adición de coagulantes.

**Coagulantes.** Sustancias que inducen el aglutinamiento de las partículas muy finas, ocasionando la formación de partículas más grandes y pesadas. Existen dos grandes tipos de coagulantes: metálicos y polímeros.

Dentro de los coagulantes metálicos, existen tres tipos: Sales de aluminio como el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y aluminato de sodio; sales de hierro como el cloruro férrico, sulfato férrico y el sulfato ferroso; y compuestos varios, entre ellos, se puede hacer mención del carbonato de magnesio.

Ahora bien, los polímeros se pueden encontrar los inorgánicos estando los polímeros de hierro (III) y aluminio. Los polímeros orgánicos están compuesto de sustancias naturales y poli electrólitos sintéticos. Entre los compuestos naturales está el almidón y derivados de la celulosa, material proteico y sustancias compuestas de polisacáridos. Asimismo, existen floculantes orgánicos extraídos de algas marinas, extraídos de la papa, yuca y extractos de semillas de plantas (Vargas y Romero, 2006).

**Eficacia de tratamiento.** Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje.

**Muestra compuesta.** Mezcla de varias muestras alícuotas instantáneas recolectadas en el mismo punto de muestreo en diferentes tiempos. La mezcla se hace sin tener en cuenta el caudal en el momento de la toma.

**Sedimentación.** Se entiende como la eliminación por efectos de gravedad de las partículas suspendidas en un fluido, para que esto suceda las partículas deberán tener un mayor peso específico que el fluido.

## 2.4 Marco teórico

### 2.4.1 Sustancias sólidas presentes en aguas crudas naturales

Según Barrenechea (2005), el agua puede contener una variedad de impurezas solubles e insolubles. Como tipo de impurezas insolubles se puede encontrar las partículas coloidales,

sustancias húmicas y carga microbiológica. En la gran mayoría de los coloides presentan una carga superficial negativa, el cual actúan como barrera para la coagulación y precipitación de los mismos. Es por ello que se hace necesario la adición de electrolíticos que permitan procesos de coagulación y floculación.

En cuerpos hídricos normalmente se encuentra dos tipos de sólidos clasificados según su tamaño: Los primeros son los sólidos mayores de 0.01 mm son denominados sólidos sedimentables, los cual se precipitan rápidamente, transportados por la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua y su remoción se efectúan por medio de un proceso físico de sedimentación. Los segundos son los sólidos no sedimentables, menores de 0.01 mm, los cuales se subdividen en sólidos coloidales y sólidos disueltos.

Los sólidos coloidales se consideran partículas dinámicas, resultado del proceso continuo de erosión y la precipitación; consisten en limo fino y otras partículas provocados de color, los cuales no sedimentan sino después de tiempos muy prolongados, su efecto se muestra en el color y la turbidez de aguas. Ahora bien, los sólidos disueltos son sustancias inorgánicas (aniones y cationes) y sustancias orgánicas (como alcoholes, ácidos, etc.) que generan efectos de olor, color, sabor y eventualmente alteraciones a la salud (Barrenechea, 2005).

Los coloides se clasifican en hidrofóbicos (adversos al agua) e hidrófilicos (afines al agua). Los primeros no reaccionan con el agua, a diferencia de los segundos, que presentan una reacción con las moléculas de agua, produciendo en su mayoría, el color en el agua. El conocimiento de esta clasificación en el tratamiento del agua es que los coloides hidrófilicos pueden reaccionar químicamente con el coagulante usado en el proceso de tratamiento. De esta

forma, los coloides hidrófilicos requieren mayor cantidad de coagulantes que los hidrofóbicos, que no reaccionan químicamente con el coagulante. A manera de ejemplo, para eliminar el color en agua que tiene un color APHA de 50 se requiere dosis mayores de coagulantes necesarias para la eliminación de una turbidez de 50 UTN.

#### **2.4.2 Fuerzas coloidales**

Barrenechea (2005) establece que para definir un sistema coloidal es necesario determinar la naturaleza y magnitud de la carga de la partícula. La magnitud de carga de la partícula, determina lo cerca que pueden aproximarse los coloides. El Potencial Zeta es una medida de esta fuerza.

Para coloides en fuentes de agua cruda con un pH de 5 a 8, el potencial zeta se encuentra entre 14 y 30 mili voltios; cuanto más negativo sea el número, tanto mayor será la carga de la partícula. A medida que disminuye el potencial zeta, las partículas pueden aproximarse cada vez más aumentando la posibilidad de una colisión. Se argumenta que, en un sistema convencional de clarificación con un pH comprendido en un rango de 6 a 8 valores, los coagulantes proporcionan las cargas positivas para reducir la magnitud del potencial zeta (Barrenechea, 2005).

El autor menciona que la coagulación se presenta de ordinario a un potencial zeta que es aun levemente negativo, de manera que por lo general no se requiere que la carga sea neutralizada por completo. Por consiguiente, si se adiciona demasiado coagulante, la superficie de la partícula se cargará positivamente (un potencial zeta positivo), y la partícula volverá a disiparse.

El potencial zeta se determina indirectamente de los datos obtenidos al observar en el microscopio los movimientos de las partículas. Las medidas de potencial zeta se han empleado con éxito para controlar las dosis de coagulantes en las plantas de tratamiento. Sin embargo, las lecturas del potencial zeta por sí solas no son confiables para seleccionar el mejor coagulante. Los resultados obtenidos en la prueba de jarra continúan siendo los mejores para seleccionar el coagulante.

Además, de la aplicación del coagulante se requiere del mezclado para destruir la estabilidad del sistema coloidal. Para que las partículas se aglomeran debe existir un choque entre ellas, y el mezclado promueve la colisión. El movimiento browniano, el movimiento caótico comunicado a las partículas pequeñas al ser bombardeadas por moléculas individuales de agua, está siempre presente esta fuerza mezcladora natural. Sin embargo, casi siempre es necesaria energía adicional de mezclado. Un mezclado de gran intensidad, que distribuya al coagulante y promueva colisiones rápidas, haciéndolo efectivo.

También son importantes en la coagulación la frecuencia y el número de colisiones entre las partículas. En agua de baja turbidez, puede requerirse la adición de sólidos, como la arcilla, o el mezclado de sólidos asentados para aumentar el número de colisiones entre las partículas (Barrenechea, 2005).

### **2.4.3 Coagulación.**

Según Vargas (2015), la coagulación consiste en adicionar al agua una sustancia que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover, lo que

neutralizar la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso.

Asimismo, se define como el proceso por el cual una suspensión coloidal se convierte inestable por medio de las adiciones de sustancias coagulantes para someterla a sedimentación gravitacional (Muñoz, García y Muñoz, 2005).

#### **2.4.4 Floculación**

Es un proceso unitario usado para reducir las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar sólidos de mayor tamaño. La agitación del agua a baja velocidad (mezcla lenta) provoca colisiones entre las partículas. Ello induce la adsorción entre partículas, consolidando flóculos que deben adquirir un tamaño y peso específico suficiente para precipitar y facilitar su remoción mediante sedimentación y filtración.

Conforme como lo plantea Molano (2011), la coagulación y floculación son procesos de mezcla. Su diferencia radica en la velocidad con que actúan. La energía aplicada en dichos procesos, podrá efectuarse por medios hidráulicos, mecánicos o neumáticos.

#### **2.4.5. *Moringa oleífera.***

Se reporta el origen de esta especie vegetal en Agra y Oudh en la región noroeste de la India, al sur del Himalaya, noreste de India, Pakistán, Bangladesh y Afganistán. No obstante, en el 1920 se introdujo en América Latina y Centroamérica como una especie arbórea ornamental (Reyes, 2004). La tabla 1 se expresa la clasificación científica de esta especie.

**Tabla 1**Clasificación científica de *Moringa oleífera*

Taxón	
Reino	Plantae
Sin clasificar	Eudicots
Sin clasificar	Rosids
Orden	Brassicales
Familia	Moringaceae
Género	Moringa
Especie	M. Oleífera
Nombre binomial	<i>Moringa oleífera lam</i>

**Nota.** Fuente: (Melo & Turriago, 2012).

Desde la mirada de la botánica, *Moringa oleífera Lam* es un árbol de la familia *Moringaceae* que crece en ambientales tropicales y alcanza de 7 a 12 m de altura y un diámetro entre 20 a 40 cm, con un fuste normalmente recto (Molano, 2011).



**Figura 1.** Vista general del árbol de *Moringa oleífera*. Fuente: (Molano, 2011).

Asimismo, presenta características particulares en su morfología. Presenta hojas compuestas, es decir, que el limbo foliar se encuentra dividido en folíolos o pinnas, de igual forma las hojas son de una longitud de 30 a 70 cm. De acuerdo con Molano (2011), la *Moringa*

posee flores pentámeras que alcanzan tamaños de un cm de largo y dos cm de ancho con una coloración de blanco amarillentas.

Los frutos son vainas de sección triangular, de color pardo, aproximadamente con una longitud de 35 a 45 cm y un ancho de 2 a 2.5 cm. Estas alcanzan su madurez después de los 3 meses de la floración. La figura 2 muestra las frutas del árbol de *Moringa oleífera*, comúnmente conocida como vainas, las cuales contienen en promedio 20 semillas.



**Figura 2.** Frutos de *Moringa oleífera*. Fuente: (Molano, 2011)

De acuerdo con Ndabigengesere, Subba Narasiah, & Talbot (1995), las semillas contienen aceite comestible y una sustancia soluble en agua. Guzmán, Villabona, Tejada y García (2013), refieren a Ghebremichael et al. (2005), los cuales afirman que el agente coagulante es una proteína catiónica con una masa molecular menor de 6,5 kDa, respaldados por (Ndabigengesere y otros, 1995), el cual exponen que el agente activo es una proteína catiónica dimérica y que presenta como principal mecanismo de coagulación la adsorción y la neutralización de carga. Según, Bezerra, Momenté, y Medeiros (2004) las semillas de *Moringa oleífera* presentan los constituyentes químicos pterigospermina y ramnosil-oxibenzil-isotiocianato que tiene acción antimicrobiana sobre *Mycobacterium phei*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Serratia*

*maarcenses*, *Pseudomonas aeruginosas*, *Shigela* y *Streptococcus*. Además, el efecto antimicrobiano de las semillas de Moringa toma más peso, gracias al trabajo realizado por (Silva, Souza, Florencio, & Suzana, 2015), en donde las concentraciones de coliformes termotolerantes antes de utilizar el crudo de la semilla fue de 2500 UFC/100ml y se redujo a 1500 UFC/100ml. (Martín C. M., 2013) Expresa que en un investigación realizada en Kenia, se demostró el potencial antimicrobiano de extractos de semillas de *M. oleífera* sobre la bacteria *Salmonella typhii*, *Vibrio cholerae*, *E. coli* causantes de la fiebre tifoidea, el cólera y la gastroenteritis, respectivamente.

#### **2.4.6 Ecotoxicología, batería de ensayos y pruebas de toxicidad**

La Ecotoxicología es la ciencia que estudia la contaminación, su origen y efectos sobre los seres vivos y sus ecosistemas. La ecotoxicología valora como una sustancia que puede presentarse como tóxica para un determinado ambiente, interactúa con su ecosistema, considera la dinámica y efectos sobre los organismos que lo conforman, teniendo en cuenta a la dosis, periodo de exposición a la misma y su evolución.

Es por ello que se hace necesario, la implementación de ensayos que permitan determinar los efectos de los contaminantes en un medio específico, a través de la valoración de sus posibles interacciones en organismos de prueba, cuyos resultados, sean extrapolables a situaciones reales.

Ahora bien, la batería de ensayos son aquellas combinaciones de diversos ensayos de toxicidad con diferentes organismos. Se realizan ensayos con diferentes organismos de

prueba para obtener una determinación cuidadosa y ajustada de la toxicidad, ya que los organismos responden de diferentes formas a los tóxicos a los que son expuestos.

**Bioensayos en peces.** Los peces son considerados como los organismos de prueba idóneos para la determinación de ensayos de toxicidad, debido a que están en el nivel más alto de la cadena trófica (Castillo, 2004). De acuerdo con el CEPIS, (2001) los peces al ser fuente importante de alimento para el ser humano, se convierten en un componente importante dentro de un estudio toxicológico.

Dentro de la batería de ensayos de ecotoxicidad para la presente investigación, se utilizó el microgusano *Panagrellus redivivus*, el cual es nematodo de vida libre, que también es conocido como gusano de avena. Son gusanos no segmentados, de color blanco o transparente con un ancho menor de 1.5 mm y 15 veces más largo de su ancho presentando movimiento continuo. Debido a su tamaño y forma, son parte de la dieta de peces pequeños. Se reproducen sexualmente y presentan altas tasas reproductivas, son ovovivíparos y su ciclo de vida tiene una duración entre 20 a 25 días (Luna, 2009).

**Bioensayo de germinación de semillas.** Estas son pruebas valiosas para la evaluación del efecto de los tóxicos en el fomento o retraimiento del desarrollo y surgimiento radicular en la semilla a diferentes concentraciones del tóxico. De forma general, las pruebas de toxicidad en semillas, revelan información acerca de los posibles efectos de los tóxicos y contaminantes en las comunidades vegetales cercanas a las márgenes de cuerpos de agua contaminados.

Por otra parte, los residuos como lodos resultantes del tratamiento de aguas afectan a las plantas, generando alteraciones en el ecosistema, como puede ser una baja de oxígeno, un decremento en la producción primaria y un incremento de la erosión del suelo. Es recomendable realizar bioensayos con plantas de importancia comercial y rápido crecimiento, de tal forma que se determinó el uso de la semilla de la lechuga romana (*Lactuca sativa*) al cumplir con estas características y estar estandarizada como semilla de prueba (Sarabia, s.f).

**2.4.7 Parámetros del impacto ambiental por toxicidad.** Para la determinación de la toxicidad de una mezcla compleja de sustancias químicas, se realizan pruebas toxicológicas, las que a su vez suministran parámetros como CL50, CE50, NOEC, LOEC y TOEC, a partir de los cuales permiten establecer las Unidades de toxicidad (UT) en cuerpos de aguas y vertimientos. Es por ello que se hace necesario conocer la definición de los parámetros, para así obtener las unidades de toxicidad y seguidamente índices y demás factores que permitan la evaluación de impacto ambiental (CEPIS, 2001).

**Concentración Letal media, CL50.** Se define como aquella concentración a la cual el 50% de los organismos de prueba son muertos, durante un periodo específico de exposición (24, 48 a 96 normalmente).

**Concentración efectiva o de inhibición media, CE50.** Concentración de efecto, a la que se produce una reducción del 50% en alguna medida del impacto crónico, durante un periodo de exposición específico, que puede ser el ciclo de vida de los organismos de prueba (meses o un periodo mayor).

**NOEC:** Concentración en la que no se observa efecto. Es la concentración mayor de tóxico a la que no se producirá ningún efecto negativo, aun cuando la exposición sea continua.

**LOEC:** Concentración más baja de la sustancia tóxica a la cual se observa efecto sobre el organismo de prueba, en las condiciones y tiempos establecidos.

**TOEC:** Concentración umbral a la cual se observa efecto (media geométrica del NOEC y LOEC).

## **2.5 Marco legal**

### **2.5.1 Constitución Política de Colombia de 1991**

Se relacionan el articulado más representativo que estipula concepciones de protección y cuidado del medio ambiente emanado por la Constitución Política de Colombia de 1991.

El artículo 79, declara que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Además, se estipula que el Estado planificará el manejo y aprovechamientos de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Conjuntamente,

deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

### **2.5.2 Leyes**

**Ley 99 de 1993.** Se establece que la política ambiental colombiana.

**Ley 142 de 1994.** Por el cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios de acueductos, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía pública básica conmutada y el teléfono local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos.

### **2.5.3 Decretos**

**Decreto 2811 de 1974.** Es dictado por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Se considera al ambiente como patrimonio común. El estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. El código tiene por objeto: lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables.

**Decreto 1575 de 2007.** Por el cual se establece el Sistema para la protección y control de la calidad del Agua para consumo humano.

**Decreto 1594 de 1984.** El Ministerio de Salud, Ministerio de agricultura, por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1879, así como el Capítulo II del título II de la parte II Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a asuntos a usos del aguas y residuos líquidos.

**Decreto 475 de 1998.** Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable.

**Decreto 3440 de 2004.** En el artículo 3, se hace referencia al cobro de la Tasa Retributiva, enunciando que las Autoridades Ambientales Competentes cobrarán la tasa retributiva por los vertimientos puntuales realizados a los cuerpos de agua en el área de su jurisdicción, de acuerdo a los Planes de Ordenamiento del Recurso establecidos en el decreto 1594 de 1984 o en aquellas normas que lo modifique o sustituyan.

**Decreto 3939 del 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 del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

#### **2.5.4 Resoluciones**

**Resolución 2115 de 2007.** Por medio del cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del Sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

**Resolución 1096 de 2000.** Por el cual se adopta el reglamento técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS.

**Resolución 0631 de 2015.** Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial y al sistema de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

### **2.5.5 Normas Técnicas Colombianas**

**NTC-ISO 5667-10.** Fue ratificada por el Consejo Directivo de 1995-06-21. Esta norma por su origen, puede producirse por ICONTEC, ente privado que realiza y revisa las Normas Técnicas Colombianas. La norma contiene detalles sobre muestreo de aguas residuales domésticas e industriales; es decir, el diseño de programas y técnicas de muestreo para la recolección de muestras.

**GTC 31 Gestión ambiental de agua.** Esta norma técnica colombiana realizada por el ICONTEC fue ratificada por el Consejo Directivo 1996-11-27. En donde esta guía describe el método para detectar y determinar el efecto agudo en organismos, ante la presencia de sustancia tóxicas o mezcla de ellas, contenidas en las aguas naturales o residuales y permite obtener el límite de cantidad máxima que pueden soportar los organismos, conocida como Concentración letal media.

**NTC 3903.** El uso de coagulantes para el tratamiento de aguas en el territorio nacional, está reglamentado por medio de los protocolos NTC y/o AWWA (American Water Works Association) Organización internacional de educación científica y la sociedad dedicada a la mejor calidad del agua potable y suministro. Para el uso de los polímeros orgánicos e inorgánicos debe obtenerse la dosis adecuada y las condiciones óptimas de operación mediante ensayos de jarras y en planta (Norma Técnica Colombiana 3903).

**CONPES 3177 de 2002.** Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales. Somete a consideración del CONPES las acciones prioritarias y los lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PMAR) con el fin de promover el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico de la Nación.

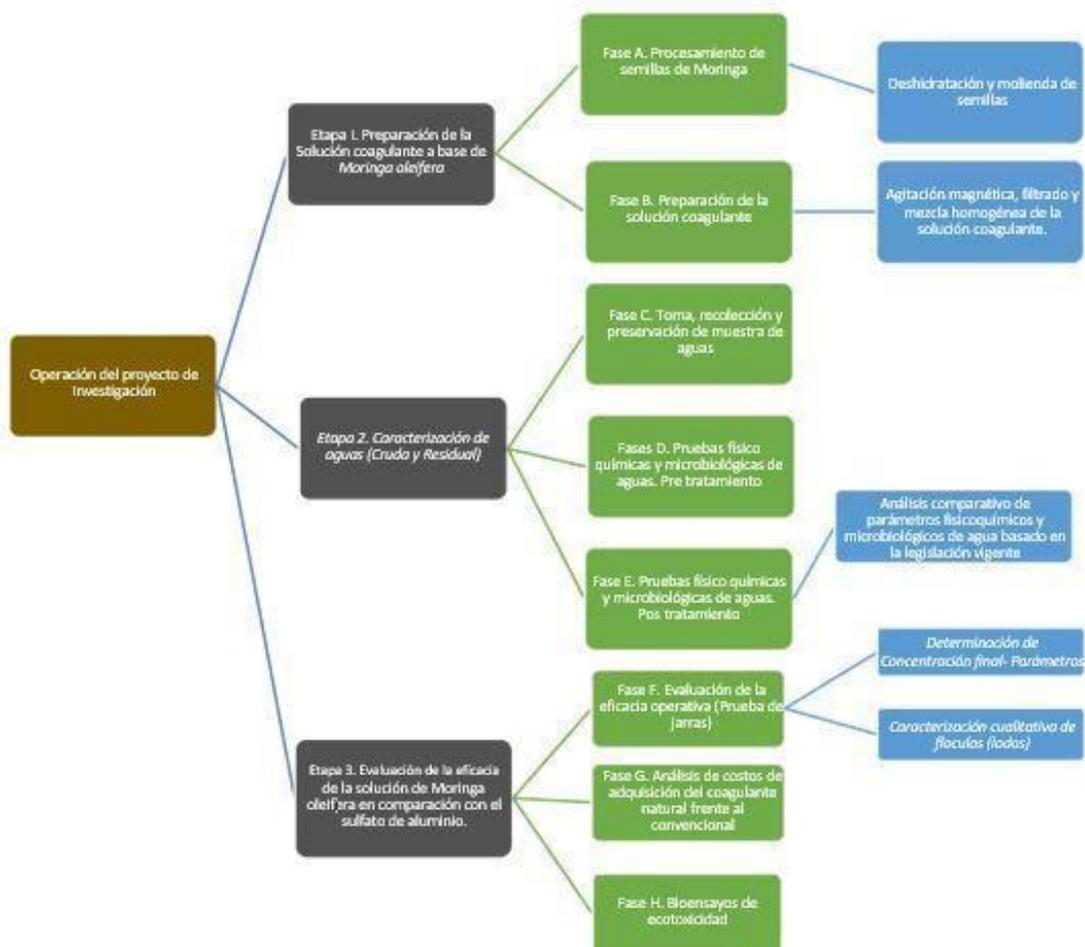
## Capítulo 3: Diseño metodológico

### 3.1. Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación evaluativa, debido que se tiene como propósito, considerar la eficacia de la solución de la semilla de *Moringa oleífera*, en cuanto al cumplimiento de objetivos operativos, económicos y ambientales como agente natural aplicado a procesos de tratamiento de aguas en comparación con el sulfato de aluminio (Hurtado, 2000). Cabe resaltar que este tipo de investigación permite evaluar la eficacia del agente desde otros puntos diferentes al estudio operativo, puesto que se estudió desde perspectivas económicas y toxicológicas, ampliando la perspectiva en cuanto a la aplicación o no de este agente en el proceso unitario de gran importancia como lo es la coagulación.

De acuerdo a las consideraciones metodológicas de Hurtado (2000), la investigación contó con un diseño experimental, puesto que se manipuló las variables independientes como tipos de agua, tipos de coagulantes y dosis de coagulantes, y además se utilizaron procedimientos adicionales como la caracterización cualitativa de lodos y el análisis comparativo de costos, entre otros aspectos (Hernández, Fernández, & Baptista, 1991).

No obstante, debido a la necesidad de puntualizar el flujo procesos que se tendrán durante el desarrollo de la investigación, se cuenta con un diseño de la operación para el alcance de objetivos como lo muestra la figura 3, la cual consta de tres etapas y sus respectivas fases (las cuales serán ampliadas en las técnicas e instrumentos de recolección de información).



**Figura 3.** Secuencias de etapas, fases y flujo de operaciones del proyecto. Fuente: Autor (2017)

### 3.2. Población

Para la presente investigación se contó con una población que corresponde a dos cuerpos hídricos de la ciudad de Ocaña, río Algodonal y río Tejo, En el primero se tomaron muestras de agua cruda de procedencia superficial para tratamiento y al segundo cuerpo hídrico se muestrearon aguas de tipo residual.

### 3.3. Muestra

Para la toma de muestras de agua cruda y residual, se han definido los sitios de muestreo que se relacionan en la tabla 2.

**Tabla 2**

Identificación de lugares de muestreo

<b>TIPO DE AGUA</b>	<b>FUENTE HÍDRICA</b>	<b>PUNTO DE MUESTREO</b>	<b>COORDENADAS</b>
CRUDA	RÍO ALGODONAL	CAPTACION PTAP ALGODONAL – ESPO S.A.	8° 14'3 93" N 73° 19' 16"
RESIDUAL	RÍO TEJO	PUENTE PRIMERO DE MAYO	8°15'1.51"N 73°21'29.34"O

**Nota.** En la tabla se relaciona los dos tipos de agua a muestrear, así como las fuentes hídricas en las que se extraerán las muestras, especificando específicamente el punto exacto por coordenadas. Fuente: Autor (2017)

Se obtuvo una muestra compuesta de agua cruda y otra de agua residual, utilizando el método de muestreo manual. El procedimiento de la toma, recolección y preservación de muestras, rótulos, transporte al laboratorio, recipientes para las muestras, cantidad y parámetro mínimos de la calidad del agua se basó en la sección II, título E, capítulo E3 del RAS 2000 (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000).

Durante el proceso de toma y análisis de muestra, se pretendió evitar que se presenten confusiones o errores de identificación, es por ello que se diseñó una etiqueta, como se observa en la figura 4. Además, de la etiqueta de cada muestra, se hace necesario llevar la bitácora de

campo, con el fin de complementar y/o generar una trazabilidad de la toma de la muestra hasta su respectivo análisis.

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b> <b>FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE</b> <b>INGENIERIA AMBIENTAL</b> "Evaluación de la eficacia del crudo de <i>Moringa oleifera</i> como agente natural en el tratamiento de agua cruda y residual en la ciudad de Ocaña"	
	<b>MUESTRA DE AGUA PARA ANALISIS</b>	
Tipo de Agua: Potable ___ Residual ___	N° de la muestra:	
Tipo de muestra:	Estado Pretratamiento ___ Pos-tratamiento ___	
Fecha	Hora:	
Tomado por :	Sitio de muestreo:	
Tipo de análisis:		
Observaciones:		

**Figura 4.** Diseño del etiquetado para muestras de aguas. Fuente: Autor (2017)

En la bitácora de campo se tuvieron en cuenta datos como matriz de la muestra, tipo de muestra, número de la muestra, fecha y hora, nombre de quien toma la muestra, sitio de muestreo, tipo de análisis a realizar, etiquetados de muestras, observaciones, adiciones a la muestra para preservación de la misma, volumen de muestra recogida y parámetros realizado in situ (Temperatura, pH, conductividad, turbidez, etc.).

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información

De acuerdo como se expresa en la figura 3, el estudio fue diseñado en tres grandes etapas que consta de fases, siendo las fases, un conjunto de procesos y actividades desarrolladas para el alcance de los objetivos.

**Primera etapa.** *Preparación de la solución coagulante.* En esta incluye dos fases progresivas, la fase A y B. La Fase A comprendió el procesamiento de la semilla de *Moringa oleífera*. Inicialmente se hizo un proceso de deshidratación de las semillas de *Moringa oleífera* por calentamiento a 105°C durante 12 horas, seguidamente se procedió a moler y separar los residuos de cáscara de las semillas para la obtención de la harina de Moringa, actividades desarrolladas en el Laboratorio de Nutrición de la universidad.

La Fase B, correspondió a la preparación de la solución coagulante de *Moringa Oleífera*, en la cual se utilizó 25 g de la harina de la semilla (obtenido en la fase A) como soluto y 1 litro de agua destilada como disolvente, que fueron llevados a la plancha de calentamiento con agitador magnético por 30 minutos con el fin de obtener la solución coagulante, posteriormente se dejó sedimentar durante 1 hora y se filtró por medio de un embudo de vidrio y papel filtro, la solución preparada se envasó en un recipiente de color ámbar, el cual fue rotulado (Molano, 2011).

**Segunda etapa.** Concierno a la *caracterización fisicoquímica y microbiológica* de agua cruda y residual, y está compuesta por tres fases (C, D y E). De manera general en esta etapa se desarrolló bajo un diseño pretest – postest (Hurtado, 2000), en donde se le hicieron análisis fisicoquímico y microbiológico a muestras de agua cruda y residual, antes y después de la aplicación de las soluciones coagulantes.

Durante la Fase C, se abordó actividades como la toma, recolección, preservación y cadena de custodia, entre otros aspectos acerca de las muestras de agua cruda y residual, que

fueron tomadas en los lugares de muestreo que ilustra la tabla 2 (río Algodonal y río Tejo), y posteriormente fueron transportadas desde su lugar de muestreo hasta el Laboratorio de Aguas y Laboratorio de Biología, ubicados en la sede Algodonal de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en donde fueron recibidas por el personal encargado de análisis.

Consecutivamente en la Fase D, se realizaron pruebas fisicoquímicas y microbiológicas a muestras de agua cruda y residual en los laboratorios anteriormente mencionados con el fin de establecer las condiciones previas a la aplicación del agente coagulante de Moringa y el sulfato de aluminio en los dos tipos de agua. Las pruebas se realizaron de acuerdo como lo establece los Métodos Estándar (AHPA, 2005).

Para el caso de las muestras de agua cruda de origen superficial, se evaluaron los parámetros que instruye la tabla 3, teniendo en cuenta la capacidad operativa con que cuentan los laboratorios y la legislación vigente que, para este caso en particular, se recurre a la resolución 2115 del año 2007, la cual señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano en Colombia.

**Tabla 3**

Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua para consumo humano

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE
<b>FÍSICAS</b>		
COLOR APARENTE	UPC	15
TURBIEDAD	UNT	2
CONDUCTIVIDAD	100 $\mu$ SIEMENS/cm	1000

**Tabla 3. Continuación**

pH	UNIDADES DE pH	6,5 -9,0
<b>QUIMICAS</b>		
NITRITOS	mg/l NO <sub>2</sub>	0.1
NITRATOS	mg/l NO <sub>3</sub>	10
ALUMINIO	mg/l Al <sup>+3</sup>	0.2
DUREZA TOTAL	mg/l CaCO <sub>3</sub>	300
SULFATOS	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250
FOSFATOS	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.5
HIERRO TOTAL	Fe	0.3
<b>MICROBIOLOGICAS</b>		
COLIFORMES TOTALES	UFC / 100 cm <sup>3</sup>	0 microorganismo * 100 cm <sup>3</sup>

**Nota.** En la tabla se tuvo en cuenta parámetros que se contaba con disponibilidad operativa para análisis. Parámetros como COT, Fluoruros, Calcio, Alcalinidad Total, Cloruros y Magnesio se encuentran contemplados dentro de la resolución 2115/2007, pero para el presente estudio no serán tenidos en cuenta. Fuente: Res.2115/2007.

Para el caso de agua residual, se evaluó los parámetros que muestra la tabla 4, con base en el capítulo V del artículo 8 de la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, el cual expone los parámetros fisicoquímicos y sus valores permisibles en los vertimientos puntuales de aguas superficiales domésticas (ARD) y aguas residuales no domésticas (ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales

**Tabla 4**

Parámetros y valores límites máximos permisibles para aguas residuales

PARAMETRO	UNIDAD DE	
	MEDIDA	V.L.M.P.
pH	UNIDADES DE pH	6,00 a 9,00
DQO	mg/l O <sub>2</sub>	180,00
DBO <sub>5</sub>	mg/l O <sub>2</sub>	90,00
SST	mg/l	90,00
SSED	mg/l	5,00
NITRATOS	mg/l	ANÁLISIS Y REPORTE
NITRITOS	mg/l	ANÁLISIS Y REPORTE
NITRÓGENO AMONIACAL	mg/l	ANÁLISIS Y REPORTE
COLIFORMES TOTALES	NMP/100MI	ANÁLISIS Y REPORTE

**Nota.** De acuerdo al articulado 6 de la resolución 0631 de 2015, se analiza los coliformes termotolerantes (coliformes totales y *E. Coli*) de agua residual si la carga másica antes del tratamiento es mayor a 125 kg/día de DBO<sub>5</sub>. Aunque en la resolución, se contemplan otros parámetros a medir como SAAS, Fósforo Total y Nitrógeno Total, *E. coli*, grasas y aceites, estos no se tendrán en cuenta para la investigación por delimitación operativa del laboratorio de Aguas. La sigla V.L.M.P. significa Valor límite máximo permisible. Fuente: Resolución 0631 de 2015.

De igual manera, se diseñó la Fase E, que corresponde a la caracterización fisicoquímica y microbiológica (post-test) de muestras de agua de la jarra óptima resultante del ensayo de jarras para establecer condiciones pos tratamiento y definir cuál es la concentración final de cada parámetro evaluado después de la aplicación de los dos tipos de coagulantes (solución de *M.*

*oleífera* y sulfato de aluminio). Para los análisis microbiológicos se desarrolló por la técnica de tubos múltiples, bajo la serie de 3 diluciones.

**Tercera etapa.** *Evaluación de la eficacia operativa, económica y ecotoxicológica.* Esta etapa final está comprendida por tres fases. La Fase F corresponde a la evaluación de la eficacia operativa de las dos soluciones coagulantes (solución de Moringa – sulfato de aluminio) aplicadas a los dos tipos de agua. En esta fase se aplicó la técnica de ensayo de jarras, que fue efectuada bajo las condiciones que expresa la tabla 5. Durante esta técnica se tuvo en cuenta el parámetro de turbidez como variable de respuesta.

**Tabla 5**

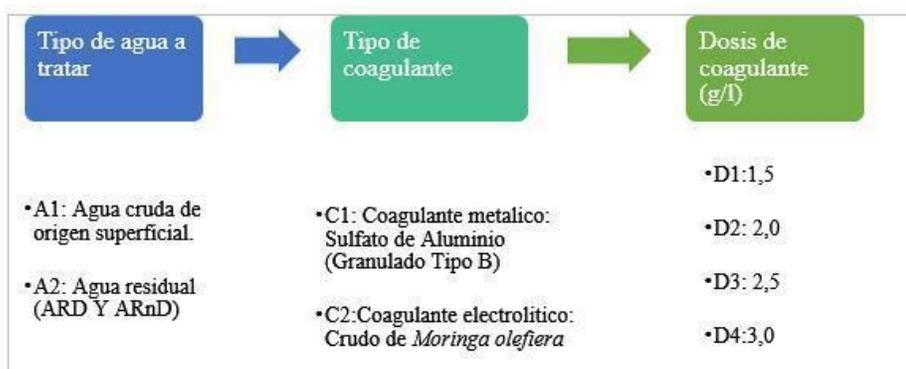
Parámetros de condiciones normales para ensayos de jarras

Parámetros	Unidades	Valor
Concentración de coagulante	Mg/l	25
Volumen de agua c/ jarra	l	1000
Gradiente de velocidad de mezcla rápida	Rpm	100
Gradiente de velocidad de mezcla lenta	Rpm	40
Tiempo de agitación de mezcla lenta	Min	20
Periodo de decantación	Min	30

**Nota:** Factores de importancia para la ejecución de pruebas de jarras. Fuente: Autor (2017)

Asimismo, en esta fase se definió como *variable dependiente* la concentración final de parámetros evaluados, (se habla de concentración final ya que la Resolución 0631 de 2015 modifica el concepto de “porcentaje de remoción” en el tratamiento por “concentración final”), utilizando la solución coagulante de semillas de *Moringa oleífera* frente al sulfato de aluminio.

Sin embargo, se tuvo en cuenta el porcentaje de remoción en cada parámetro para evaluar el efecto que las soluciones tienen en cada parámetro. En la figura 5, se precisan las variables independientes y sus valores.



**Figura 5.** Variables independientes y sus respectivos valores. Fuente: Autor (2017)

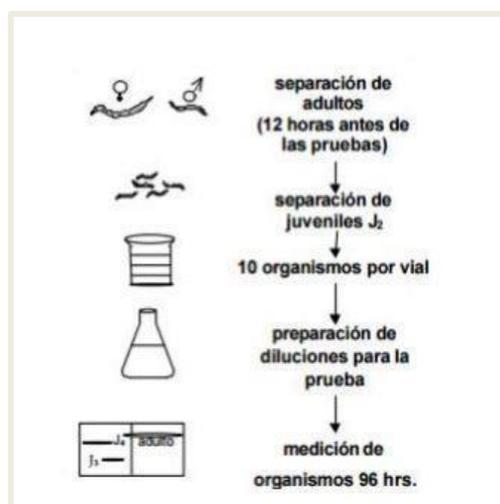
Posteriormente, se evaluó las condiciones pos tratamiento o caracterización fisicoquímica y microbiológica de la muestra o jarra óptima, (Fase E de la etapa 2), para determinar la concentración final (y porcentaje de remoción, para conocer la eficacia operativa en el proceso de tratamiento) de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos. También para la evaluación operativa se tuvo en cuenta uno de los productos resultantes del proceso de prueba de jarras, comúnmente conocido como floculo; el cual se determinó por medio de la observación (método cualitativo) aspectos relacionados con los flóculos resultantes, determinando el Índice de Willcomb, realizándose una evaluación cualitativa de floculación.

En la Fase G, se realizó un análisis de costos, con el objeto de conocer que implica la adquisición del crudo de *Moringa oleifera* en comparación con el sulfato de aluminio, teniendo en cuenta el resultado de la dosis necesaria para tener la concentración final contaminante más baja en los dos tipos de agua.

Para el análisis de costos, se precisaron costos de materiales, costos de transporte, costos de procesamiento y conservación del producto, disponibilidad de materiales en la región, entre otros aspectos a comparar.

Finalmente, la Fase H corresponde a la realización de bioensayos ecotoxicológicos de flóculos generados en los ensayos de jarras, estudiando cuatro (4) tipos de flóculos (lodo) resultantes, La batería de bioensayos estuvo comprendida por dos tipos de pruebas: toxicidad aguda y crónica. Se preparó soluciones madres para las 5 concentraciones como 0.3, 0.7, 1.0, 1.3, 1.7 ppm. Cada prueba de la batería de ensayo, constó de 5 concentraciones más de un blanco para las cuatro muestras y de la réplica de estos ensayos.

La prueba de toxicidad crónica se realizó utilizando los nematodos de la especie *Panagrellus redivivus*, el cual es nematodo ovovivíparo, que viven en los sedimentos de agua dulce, El bioensayo de toxicidad crónica con el nematodo mencionado consistió en monitorear la población de 5 organismos, por un periodo de 96 horas con la finalidad de observar los efectos letales (reducción del número de individuos en la población) de la muestra prueba, en comparación con la población control (Figura 6).



**Figura 6.** Diagrama esquemático de la Prueba de toxicidad crónica con *P. redivivus*. Fuente: (Sarabia, s.f.)

Para la prueba de toxicidad por inhibición de germinación se utilizó semillas de *Lactuca sativa* como semilla de prueba, se trabajó con las mismas concentraciones descritas anterior en la prueba de toxicidad crónica en alícuotas de 2 ml, estas se agregaron al papel filtro previamente colocando sobre cajas Petri, con la finalidad de que humedecieron completamente. Seguidamente, se colocaron 20 semillas por caja. Consecutivamente se tapó las cajas y se llevaron a una incubadora húmeda a temperatura ambiente por 120 horas (Figura 7).



**Figura 7.** Diagrama esquemático de la prueba de toxicidad aguda. Fuente: (Sarabia, s.f)

### 3.5. Procesamiento y análisis de la información

Para el procesamiento y análisis de la información, se analizó los datos obtenidos y se comparó la eficacia operativa, económica y toxicológica de las semillas de *Moringa oleífera* aplicada a procesos de tratamiento de agua comparada con el sulfato de aluminio, teniendo en cuenta que el presente estudio es una investigación evaluativa (Hurtado, 2000).

En cuanto al procesamiento de la información para la evaluación operativa, se tuvo en cuenta el análisis comparativo entre los resultados pretratamiento y pos tratamiento para cada parámetro fisicoquímico y microbiológico evaluado en cada tipo de agua y coagulantes utilizado, confrontado los valores obtenidos con los límites máximos permisibles como lo establece la legislación colombiana vigente que regula materia. Y finalmente, se evaluó la carga final de cada parámetro que se obtuvo en los tipos de aguas utilizando la solución de *M. oleífera* y el sulfato de aluminio. También, en la evaluación operativa se realizó un estudio acerca de la floculación, analizando los flóculos resultantes del proceso de pruebas de jarras, teniéndose como criterio de evaluación cualitativo, el Índice de Willcomb.

Para determinar concentraciones de tipo letal por medio de pruebas de toxicidad, se tuvo en cuenta los parámetros descritos por CEPIS (2001) como  $CL_{50}$ ,  $CE_{50}$ , NOEC, LOEC y TOEC. El método utilizado para determinar la  $CL_{50}$  fue el método paramétrico Probit, desarrollándose una regresión típica de tolerancias. El software utilizado para los análisis estadísticos fue la interfaz de Microsoft Excel.

## Capítulo 4: Resultados

### 4.1. Preparación de la solución coagulante de semillas de *Moringa oleífera*.

Para la preparación de la solución natural como agente coagulante del agua, fue necesario el paso de las semillas de *Moringa oleífera* por procesos como deshidratación, molienda, mezclado y filtrado de las semillas. Las semillas de Moringa utilizadas cuentan con una pureza del 95% y un rango de 60 a 70% de germinación, bajo un proceso de selección de acuerdo a la marca comercial adquirida.

Se deshidrató las semillas a temperatura de 105 °C durante 24 horas, para posterior molienda como se observa en la figura 8. Se obtuvo una harina de color café, que fue empacada en recipientes de aluminio para evitar cualquier contaminación.



**Figura 8.** Molido de semillas de *Moringa oleífera*. Fuente: Autor (2017).

Se procedió a llevar 25 g harina de Moringa y 1000 ml de agua destilada, a la plancha de calentamiento a 200°C durante 30 minutos, en donde se agito de manera continua, para asegurar una dilución completa, formándose una solución espesa con trazas de grasas. Cabe resaltar, que

la solución presenta este tipo de trazas debido a que para el presente estudio no se realizó el proceso de extracción de aceites. La solución resultante se dejó sedimentar durante 60 minutos para facilitar el proceso de filtrado, que se realizó utilizando un embudo de vidrio y papel filtro. Finalmente, la solución fue envasada en un recipiente de color ámbar, con el fin de proteger la solución de la luz, el cual puede provocar ciertas reacciones como la oxidación de compuestos. De igual forma, la solución se mantuvo refrigerada a 4 °C para su aplicación como coagulante natural en las pruebas de jarras (Véase figura 9).



**Figura 9.** Solución de *M. oleifera*. Fuente: Autor (2017)

#### **4.2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua cruda y residual para establecer condiciones pre y pos tratamiento.**

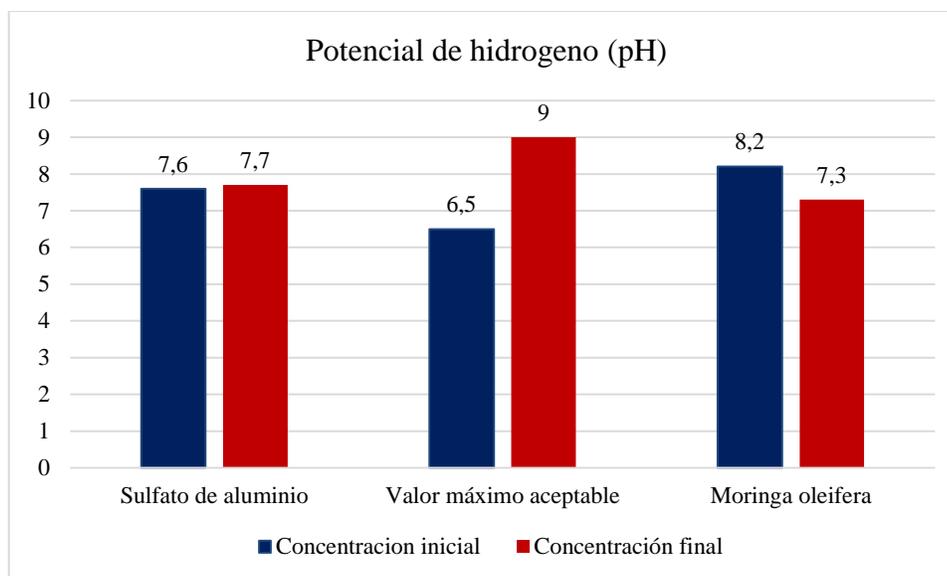
El análisis de la caracterización fisicoquímica de agua que se basó en los resultados entregados por el Laboratorio de Aguas de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. En el Apéndice C muestra todos los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas de agua

cruda y residual en condiciones pre y pos tratamiento. En el análisis se tuvo en cuenta las concentraciones iniciales y finales para cada parámetro, se evaluó de acuerdo con el valor límite permisible por la legislación vigente. Cabe destacar que por limitaciones operativas en el laboratorio, los muestreos se realizaron en días diferentes y por ello se obtuvo concentraciones iniciales distintas al momento de comparar fisicoquímicamente el efecto de cada coagulante.

**4.2.1 Caracterización fisicoquímica de agua cruda.** De acuerdo a la resolución 2115 de 2007 y a la limitación operativa de los laboratorios, los análisis evaluados fueron pH, color, turbiedad, conductividad, nitritos, nitratos, aluminio, dureza total, sulfatos e hierro.

**Potencial de Hidrógeno.** De acuerdo con Zhen (2009), el pH expresa el contenido de iones de hidrógeno en medio acuoso, afirmando que en aguas no contaminadas presenta un rango entre 6.5 a 8.5, rango similar como lo establece la resolución normativa. Como se observa en la figura 11, en la muestra de agua cruda, el sulfato de aluminio generó un aumento leve en el pH de 7.6 a 7.7, mientras que la Moringa generó una disminución de pH en el agua pasando de 8.2 a 7.3. Los resultados en cuanto a pH, son permitidos por la normativa vigente, presentándose un pH óptimo para el consumo humano.

No obstante, como lo pudo demostrar Gómez (2016) se puede evidenciar que los valores no sobrepasan el rango máximo permisible por la normativa que comprende un pH de 6.5 a 9. La reducción del pH por parte de la Moringa también fue evidenciada en un estudio en la ciudad de Pasto, Colombia, en donde la jarra optima presentó un valor inicial de 7.94 y presentó un valor final de 7.1 con la utilización de la Moringa.

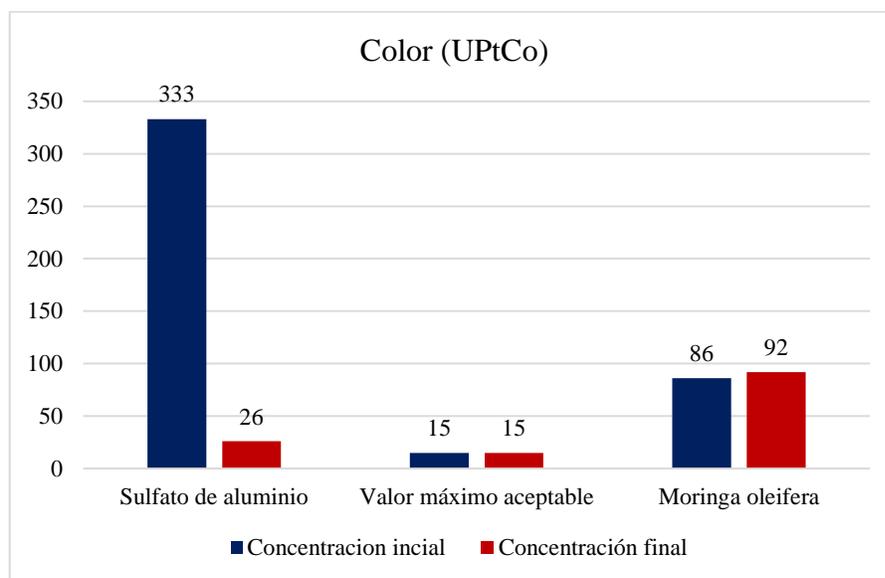


**Figura 10.** Análisis de pH en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Color aparente.** Se hace referencia que este tipo de color se debe a la presencia de sustancias disueltas en el agua de origen orgánico coloreadas o de minerales (Zhen, 2009), en dónde Pérez (2010), hace referencia a esas sustancias disueltas a los ácidos húmicos, ácidos grasos, fúlvicos, taninos, lignina, además de óxidos de hierro, zinc y manganeso, a excretas de organismos vivos, y a algas verdes o verde azules. El color aparente se mide en unidades de platino cobalto (UPtCo), basado en 1 mg/l de Pt.

Ahora bien, se puede determinar que el sulfato de aluminio en el agua produjo una reducción de color aparente bastante considerable, pues de 333 unidades disminuyó a 26 unidades, contrario al efecto producido por la Moringa que generó un aumento de color de 86 a 92 UPtCo, lo cual permite determinar que ninguno de los dos coagulantes tienen la reducción de color máximo permisible de color aparente por la normatividad (15 UPtCo) como se observa en

la figura 11. En comparación a los resultado obtenidos por Sandoval y Linares (2013), la solución de Moringa si presenta una reducción de color de 46.6 a 23.75 UPtCo.



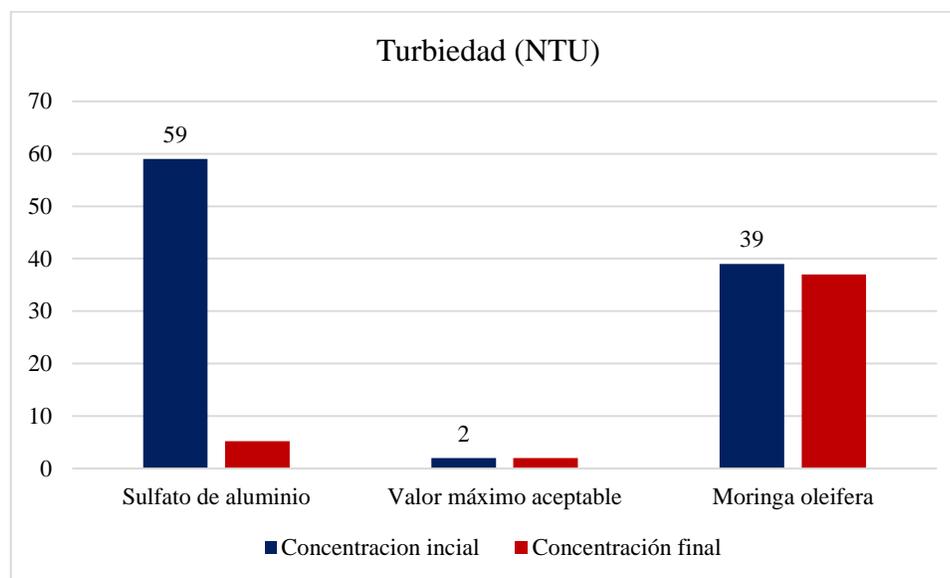
**Figura 11.** Análisis de color en muestra agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Figura 11.** Análisis de color en muestra agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Turbiedad.** Como propiedad óptica que tiene una muestra de agua de absorber o reflejar un haz de luz, impidiendo su paso directamente, Pérez (2010) expresa que la turbiedad es originada por partículas en suspensión o coloides como arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton, minerales y otros microorganismos. El agua muestreada en el río Algodonal presenta turbiedades relativamente bajas como se puede evidenciar en la figura 12.

De igual forma, en la figura 12 se puede observar que la solución de semillas de *Moringa oleifera* presentó una reducción de turbiedad en el agua de 39 NTU a 37 NTU, mientras que el sulfato de aluminio como redujo la turbiedad de 59 UNT a 5.2 NTU, teniendo una concentración

final más cercana al valor máximo permisible por la resolución que contempla una turbiedad máxima de 2 NTU.

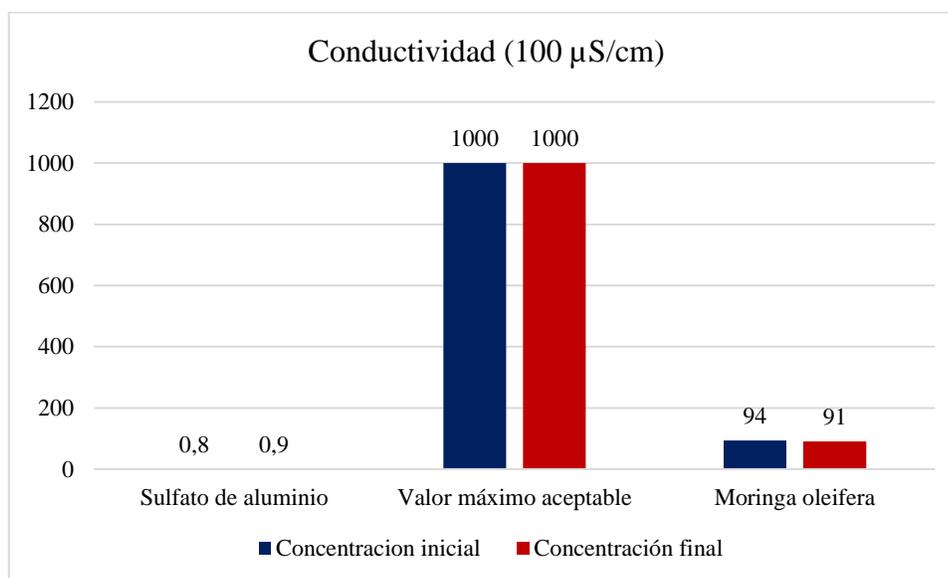


**Figura 12.** Análisis de turbiedad en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Conductividad eléctrica.** Este parámetro se expresa en unidades de microsiemen por centímetro y expresa la actividad eléctrica que generan los iones en una soluciones acuosas. Según el IDEAM (2006), las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos conducen la corriente a muy alta escala, contrarias a las moléculas orgánicas al no dissociarse en el agua. Por otra parte, se concibe que la conductividad es un indicador de alguna filtración o descarga de aguas geotérmicas en cuerpos de agua superficiales (Zhen, 2009).

Los valores obtenidos por las pruebas fisicoquímicas de conductividad son muy bajos en cuanto a lo exigido por la normativa, pero se puede observar una relación inversa entre el efecto producido por el sulfato de aluminio y la *Moringa oleífera* en referencia a la conductividad eléctrica. La *Moringa oleífera* genera una reducción leve de la conductividad de 94 a 91  $\mu\text{S}/\text{cm}$

mientras que el sulfato de aluminio generó un pequeño aumento en la conductividad de 0,8 a 0,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  como lo ilustra la figura 13. Contrariamente, en un estudio se obtuvo el aumento de la conductividad eléctrica en muestras de aguas superficial utilizando sulfato de aluminio y *Moringa oleífera*, en donde la conductividad inicial fue de 336  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y con sulfato de aluminio aumentó a 367  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mientras que con *Moringa oleífera* aumentó a 385  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



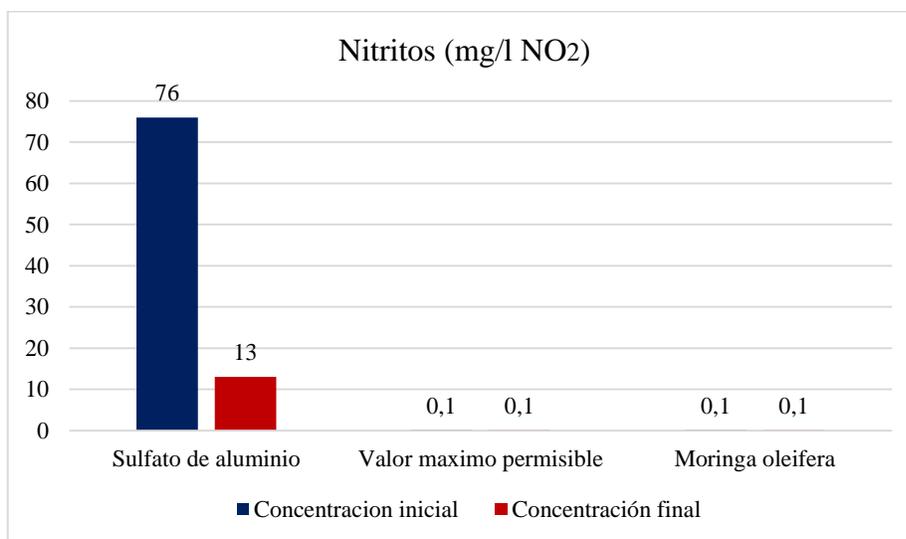
**Figura 13.** Análisis de conductividad en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Nitritos.** Se afirma que el nitrito aparece como un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco y el nitrato (Pérez, 2010). La presencia de nitritos en el agua indica contaminación de origen fecal reciente. Los nitritos en concentraciones elevadas reaccionan dentro el organismo con amidas y aminas secundarias y terciaras, dando como resultados la nitrosaminas de alto poder cancerígeno y tóxico (Rodríguez, 2001).

En la figura 14, se ilustra el comportamiento que presentó el sulfato de aluminio y la *Moringa oleífera* en relación con los nitritos. El sulfato de aluminio generó una reducción de

nitritos bastante considerable, puesto que inicialmente se presentó en la muestra de agua 76 mg/l de nitritos y este se redujo a 13 mg/l. En cambio, la solución de *Moringa oleífera* no generó ninguna reducción en los nitritos, pues la concentración inicial y final fueron las mismas, presentándose una concentración de 0.1 mg/l de nitritos.

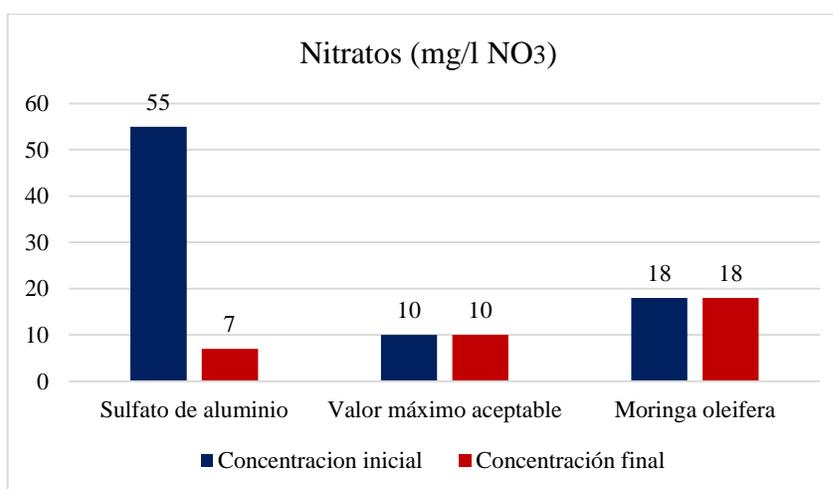
No obstante, Rodríguez (2001), afirma que el nivel de nitritos en aguas superficiales bien oxigenadas, no suele superar 0.1 mg/l, y cuando supera el valor, producirá toxicidad en el ecosistema fluvial. Asimismo, el autor cita el estudio de Albert (1990), Gray (1996) y Prat et al. (1999), los cuales afirmaron que de manera general, la concentración de nitritos en el agua superficial es muy baja, pero por ocasiones se puede presentar concentraciones altas de forma inesperadamente como resultado de la contaminación industrial y de aguas residuales domésticas (Rodríguez, 2001).



**Figura 14.** Análisis de nitritos en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

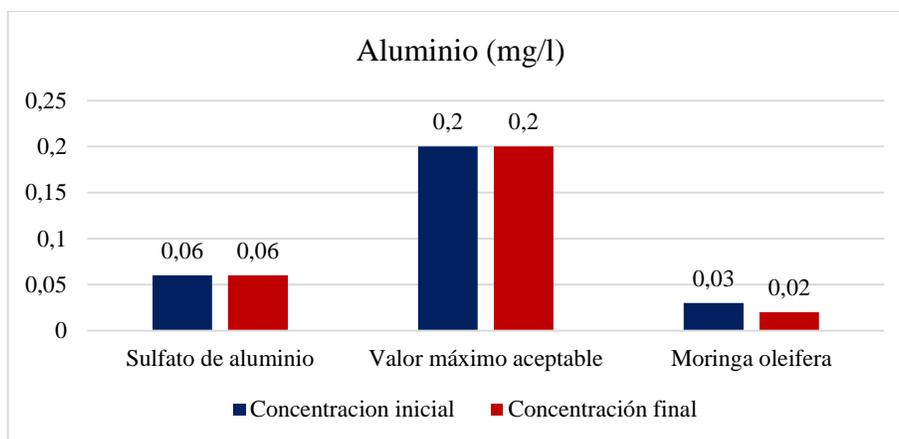
**Nitratos.** La presencia de nitratos en el agua se derivan principalmente por la contaminación por fertilizantes nitrogenados, excretas de animales, descargas de desechos sanitarios e industriales así como del uso como aditivos alimentarios (Cdaguas, 2006).

El sulfato de aluminio generó una disminución en la concentración de nitratos de 55 mg/l a 7 mg/l; alcanzando una concentración final por debajo del valor máximo permisible. En contraste con el sulfato de aluminio, la *M. oleífera* no produjo algún efecto en la concentración de los nitratos como se observa en la figura 15.



**Figura 15.** Análisis de nitratos en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

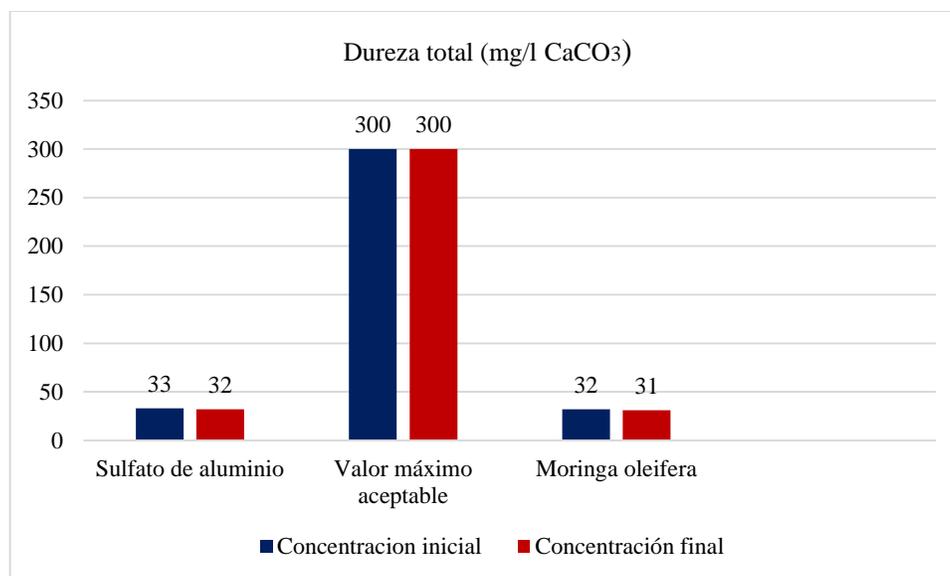
**Aluminio.** El aluminio en las muestras de agua cruda se encuentra por debajo del valor límite máximo permisible que corresponde a 0.2 mg/l. En la figura 16, se observa que el sulfato de aluminio no generó algún incremento o disminución del parámetro evaluado, a diferencia de la *M. oleífera* que redujo de una concentración de 0,03 mg/l a 0,02 mg/l de aluminio, metal de gran importancia toxicológica.



**Figura 16.** Análisis de Aluminio en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017)

**Dureza total.** Esta es definida como la suma de las concentraciones de los iones de calcio y magnesio en una muestra de agua. La relevancia de las aguas duras se debe a que impiden la formación de espumas cuando se utilizaban jabones en base de grasas o aceites, ocasionando un mayor consumo de agentes y una menor limpieza, además de los problemas de incrustaciones en las tuberías y en el equipamiento, creando inconvenientes a nivel industrial y doméstico (Pérez, 2010).

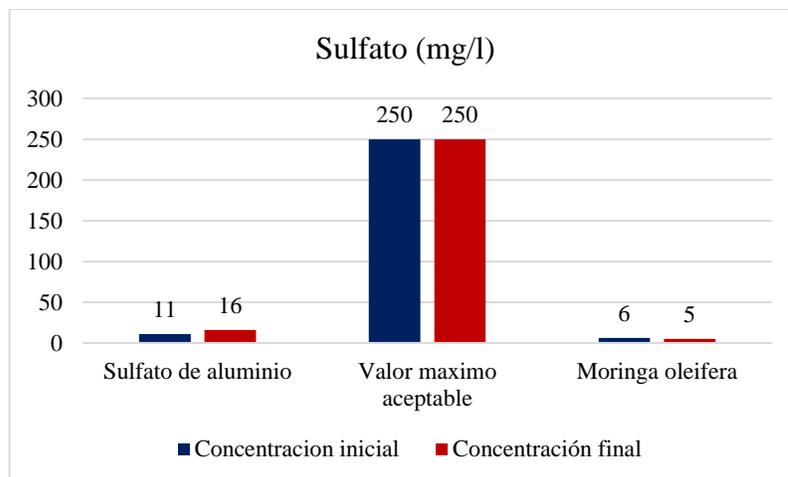
El sulfato de aluminio redujo la dureza de 33 mg/l a 32 mg/l, comportamiento similar presento la *M. oleífera*, en donde disminuyó de 32 a 31 mg/l, generando un efecto leve sobre los iones de Calcio y Magnesio. No obstante, en la figura 17 se observa que en las muestras de agua, las concentraciones de durezas son bajas en relación con el valor máximo permisible que corresponde a 300 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ .



**Figura 17.** Análisis de dureza total en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017).

Contrario a los resultados obtenidos por la presente investigación, Martín y otros (2013) demostraron que las semillas de *M. Oleífera* tienen una gran capacidad de eliminar iones de calcio, magnesio y otros cationes divalentes, reduciendo entre un 60 y 70 % de la dureza del agua después del proceso de coagulación seguida de 2 horas de sedimentación.

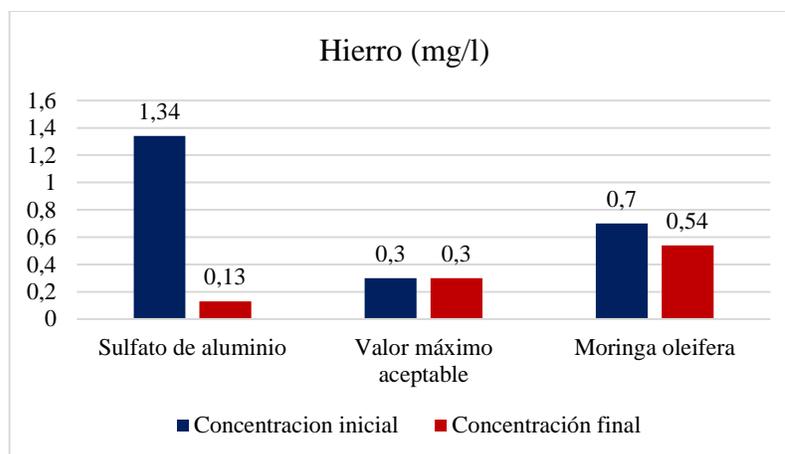
**Sulfatos.** Su presencia en cuerpos de agua se debe a la oxidación del SO<sub>2</sub> atmosférico o proveniente de desechos industriales, se afirma que en la mayoría de las aguas dulces la concentración de sulfatos es muy baja en comparación con las aguas geotérmicas de origen subterráneo (Zhen, 2009). Lo anteriormente expresado, coincide con la figura 18, el cual muestra que se presentaron bajas concentraciones de sulfatos en las muestras de agua superficial. Por otra parte, se observa una relación inversa entre el sulfato de aluminio y la *Moringa oleífera*, en donde el sulfato de aluminio genero un aumento de 5 mg/l de sulfatos, mientras que las semillas de *M. oleífera* generaron una baja reducción de sulfatos de 6 a 5 mg/l.



**Figura 18.** Análisis de sulfatos en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017).

**Hierro total.** Se afirma que los óxidos del hierro abundan en la naturaleza en forma de minerales y como parte constituyente de las arcillas y limos. Las formas oxidadas de hierro son insolubles en agua y las formas reducidas son solubles. Teniendo en cuenta lo anterior, se habla de hierro total, porque en el agua puede estar presente el hierro tanto en suspensión como en dilución en una muestra de agua

La resolución 2115 de 2007, establece como valor máximo permisible para concentración de hierro total en agua potable para consumo humano de 0.3 mg/l. El sulfato de aluminio como coagulante metálico generó una reducción de hierro bastante considerable, teniendo como concentración inicial de 1.34 mg/l, disminuyó a 0.13 mg/l como concentración final. De igual forma, se observa un efecto reductor de hierro por medio de la *Moringa oleífera*, pasando de 0.7 mg/l a 0.54 mg/l. A pesar del efecto reductor demostrado, el coagulante natural no alcanzó una concentración final acorde con el nivel permisible a diferencia del coagulante convencional que está por debajo del valor de hierro establecido como lo muestra la figura 19.



**Figura 19.** Análisis de hierro en muestra de agua cruda. Fuente: Autor (2017).

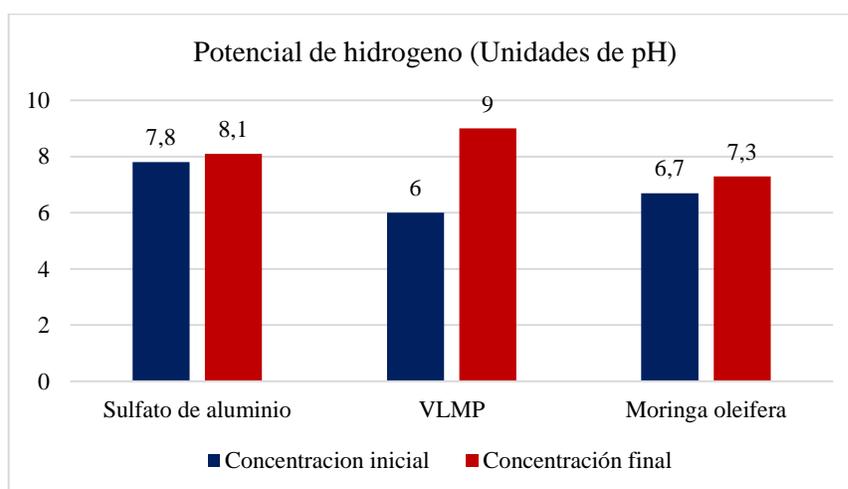
**4.2.2 Caracterización fisicoquímica de agua residual.** Se practicaron pruebas fisicoquímicas para conocer condiciones pre y pos tratamiento (proceso pruebas de jarras) a muestras compuestas de agua residual, utilizando la solución coagulante de *Moringa oleífera* y el sulfato de aluminio en donde se evaluó pH, DQO, DBO5, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal. La normativa referente a aguas residuales es la resolución 0631 de 2015.

**pH.** El potencial de hidrógeno en las muestras compuestas de agua residual evaluadas fue incrementado por los dos coagulantes de estudio, manteniéndose en el rango límite máximo permisible que establece la normativa que corresponde de 6 a 9 unidades de pH.

Como se observa en la figura 20, el sulfato de aluminio generó un leve incremento de pH de 7.8 a 8.1 unidades a diferencia del aumento producido por la solución de *Moringa oleífera* que con concentración inicial de 6.7 generó una concentración final de 7.3 unidades.

Un comportamiento similar de incremento de pH se presentó en un estudio en donde se comparó el efecto de la *Moringa oleífera* y el sulfato de aluminio para el tratamiento de aguas residuales resultantes del proceso de beneficio de café.

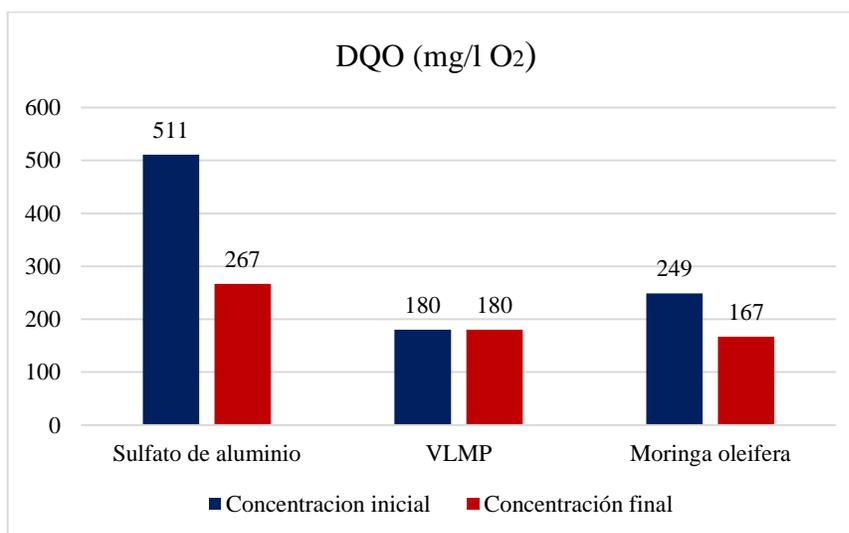
Se presentó un pH de entrada considerablemente ácido, teniendo una concentración inicial de 3.75 unidades, el cual fue incrementado por el efecto de la Moringa llegando a 4.6 unidades, mientras que el sulfato de aluminio aportó un aumento de pH a 4.14 unidades (Mera, Guitiérrez, Rojas, y Concha, 2016).



**Figura 20.** Análisis de pH en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**DQO.** La demanda química de oxígeno equivale a la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. La DBO se diferencia de la DQO, en que la DBO solo detecta el material orgánico degradado biológicamente, mientras que en la determinación de la DQO, todo el material orgánico biodegradable o no, es químicamente oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido en la presencia de un catalizador (Oocities, 2009).

Los dos coagulantes evaluados produjeron una notable remoción de la DQO, en donde el sulfato de aluminio disminuyó la concentración de 511 a 267 mg/l de O<sub>2</sub> y la *Moringa oleífera* removió de 249 a 167 mg/l de O<sub>2</sub>, obteniendo un valor por debajo del valor límite máximo permisible que corresponde a 180 mg/l de O<sub>2</sub> como se observa en la figura 21. No obstante, se puede apreciar que el coagulante natural de *M. oleífera* no generó ni un 50% de remoción, a diferencia del estudio realizado en Cuba, en donde se empleó las semillas de *Moringa oleífera* en el tratamientos de líquidos residuales, el cual obtuvieron una remoción superior del 90% de la DQO con una dosis de coagulante de 60 a 70 mg/l (Rondón, y otros, 2017).

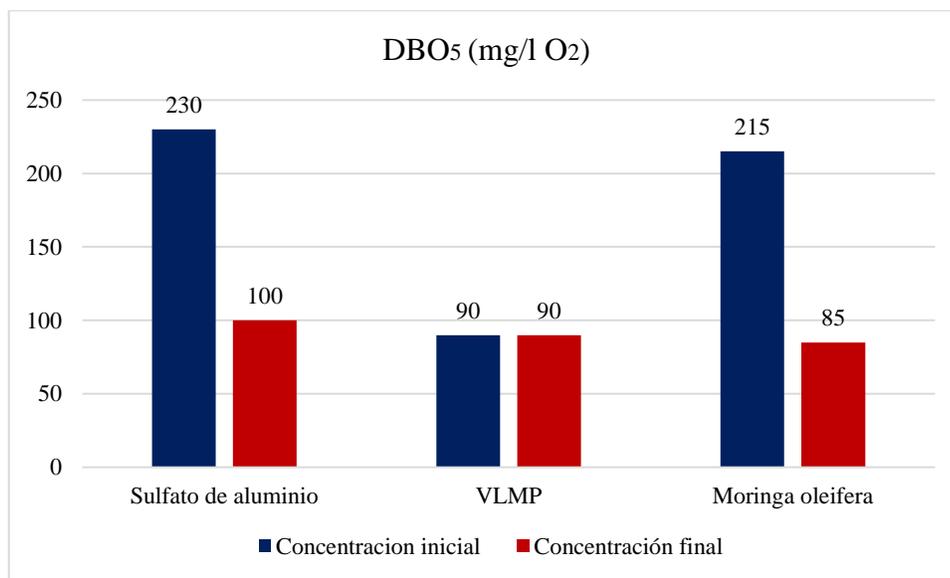


**Figura 21.** Análisis de DQO en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**DBO<sub>5</sub>.** La demanda bioquímica de oxígeno “corresponde a la cantidad de oxígeno consumido para la degradación de la materia orgánica, durante 5 días a 20°C” (Sánchez y Vélez, 2016).

Como se puede observar en la figura 22, los coagulantes estudiados generaron una remoción de 130 mg/l O<sub>2</sub> cada uno. El sulfato de aluminio generó una reducción de 230 a 100

mg/l O<sub>2</sub>, mientras que la *Moringa oleífera* disminuyó la DBO de 215 a 85 mg/l O<sub>2</sub>. Sin embargo, se puede observar la concentración final producida por el coagulante natural se encuentra por debajo del valor límite máximo permisible para la demanda bioquímica de oxígeno corresponde a un valor de 90 mg/l O<sub>2</sub>.

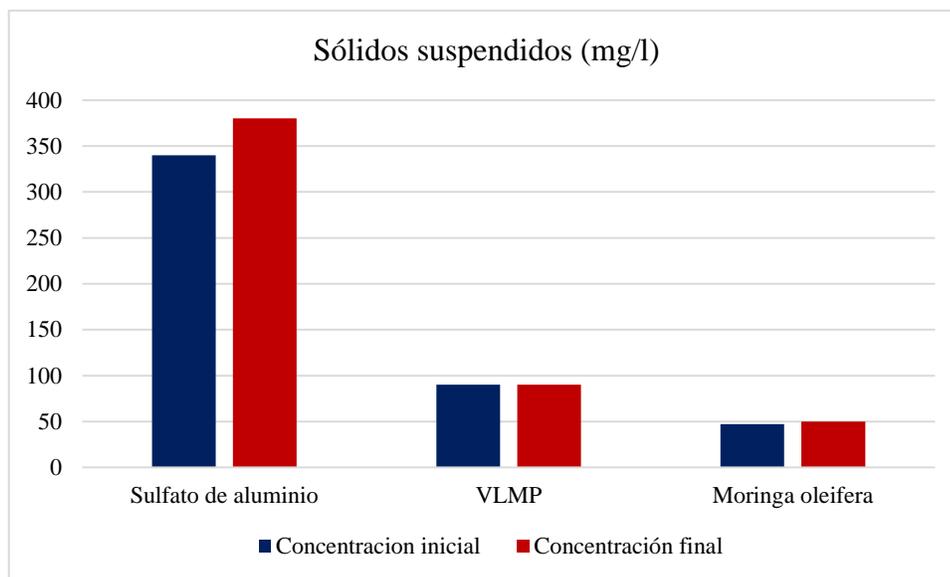


**Figura 22.** Análisis de DBO5 en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**Sólidos suspendidos totales, SST.** De acuerdo con Barrenechea (2012), los sólidos suspendidos totales son los que tiene partículas superiores a un micrómetro, siendo retenidos por medio de un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105 °C hasta su peso constante.

Los sólidos suspendidos totales no presentaron alguna reducción por parte de los dos coagulantes evaluados después de la prueba de jarras, más bien los coagulantes tienden a aumentar las concentraciones de este tipo de sólidos. En el caso del sulfato de aluminio se

observa un aumento de 340 mg/l a 380 mg/l, mientras que la *Moringa oleífera* generó un leve aumento de 47 a 50 mg/l de sólidos suspendidos totales como lo muestra la figura 23.

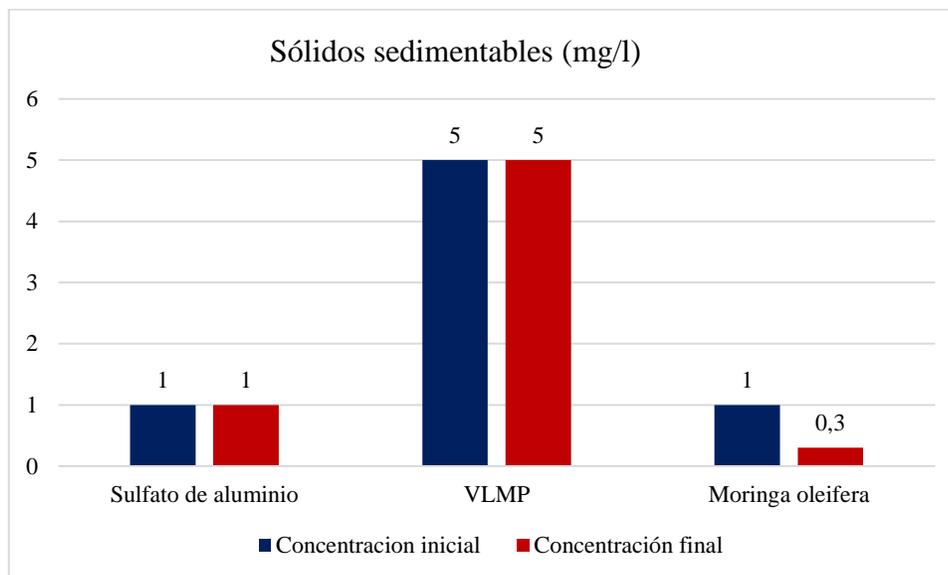


**Figura 23.** Análisis de SST en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**Sólidos sedimentables.** Son una medida del volumen de sólidos sedimentables al fondo de un cono imhoff durante 1 hora, y hace referencia a la cantidad de lodo removible por sedimentación simple; normalmente este parámetro se expresa en mg/l (Sánchez y Vélez, 2016).

La caracterización de muestras de agua cruda presentan bajas concentraciones de sólidos sedimentables, teniendo una concentración por debajo del Valor Límite Máximo Permisible de acuerdo con la normativa vigente, el cual se establece como VLMP a 5 mg/l de sólidos sedimentables.

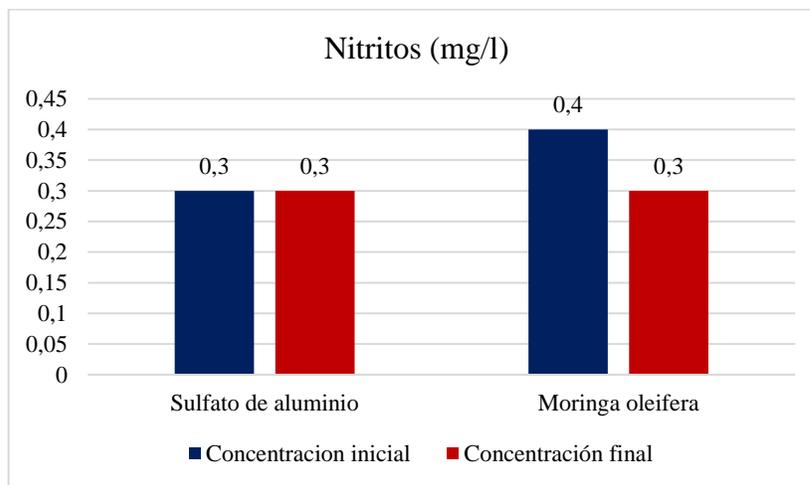
De esta forma, se observa que el sulfato de aluminio no generó algún cambio en la concentración de los sólidos sedimentables, puesto que se presentó una misma concentración inicial y final, el cual correspondió a 1 mg/l de SSED. Por el contrario, se observa un efecto reductor por parte de la *Moringa oleífera*, ya que de 1 mg/l disminuye a 0.3 mg/l.



**Figura 24.** Análisis de SSED en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017)

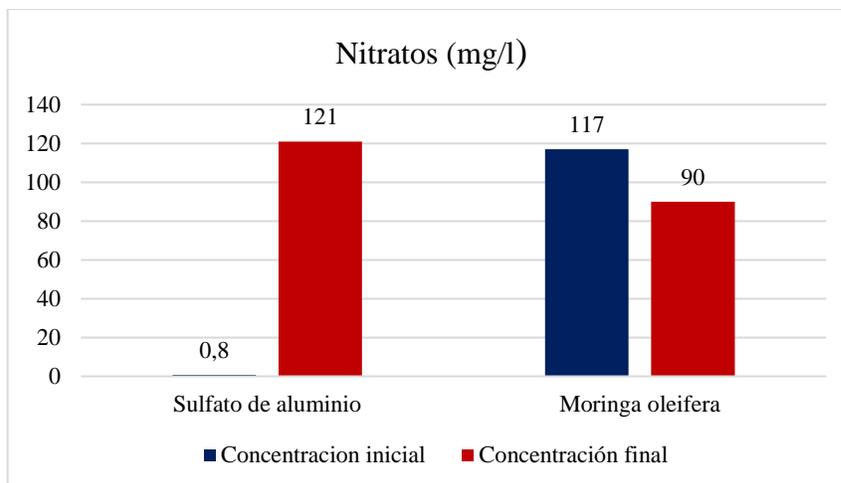
Ahora bien, el nitrógeno es un elemento importante en las aguas residuales, puesto que es necesario para el crecimiento de los microorganismos. También, el nitrógeno es un constituyente especial para el agotamiento de oxígeno y la eutrofización de las aguas cuando se encuentra en elevadas concentraciones. En las aguas residuales el nitrógeno se encuentra en 4 formas básicas: nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. Cabe resaltar, que la resolución 0631 de 2015 no establece un valor límite máximo permisible para los parámetros como nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal, definiendo solo reporte y análisis de los valores.

**Nitritos.** Son los principales indicadores de contaminación por descomposición orgánica en agua. En la figura 25, se puede observar que las semillas de *Moringa oleífera* generan un efecto reductor leve de nitritos, disminuyendo de 0.4 a 0.3 mg/l, a diferencia del sulfato de aluminio que luego de la prueba de jarras, no produjo en la muestra optima algún cambio positivo o negativo en la concentración de nitritos en muestras de agua residual.



**Figura 25.** Análisis de nitritos en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**Nitratos.** Su presencia en el agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. Basados en los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas por el Laboratorio de Aguas de la UFPSO, el coagulante metálico incremento las concentraciones de nitratos, pasando de 0.8 a 121 mg/l. En cambio, el coagulante natural generó un efecto contrario al producido por el coagulante convencional, que redujo la concentración de nitratos de 117 a 90 mg/l (Véase figura 26).

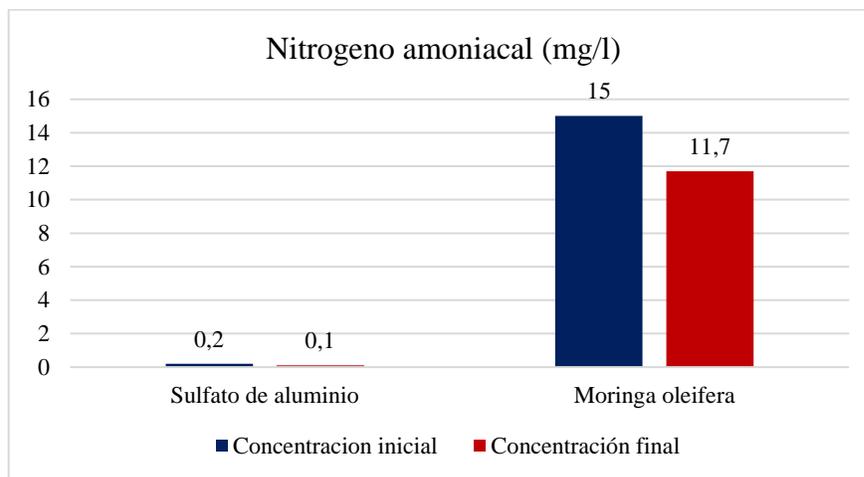


**Figura 26.** Análisis de nitratos en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017).

**Nitrógeno amoniacal.** Como se afirmó anteriormente, el amoniaco es uno de los compuestos transitorios en el agua puesto que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influido por actividad biológica. Se conoce como el producto natural de descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados. Normalmente, la presencia de amoníaco libre o ion amonio es considerado como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa. Se señala que el nitrógeno amoniacal genera en las aguas sabor desagradable, dificulta la cloración, altera el cobre de las conducciones por formación de complejos solubles y da colores extraños al agua por formación de complejos.

En la figura 27, se puede apreciar que la *Moringa oleífera* generó una disminución de nitrógeno amoniacal, con una concentración inicial de 15 mg/l pasando a 11.7 mg/l. De igual manera, se puede observar que el sulfato de aluminio también presentó un efecto reductor de nitrógeno amoniacal, pero muy bajo, en donde se presentó una concentración inicial de nitrógeno amoniacal de 0.2 mg/l y el coagulante químico generó una concentración final de 0.1 mg/l. Cabe

resaltar que la resolución vigente para aguas residuales no establece un nivel límite máximo permisible para concentraciones de nitrógeno amoniacal en este tipo de aguas.



**Figura 27.** Análisis de nitrógeno amoniacal en muestra de agua residual. Fuente: Autor (2017)

Finalmente, se puede inferir que las semillas de *M. oleífera* no presentaron la alta eficacia operativa o paramétrica que se esperaba de acuerdo a la literatura expuesta, en cuanto a la remoción de contaminantes durante el tren de clarificación de agua (coagulación, floculación y sedimentación) debido a factores relevantes durante la preparación de la semilla.

Inicialmente, se puede afirmar que una actividad que no fue tomada en cuenta para el diseño metodológico de la presente investigación, fue el descascarado de las semillas de *Moringa oleífera* para la separación y molienda del grano o de las mismas, como lo referenciaron Mas, Martinez, Carrasquero, y Vargas (2011), Caldera, Mendoza, Briceño, Garcia y Fuentes (2007) en el diseño experimental de sus investigaciones, los cuales obtuvieron un polvo o harina fina de color blanco amarillento con aspecto grasoso; mientras que en el presente proyecto se obtuvo una harina de color café oscuro, debido a la incorporación de las cascavas de semillas en la molienda,

disminuyendo en la dilución a preparar, la cantidad de los componentes coagulantes presentes en la semilla, y asimismo, se presentó un aumento de partículas resultantes (trozos de cascara) en la solución que fueron aplicados en los ensayos de jarras, pero no aportaban características coagulantes útiles en el tratamiento de agua.

Otro factor diferenciador que pudo haber generado afectación en los resultados, fue la baja concentración de solución de *M. oleífera* preparada, la cual fue de 25 ppm, basado en el estudio realizado por Molano (2011) que obtuvo altos porcentajes de remoción de turbiedad. En comparación con las concentraciones utilizadas en estudios de remoción de alto grado de turbidez en aguas, las cuales prepararon soluciones madres con concentraciones entre 5000 ppm y 10000 ppm (Caldera y otros, 2007), (Feria, Bermúdez y Estrada, 2014), (Mas y otros, 2011).

Además de lo anteriormente expuesto, cabe resaltar que Ndabigengesere, Subba Narasiah y Talbot (1995) señala que el agente activo de las semillas de *Moringa oleífera* es una proteína catiónica dimerica que presenta el mecanismo de coagulación por adsorción y neutralización de carga. Mientras tanto, Rodríguez, Muñoz, García, y Fernández (2005), comprobaron que las proteínas catiónicas presentes en los cotiledones de las semillas de *Moringa oleífera* son el constituyente activo, responsable de la coagulación del agua. De igual manera, determinaron que 1 g de semillas de *M. oleífera* contenía 0.070079 g de proteínas catiónicas.

De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que la solución preparadas para el presente estudio, presentó una masa aproximada de 0.00176975 g de proteínas catiónicas o principio activo de coagulación, bajo una concentración de 25 ppm, siendo este un valor muy bajo en

relación con los estudios anteriormente mencionados en donde aplicaron una masa de proteínas catiónicas de semillas de *M. oleífera* de 0,7079 g con una concentración de 1%, evidenciándose la eficacia del coagulante natural durante el proceso de coagulación y floculación del agua.

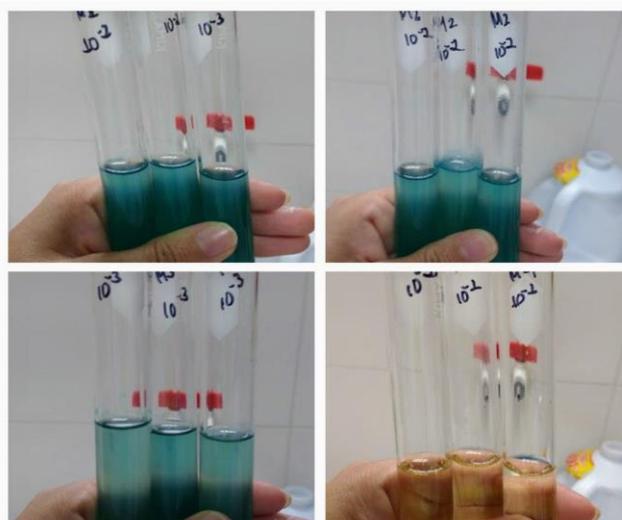
**4.2.3. Caracterización microbiológica de muestras de agua cruda y residual.** Se realizó un aislamiento del Grupo de Coliformes Totales por medio de la técnica de fermentación en tubos múltiples (NMP), utilizando 3 tubos de Fluorocult Caldo LMX modificado por dilución requiriendo agua peptonada, según recomendación para muestras de agua por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 1998 (Cabrera y García, 2006).

Las cuatro (4) muestras de agua valoradas corresponden a la jarra óptima obtenida en las pruebas de jarras desarrolladas en la PTAP de estudio, en donde se le aplicaron el coagulante convencional y el coagulante natural. Para los análisis microbiológicos las muestras se codificaron de la siguiente manera: agua residual con sulfato de aluminio (M1), agua residual y *M. Oleífera* (M2), Agua cruda y *Moringa oleífera* (M3) y agua residual con *M. oleífera* (M4). Para el cálculo del NMP se utilizó la Tabla de NMP para coliformes de serie de 3 como lo muestra la figura 28.

Tubos Positivos															
0.1 mL	0.01 mL	0.001 mL	NMP	0.1 mL	0.01 mL	0.001 mL	NMP	0.1 mL	0.01 mL	0.001 mL	NMP	0.1 mL	0.01 mL	0.001 mL	NMP
0	0	0	<3	1	0	0	3.6	2	0	0	9.1	3	0	0	23
0	0	1	3	1	0	1	7.2	2	0	1	14	3	0	1	39
0	0	2	6	1	0	2	11	2	0	2	20	3	0	2	64
0	0	3	9	1	0	3	15	2	0	3	26	3	0	3	95
0	1	0	3	1	1	0	7.3	2	1	0	15	3	1	0	43
0	1	1	6.1	1	1	1	11	2	1	1	20	3	1	1	75
0	1	2	9.2	1	1	2	15	2	1	2	27	3	1	2	120
0	1	3	12	1	1	3	19	2	1	3	34	3	1	3	160
0	2	0	6.2	1	2	0	11	2	2	0	21	3	2	0	93
0	2	1	9.3	1	2	1	15	2	2	1	28	3	2	1	150
0	2	2	12	1	2	2	20	2	2	2	35	3	2	2	210
0	2	3	16	1	2	3	24	2	2	3	42	3	2	3	290
0	3	0	9.4	1	3	0	16	2	3	0	29	3	3	0	240
0	3	1	13	1	3	1	20	2	3	1	36	3	3	1	460
0	3	2	16	1	3	2	24	2	3	2	44	3	3	2	1100
0	3	3	19	1	3	3	29	2	3	3	53	3	3	3	>1100

**Figura 28.** Tabla NMP para coliformes totales. Fuente: (AOAC, 2005).

En la figura 29, se puede observar el cambio de color que presentaron los tubos, después del procedimiento de fermentación evaluado a las 48 horas. Se aprecia que las primeras tres muestras sufrieron un cambio de color a verdoso en las diferentes diluciones de estudio, indicando alta presencia de Coliformes totales en las muestras de agua.



**Figura 29.** Revisión de coloración en tubos múltiples para Coliformes Totales. Fuente: Autor (2017).

Cabe destacar, que la metodología recomienda evaluar los tubos a las 24 horas, pero por limitaciones operativas en el laboratorio, se realizaron dos revisiones (una a 24 horas sin realizar cálculos y la otra a 48 horas), en donde finalmente, los tubos múltiples fueron evaluados en la segunda revisión a las 48 horas.

De acuerdo a lo anterior, se afirma que en la primera revisión (24 horas) realizada, los tubos de M3, muestras correspondientes a agua cruda con *Moringa oleifera*, no presentó ninguna coloración verdosa similar a la M4 (muestra de agua cruda con sulfato de aluminio). No obstante, en la segunda revisión (48 h) se observó un cambio de color verdoso con una tonalidad baja en comparación de M1 y M2. Seguidamente, se revisaron el cambio de color en los tubos, determinando las combinaciones de positivos por medio de la tabla de NMP para diluciones de 3.

Para el cálculo de NMP/100 ml de Coliformes Totales, se tuvo en cuenta las combinaciones obtenidas, las cuales permiten conocer el índice en la tabla NMP que se aprecia en la figura 28. Finalmente se calcula el NMP/ ml siendo este igual al producto entre el valor del índice NMP y 10, por el cociente de la dilución inicial.

Los resultados de pruebas de fermentación en tubos múltiples (NMP) por dilución de 3 para Coliformes Totales se pueden apreciar en la tabla 6.

**Tabla 6***Resultados de pruebas NMP para coliformes totales*

Muestra	Diluciones			Combinación de positivos	Índice NMP	NMP/100 ml
	10 <sup>-1</sup> ml	10 <sup>-2</sup> ml	10 <sup>-3</sup> ml			
M1	3/3	3/3	3/3	3-3-3	>1100	>110.000
M2	3/3	3/3	3/3	3-3-3	>1100	>110.000
M3	3/3	3/3	3/3	3-3-3	>1100	>110.000
M4	0/3	0/3	0/3	0-0-0	<3	<300

**Nota.** Los resultados obtenidos fueron evaluados en la segunda revisión de tubos, es decir, a las 48 horas del procedimiento. El índice NMP fue obtenido de la figura 29, teniendo en cuenta las combinaciones de positivos formados para cada muestra. Y el valor de NMP/100ml se obtuvo de la formula  $NMP/100ml = (\text{Índice de combinación} * 10) / \text{valor de la dilución inicial}$ . Fuente: Autor (2017).

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que las muestras M1, M2 y M3, las cuales corresponden a la muestra de agua residual con sulfato de aluminio, agua residual con *M. oleífera*, así como la muestra de agua cruda con *M. oleífera*, presentan alta contaminación biológica con un valor mayor de 100.000 NMP/ 100 ml de Coliformes Totales, mientras que la muestra de agua cruda con sulfato de aluminio presentó una menor contaminación de Coliformes Totales determinando un valor menor de 300 NMP/100 ml.

De acuerdo a lo anterior, se puede inferir el sulfato de aluminio como coagulante convencional genera un mayor efecto en las remociones de este grupo de microorganismos en agua cruda. No obstante, la *Moringa oleífera* a las 24 horas presenta un efecto reductor de microorganismos en menor medida, efecto que viró a las 48 horas de evaluación. Sin embargo, después del ensayo de jarras desarrollado, ninguno de los coagulantes a prueba generaron la

remoción de coliformes totales exigidos en la resolución 2115 de 2007 para el caso de agua potable, debido a que se establece que no habrá presencia de este tipo de microorganismos en el agua potable, mientras que en la resolución 0631 de 2016, no se establecen límites permisibles para este grupo microbiológico.

### **4.3. Comparación de la eficacia operativa, económica y ecotoxicología de la solución de *Moringa oleífera* y el sulfato de aluminio.**

**4.3.1. Comparación de la eficacia operativa.** En esta etapa se tuvieron en cuenta procesos como pruebas de jarras, evaluación de floculación y valoración porcentual de eficacia de los coagulantes en cada parámetro de estudio.

***Prueba de Jarras.*** Las pruebas de jarras se desarrollaron conforme a los parámetros y factores expresados en la tabla 5. Los ensayos de jarras se realizaron en el equipo floculador de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la empresa ESPO S.A, en donde fueron aplicados los dos tipos de coagulantes a las muestras de cada uno de los tipos de agua (cruda y residual).

La tabla 7 muestra los resultados obtenidas durante las pruebas de jarras, en donde las diferentes dosis trabajas con los respectivos valores de turbiedad registrados, siendo la turbiedad la variable de respuesta durante el proceso de prueba de jarras.

**Tabla 7***Resultados de pruebas de jarras*

Tipo agua	Coagulante	Jarra / Parámetro	1	2	3	4
Cruda	Sulfato de aluminio	Turbiedad inicial (UNT)	59			
		Dosis (ppm)	20	25	30	35
		Turbiedad final (UNT)	12	5.2	16.9	30
Cruda	<i>Moringa oleífera</i>	Turbiedad inicial (UNT)	39			
		Dosis (ppm)	20	25	30	35
		Turbiedad final (UNT)	39	39	37	38
Residual	Sulfato de aluminio	Turbiedad inicial (UNT)	86			
		Dosis (ppm)	50	60	70	80
		Turbiedad final (UNT)	69	14	29	67
Residual	<i>Moringa oleífera</i>	Turbiedad inicial (UNT)	97			
		Dosis (ppm)	50	60	70	80
		Turbiedad final (UNT)	72	63	46	35

**Nota.** Debido a la naturaleza del agua, se duplicaron el valor las dosis para agua residual en relación con agua cruda, puesto en pruebas preliminares los coagulantes con dosis similares a las dosis de agua cruda no generaron efecto floculante Fuente: Autor (2017).

De acuerdo a la tabla 7, se puede apreciar que al utilizar el sulfato de aluminio como coagulante para tratar agua crudas con fines de potabilización, con una turbiedad de 59 NTU, la dosis óptima corresponde a 25 ppm. Sin embargo, se puede evidenciar que la concentración de la solución de *Moringa oleífera* evaluada no genera un efecto considerable

en la remoción de la turbiedad, pues se puede observar que con una dosis de 30 ppm logra remover 2 NTU como jarra óptima. Por otro lado, se puede denotar que para aguas residuales, el coagulante natural genera un efecto positivo sobre la turbiedad, en donde con un turbiedad inicial de 91 NTU, la jarra optima correspondió a la jarra con una dosis de 80 ppm alcanzando una turbiedad de 35 NTU. Asimismo, se determina que para aguas residuales con una turbiedad de 87 NTU, se requiere una dosis de 60 ppm de sulfato de aluminio. Cabe resaltar que las muestras de agua residual presentan bajas turbiedades debido a que la toma de muestras se dio en época de lluvias, las cuales permiten una dilución de la carga contaminante. En la figura 30, se puede notar la remoción que desarrollaron los coagulantes estudiados.



**Figura 30.** Imágenes de los ensayos de jarras. Fuente: Autor (2017).

**Evaluación de floculación.** Durante el proceso de floculación se determina el tiempo de formación del floc y características del floculo a través del Índice de Willcomb. La tabla 8 muestra las descripciones y valores del índice de Willcomb.

**Tabla 8**

*Índice de Willcomb*

Nº de índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Floc visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible.
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido (sedimentable muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Floculo que se deposita completamente dejando el agua cristalina.

**Nota.** La descripción refleja una clasificación de los floc. Fuente: Giordani y otros (2008).

Teniendo en cuenta la observación realizada durante los ensayos de jarras, en la tabla 9, se presenta el comportamiento del proceso de floculación durante las pruebas.

**Tabla 9**

*Evaluación de floculación*

Tipo de agua	Coagulantes	Tiempo de formación de floc (seg)	Nº índice de Willcomb
Cruda	Sulfato de aluminio	45	8
Cruda	<i>Moringa oleífera</i>	21	4
Residual	Sulfato de aluminio	32	4
Residual	<i>Moringa oleífera</i>	18	6

**Nota.** La descripción refleja una clasificación cualitativa de los flóculos generados en las pruebas de jarras.

Fuente: Giordani y otros (2008).

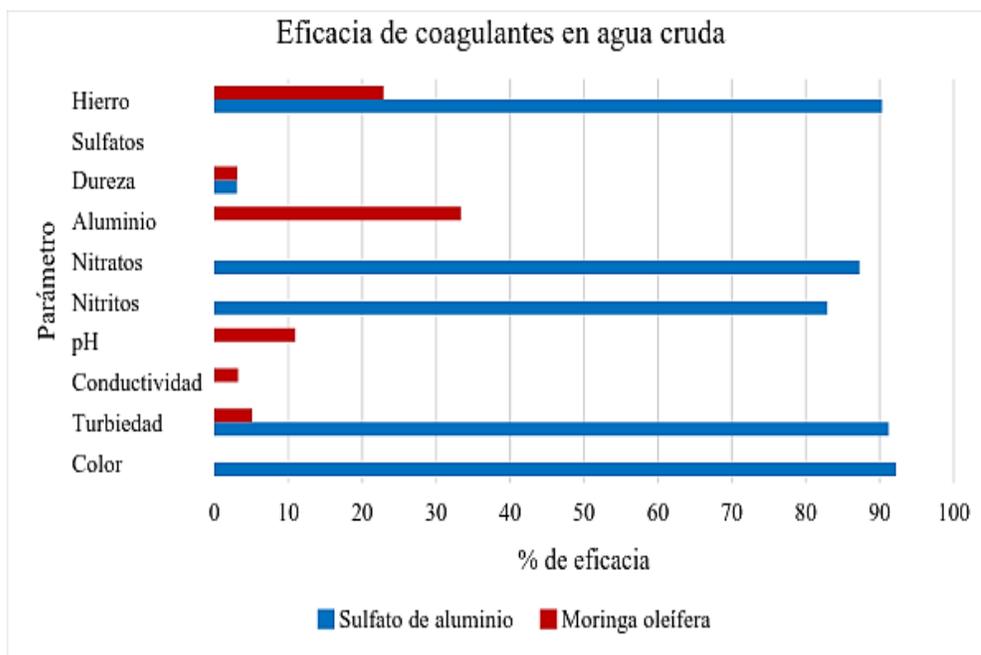
Como se aprecia en la tabla 9, después de 45 segundos al estar en contacto el sulfato de aluminio en el agua se produce la formación de flóculos, siendo este floculo uniforme, bien formado, que se sedimenta fácilmente pero no en su totalidad al cabo del tiempo de sedimentación de 10 minutos. No obstante, el floculo generado por la *M. oleífera* en agua cruda se forma al cabo de 21 segundos de iniciada la mezcla rápida, en donde la jarra optima se mostró con floculo disperso, con una uniforme distribución pero con sedimentación bastante lenta.

Por otro lado, el sulfato de aluminio en el agua residual, generó un floculo disperso y bien formado a los 32 segundos, aunque presentó dificultad para la sedimentación de estos mismos. No obstante, el coagulante natural formó un floculo de tamaño relativamente grande pero este se precipitó lentamente, siendo considerado por el índice de Willcomb como una jarra clara.

***Valoración porcentual de eficacia.*** Esta comparación se desarrolló con base en los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas realizadas en el laboratorio de Aguas de la UFPSO. Se valoró el porcentaje de remoción de carga contaminante en cada parámetro evaluado como la eficacia que presentó cada uno de los coagulantes estudiados.

En la figura 31 se muestra la eficacia que obtuvieron los dos coagulantes evaluados, en donde se puede apreciar que el sulfato de aluminio no presentó eficacia en parámetros como pH, conductividad, aluminio y sulfatos, mientras que la solución de *M. oleífera* no es eficaz en parámetros como el color aparente, nitritos, nitratos y sulfatos. Por otro parte, el coagulante químico produjo una remoción eficaz y sobresaliente de los siguientes parámetros

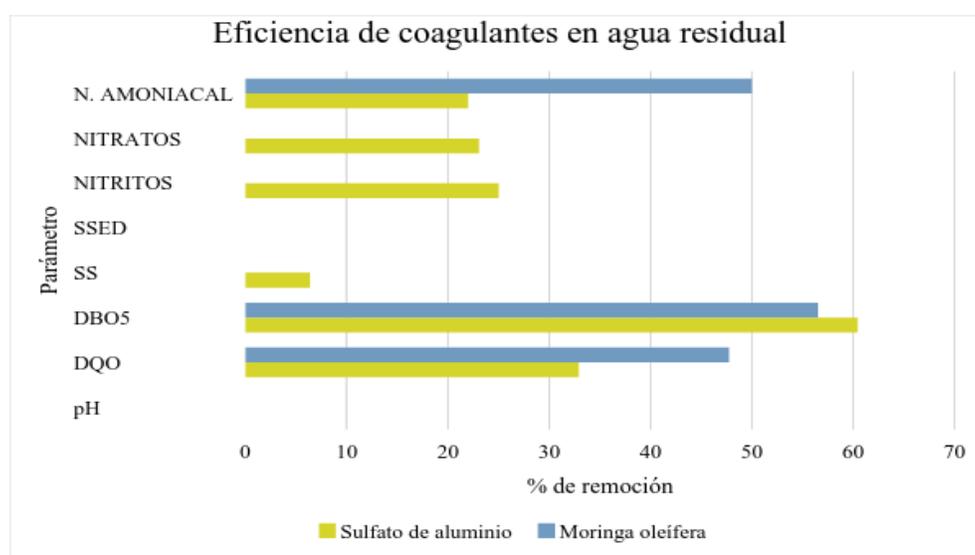
fisicoquímicos: 92.19% de color aparente, 91.18% de turbiedad, 82.89% de nitritos, 87.27% de nitratos y 90.29% de hierro. Por otro lado, se puede observar que la *Moringa oleífera* generó leve remociones de contaminantes, en donde se puede enunciar, que demuestra ser eficaz en la remoción del aluminio con un 33.33% y del hierro en un 22.85%.



**Figura 31.** Eficacia porcentual de coagulante en agua cruda. Fuente: Autor (2017).

Ahora bien, en la figura 32, se observa la evaluación de eficacia porcentual que presentaron los coagulantes estudiados para el tratamiento de agua residual. La solución de *M. oleífera* no generó ningún efecto positivo en cuanto al pH, los sólidos suspendidos totales, los sólidos sedimentables, los nitritos y los nitratos. En cambio, se muestra que el sulfato de aluminio para el pH y los sólidos sedimentables no presenta eficiencia alguna durante el tren de clarificación (coagulación, floculación y sedimentación).

No obstante, el coagulante natural evaluado, presentó eficacia en parámetros fisicoquímicos como la demanda química de oxígeno con 47.74% de eficacia, demanda bioquímica de oxígeno a un 56.52% y nitrógeno amoniacal a un 50% de eficacia demostrado durante el proceso. Mientras que el sulfato de aluminio, presentó eficacia en parámetro como DQO, DBO, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal con valores de 32.93%, 60.46%, 25%, 23.07% y 22% respectivamente.



**Figura 32.** Eficacia porcentual de coagulantes en agua residual. Fuente: Autor (2017).

**4.3.2. Comparación de la eficacia económica.** De acuerdo a la tabla 10, el sulfato de aluminio presenta la menor deducción de costos devengados en materiales, transporte, insumos y procesos complementarios y protección del personal al utilizar este tipo de coagulante en el tratamiento de agua, puesto que recibe la mayor puntuación en la matriz de análisis de costos con premisas y/o criterios que buscan rentabilidad dentro del proceso, en comparación con los costos requeridos para la utilización de las semillas de *M. oleífera*.

**Tabla 10***Matriz de análisis de costos para coagulantes*

<b>Premisas de rentabilidad</b>	<b>Peso</b>	<b>Ponderación Sulfato de aluminio</b>	<b>Ponderación Moringa oleífera</b>	<b>Observaciones</b>
El precio del producto por kg es económico en el mercado	4	3	1	El kg de semillas de Moringa cuesta \$8000 mientras que el kg de sulfato tiene un costo de \$4000 en promedio
La compra del producto genera bajos costos de transporte	4	2	2	Las empresas de venta que ofrecen productos certificados de calidad no se encuentran cerca.
La utilización del producto requiere pocos instrumentos y equipos complementarios	4	3	2	Se requieren de molinos o triturados, filtros y plancha de calentamiento
La utilización del producto no requiere de insumos complementarios que aumentan los costos	3	2	1	La Moringa es preparada con agua destilada, es por ello que se incurre en costos de un equipo para tal fin.
El producto genera menor cantidad de lodos que se deberán tratar.	3	1	2	El sulfato de aluminio genera mayor cantidad de lodos a tratar de acuerdo a diferentes investigaciones
Al utilizar el producto se requieren menor cantidad de elementos de protección personal por el operario	2	1	1	Por tratarse de productos en polvo se requiere de equipos de protección como mascararas para polvos, gafas protectoras, para evitar leves irritaciones por el producto.
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	

**Nota:** Fuente: Autor (2017).

**4.3.3. Comparación de la eficacia ecotoxicológica.** Esta fase del proyecto se desarrolló por medio del análisis estadístico por el método paramétrico probit, utilizando el complemento análisis de datos (regresión lineal) del software de Microsoft Excel con un margen de confiabilidad del 95%. El método probit nos permitió conocer la concentración letal media a determinado tiempo de exposición de acuerdo con la prueba.

Debido a limitantes operativos del proyecto, se tuvo en cuenta pruebas de sensibilidad y preliminares para determinar el rango de concentraciones a emplear en el proyecto. En el estudio desarrollado por Gámez y Ramírez (2008), se determinó que las concentraciones óptimas de sensibilidad por los individuos se encuentra entre 0,3 a 2 ppm.

***Bioensayo de toxicidad crónica.*** Esta prueba se desarrolló evaluando las 4 muestras de flóculos obtenidos después del ensayo de jarras de agua cruda y residual, en donde se utilizaron el sulfato de aluminio y la solución de semillas de *Moringa oleífera*.

Se utilizó como organismo de prueba el nematodo *Panagrellus redivivus*, en donde se monitoreo la población de 5 organismos por vaso de precipitado (un vaso de precipitado por cada concentración y por cada replica), por un periodo de 96 horas observando los posibles efectos letales como la mortalidad de individuos, que este tipo de muestras pueden provocar sobre la población de estudio. En la tabla 11, se puede observar la mortalidad que presentaron los nematodos en agua cruda con sulfato de aluminio.

**Tabla 11**

*Resultados de mortalidad de P. redivivus en agua cruda con sulfato de aluminio*

Concentración (ppm)	Nº de individuos muertos por replica		Total ind. Muertos	% de mortalidad
	Replica 1	Replica 2		
Blanco	0	0	0	0
0.3	1	2	3	30
0.7	1	4	5	50
1.0	3	3	6	60
1.3	4	4	8	80
1.7	5	4	9	90

**Nota:** El 100% por concentración es de 10 individuos. Fuente: Autor (2017).

Seguidamente, se realizó el análisis Probit para determinar la CL50. Se obtuvo el logaritmo 10 de cada una de las concentraciones empleados, así como la transformación del porcentaje a mortalidad a unidades de probit utilizando la Tabla de transformación Probit como lo muestra la tabla 12. Posteriormente, se realizó el análisis de datos por regresión, en donde se obtuvo los coeficientes de intercepción y de variable x, valores que fueron utilizados en el despeje de la formula  $y = ax + b$ , en donde “a” es el valor de variable x, “b” es el coeficiente de intercepción, y “y” expresado en unidades probit para CL50 toma el valor de 5, en donde se determina que LC50 es igual al antilogaritmo de X.

**Tabla 12**

*Análisis probit para prueba crónica de agua cruda con sulfato de aluminio*

Concentración (ppm)	Log10 (Concentración)	% de mortalidad	Probit
0,3	-0,522878745	30	4,48
0,7	-0,15490196	50	5
1	0	60	5,25
1,3	0,113943352	80	5,84
1,7	0,230448921	90	6,28

**Nota.** El blanco no es tenido en cuenta porque arrojó 0% de mortalidad. Fuente: Autor (2017).

Para el caso de la muestra de floculo de agua cruda con sulfato de aluminio la concentración letal corresponde a 0,88 ppm durante 96 horas. Ahora bien, la mortalidad de nematodos *Panagrellus redivivus* expuestos en la muestra del floculo de agua cruda con *M. oleífera* se expresa en la tabla 13, en donde se observa la mortalidad obtenida en cada una de estas concentraciones evaluadas en las dos replicas.

**Tabla 13**

*Resultados de mortalidad de P. redivivus en agua cruda con M. oleífera*

Concentración (ppm)	N° de individuos muertos por		Total	% de mortalidad
	replica			
	Replica 1	Replica 2		
Blanco	0	0	0	0
0.3	0	1	1	10
0.7	2	0	2	20
1.0	2	1	3	30
1.3	3	1	4	40
1.7	3	2	5	50

**Nota.** El blanco no presento mortalidad sobre la población expuesta. Fuente: Autor (2017).

De igual forma, se realizó el análisis probit para los porcentaje de mortalidad de nematodos en la muestra del floculo de agua cruda y el coagulante natural, convirtiendo el porcentaje de mortalidad en unidades de probit para el análisis por regresión, como lo muestra la tabla 14.

**Tabla 14**

*Análisis probit para prueba crónica de agua cruda con M. oleífera*

Concentración (ppm)	Log10 (Concentración)	% de mortalidad	Probit
0,3	-0,522878745	10	3,72
0,7	-0,15490196	20	4,16
1	0	30	4,48
1,3	0,113943352	40	4,75
1,7	0,230448921	50	5

**Nota.** Log 10 de cada concentración y unidades de Probit son las variables utilizadas para el análisis. Fuente: Autor (2017).

Se obtuvo un coeficiente de variable x de 1,694377111 y un coeficiente de intercepción de 4,534977145, demostrando que la concentración letal CL50 para la muestra de agua cruda con *M. oleífera* corresponde a 1,32 ppm.

De igual forma se realizaron los ensayos de toxicidad crónica para agua residual en solución con los dos coagulantes estudiados, en la tabla 15, se aprecia un alto grado de mortalidad presentada en muestras con floculo de agua residual con sulfato de aluminio.

**Tabla 15**

*Resultados de mortalidad de P. redivivus en agua residual con sulfato de aluminio*

Concentración (ppm)	N° de individuos muertos por replica		Total	% de mortalidad
	Replica 1	Replica 2		
Blanco	0	0	0	0
0.3	1	2	3	30
0.7	1	4	5	50
1.0	3	3	6	60
1.3	4	4	8	80
1.7	5	4	9	90

**Nota.** El blanco es aceptable pues no está por encima del 10% de mortalidad. Fuente: Autor (2017).

El efecto letal producido por la sustancia de prueba, se mide por el porcentaje de mortalidad, el cual es transformado a las unidades de probit, siendo este la variable Y, mientras que el logaritmo 10 fue tomado como entrada para la variable X. En la tabla 16, se aprecia los datos obtenidos para el análisis probit, necesario para el cálculo de la concentración letal del 50% de la población en un tiempo de exposición de 96 horas.

**Tabla 16**

*Análisis probit para prueba crónica de agua residual con sulfato de aluminio*

Concentración (ppm)	Log10 (Concentración)	% de mortalidad	Probit
0,3	-0,522878745	30	4,48
0,7	-0,15490196	50	5
1	0	60	5,25
1,3	0,113943352	80	5,84
1,7	0,230448921	90	6,28

**Nota.** Fuente: Autor (2017)

De acuerdo al análisis probit se puede determinar que la concentración letal (CL50) de la muestra de floculo de agua residual con sulfato de aluminio corresponde a 0,80 ppm a las 96 horas de exposición. Por otro lado, en la tabla 17 se describe los datos obtenidos acerca de la mortalidad producida por el efecto del agua residual con *M. oleífera*,

**Tabla 17***Resultados de mortalidad de P. redivivus en agua residual con M. oleifera*

Concentración (ppm)	N° de individuos muertos por replica		Total	% de mortalidad
	Replica 1	Replica 2		
Blanco	0	0	0	0
0.3	1	0	1	10
0.7	2	1	3	30
1.0	3	2	5	50
1.3	2	4	6	60
1.7	3	4	7	70

**Nota.** El total de individuos de pruebas es 10 por cada concentración. Fuente: Autor (2017).

Seguidamente, se cuenta con el cálculo de la CL50, en donde también se tuvo en cuenta como variables el logaritmo 10 de cada uno de los valores de las concentraciones y la conversión de los valores de mortalidad a unidades probit. En la tabla 18, se puede observar los datos de mortalidad obtenidos para la sustancia a evaluar.

**Tabla 18***Análisis probit para prueba crónica de agua residual con sulfato de aluminio*

Concentración (ppm)	Log10 (Concentración)	% de mortalidad	Probit
0,3	-0,522878745	10	3,72
0,7	-0,15490196	30	4,48
1	0	50	5
1,3	0,113943352	60	5,25
1,7	0,230448921	70	5,52

**Nota.** Fuente: Autor (2017).

De acuerdo al análisis de datos por medio de la regresión, se puede determinar que la concentración letal para agua residual con *M. oleífera* es de 1,02 ppm, contemplando un rango entre 0,7 ppm y 1,3 ppm. De manera general, se puede inferir que para bioensayos de toxicidad crónica el sulfato de aluminio presento una concentración letal promedio de 0,84 ppm, mientras que *M. oleífera* con una concentración promedio de 1,17 ppm se considera letal para los organismos de prueba.

Es así que se puede afirmar que el sulfato de aluminio puede provocar toxicidad crónica en el medio acuático o medio de disposición de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua en donde se aplica sulfato de aluminio. En el Apéndice D se encuentran todos los resúmenes de las regresiones desarrolladas en el proyecto para cada una de las pruebas de toxicología crónica realizadas.

***Bioensayo de toxicidad aguda.*** Se utilizó semillas de *Lactuca sativa* como organismo de prueba y la inhibición de germinación como efecto letal de las 4 sustancias de prueba, en donde se procedió a hacer el análisis probit con los datos ilustrados en la tabla 19. Para la prueba de toxicidad aguda se tuvo como efecto a la inhibición de germinación de semillas. Se trabajó con las mismas concentraciones descritas anteriormente en la prueba de toxicidad crónica en alícuotas de 2 ml, estas se agregaron al papel filtro previamente colocando sobre cajas petri, con la finalidad de que humedecieron completamente. Seguidamente, se colocaron 20 semillas por caja. Consecutivamente se tapó las cajas y se llevaron a una incubadora húmeda a temperatura ambiente por 120 horas

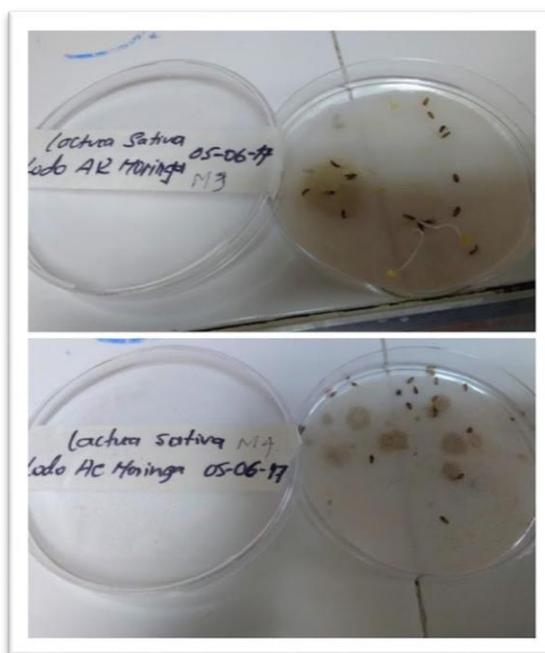
**Tabla 19***Análisis probit para bioensayo de toxicidad con Lactuca sativa*

Sustancia	Concentración (ppm)	Log 10 concentración	N° de semillas no germinadas por replica		Total	% de inhibición de germinación	Probit
			Replica	Replica			
			1	2			
Agua cruda	Blanco		0	0	0		
y sulfato de aluminio	0.3	-0,522878745	3	1	4	10	3,72
	0.7	-0,15490196	6	4	10	25	4,33
	1.0	0	7	6	13	32,5	4,53
	1.3	0,113943352	8	9	17	42,5	4,8
	1.7	0,230448921	10	13	23	57,5	5,18
Agua cruda y <i>Moringa oleífera</i>	Blanco		0	0	0	0	
	0.3	-0,522878745	10	11	21	52,5	5,05
	0.7	-0,15490196	15	13	28	70	5,52
	1.0	0	16	15	31	77,5	5,74
	1.3	0,113943352	18	18	36	90	6,28
	1.7	0,230448921	18	19	37	92,5	6,41
Agua residual y sulfato de aluminio	Blanco		0	0	0	0	
	0.3	-0,522878745	3	7	10	25	4,33
	0.7	-0,15490196	8	5	13	32,5	4,53
	1.0	0	10	7	17	42,5	4,8
	1.3	0,113943352	13	10	23	57,5	5,18
	1.7	0,230448921	11	15	26	65	5,39
Agua residual y <i>Moringa oleífera</i>	Blanco		0	0	0	0	
	0.3	-0,522878745	8	11	19	47,5	4,92
	0.7	-0,15490196	7	14	21	52,5	5,05
	1.0	0	13	16	29	72,5	5,55
	1.3	0,113943352	14	18	32	80	5,84
	1.7	0,230448921	19	20	39	97,5	6,88

**Nota:** La población total por cada concentración es de 40 semillas de prueba. Fuente: Autor (2017).

Como se observa en la tabla 19, los flóculos que contenían *M. oleífera* en las muestras de agua cruda y residual presentan un alto grado de inhibición en la germinación de las semillas

evaluadas (92,5% - 97,5). No obstante, al observar las cajas de petri de este tipo de sustancia se puede observar de manera presuntivamente algunas coloraciones como se aprecia en la figura 33, presentándose la posibilidad de crecimientos de hongos en las muestras, los cuales disminuyeron el oxígeno presente para la germinación de las semillas.



**Figura 33.** Cajas de petri con coloración de análisis. Fuente: Autor (2017)

De acuerdo a la regresión y cálculos realizados a través del software se puede determinar que la concentración letal para agua cruda con sulfato de aluminio corresponde a 1,58 ppm, estando comprendida entre un rango marginal de 1,3 a 1,7 ppm; la  $CL_{50-120}$  para floculo de agua cruda con *M. oleífera* está contemplada por una concentración de 0,60 ppm, mientras que la  $CL_{50-120}$  de agua residual con sulfato de aluminio corresponde a 1,04 ppm y la  $CL_{50-120}$  para agua residual con *Moringa oleífera* es de 0,70 ppm. De manera general, se puede inferir que los floculos y lodos de *M. oleífera* expuestas en el suelo en bajas concentraciones en comparación

con el sulfato de aluminio, puede generar un efecto tóxicamente crónico, que puede repercutir en el equilibrio del medio biótico.

## Capítulo 5: Conclusiones

La concentración de la solución de *M. oleífera* de 25 ppm no generó un efecto similar a las diferentes investigaciones nacionales que sirvieron de referencia para la selección de la misma, considerándose una baja concentración en relación con estudios en otros países. De igual forma, se deduce que pese a la omisión de la actividad de descascarado de las semillas, redujo la cantidad de material coagulante utilizado en la solución madre, pues la cascara también fue molida con el grano de la semillas. Además, cabe resaltar que el tipo de semilla adquirido por el proyecto, hacia la advertencia de ser toxico debido al alto grado de insecticidas que fueron utilizadas durante el cultivo, comprendiendo que el porcentaje de pureza es bajo. De igual forma, se determinó que a una concentración de 1 ppm, el coagulante natural no produce algún efecto en el tren de clarificación para agua cruda y residual.

Operativamente, de acuerdo a los análisis de agua cruda, el sulfato de aluminio no presento eficacia en parámetros como pH, conductividad, aluminio y sulfatos, mientras que la *M. oleífera* no fue eficaz en parámetros como el color aparente, nitritos, nitratos y sulfatos. Paralelamente, el coagulante químico generó una remoción sobresaliente en parámetros fisicoquímicos como color aparente con 92.19% de eficacia, turbiedad con el 91.18%, nitritos con 82.89%, nitratos con 87.27% y 90.29% de eficacia en la remoción de iones de hierro. Por otro lado, se pudo determinar que la solución de *Moringa oleífera* como coagulante natural, generó leve remociones de contaminantes, en donde se puede señalar que presenta una eficacia media en la remoción del aluminio con un 33.33% y del hierro en un 22.85%.

Ahora bien, el comportamiento de los coagulantes en agua residual fue distinta. La solución de *M. oleífera* no generó ningún efecto positivo en cuanto al pH, los sólidos suspendidos totales, los sólidos sedimentables, los nitritos y los nitratos. En cambio, se determina que el sulfato de aluminio en agua residual no generó algún efecto en la remoción del pH y los sólidos sedimentables. No obstante, el coagulante natural presentó una considerable eficacia en parámetros fisicoquímicos como la DQO con 47.74% de eficacia, DBO<sub>5</sub> a un 56.52% y nitrógeno amoniacal a un 50% de eficacia demostrado durante el proceso. Mientras que el sulfato de aluminio, presentó eficacia en parámetro como DQO, DBO, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal con valores de 32.93%, 60.46%, 25%, 23.07% y 22% respectivamente.

Desde un punto de vista microbiológico, se puede afirmar que ninguno de los coagulantes redujo la carga microbiana exigida por la normativa ambiental vigente para agua cruda a potabilizar y agua residual, puesto que las muestras de agua residual con los dos coagulantes y agua residual con el coagulante natural se presentó una cuantificación mayor de 100.000 NMP/ 100 ml de Coliformes Totales, mientras que la muestra de agua cruda con sulfato de aluminio presentó una menor contaminación de Coliformes Totales determinándose un valor menor de 300 NMP/100 ml.

Económicamente, se puede afirmar que en la actualidad y de acuerdo a factores económicos de la región, la disposición y comercialización de semillas de *Moringa oleífera* en el mercado local es limitada, además de contar con un precio bastante dispendioso, al comparar el valor monetario de adquisición del sulfato de aluminio, por tratarse de una semilla presente en ecosistemas cálidos, así como por la consideración de diferentes comunidades por ser una planta con altos potenciales medicinales y terapéuticos.

Y finalmente, de manera comparativa se puede afirmar que la solución de *M. oleífera* puede tener efectos letales de toxicidad aguda en el medio biótico con un concentración letal promedio de 0,65 ppm durante 120 horas, mientras que el sulfato de aluminio presentó toxicidad crónica con una concentración letal promedio de 0,84 ppm por un periodo comprendido entre las 96 horas de exposición.

De manera concluyente, se puede afirmar que la *Moringa oleífera* hasta la actualidad puede ser tomada como ayudante en el tren de clarificación de agua, debido a que en los resultados obtenidos, el coagulante natural demostró presentar una baja eficacia operativa, económica y toxicológica frente al sulfato de aluminio, coagulante convencional.

## Capítulo 6: Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación se destacan las siguientes recomendaciones para estudios similares a este.

Se hace necesario, preparar una serie de concentraciones mayores de la solución de *M. oleífera* (5000 ppm – 10000 ppm por ejemplo), comparando el efecto que tienen sobre la variable de respuesta. De igual forma, evaluar el efecto que presenta la solución del coagulante natural conservada a temperaturas bajas (refrigeradas) y a temperaturas ambiente.

Es recomendable hacer el estudio para la remoción contaminante de lixiviados y otra clase de líquidos residuales, que confronten la alta eficiencia de la *Moringa oleífera* en aguas residuales.

Además de realizar replicas en las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas para reducir el probabilidad de error en los resultados.

Finalmente, se sugiere realizar bioensayos de toxicidad con organismos de prueba, generalmente aceptables para estos, pero que sean especies representativos en los ecosistemas de la región, para conocer el efecto que los lodos y residuos de tratamiento, generan en un organismo específico.

## Referencias

- Ademiluyi, J. (2007). Sludge conditioning with Moringa seed. *Environment International*, vol 5, 302-306.
- Alcaldía Municipal de Ocaña. (2010). Informe General del Municipio de Ocaña.
- AOAC International. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International, 18 ed. 2005. Chapter 17.3, pag. 5. *AOAC*, 5.
- Aparecida dos Santos, J. (2014). UTILIZAÇÃO DA MORINGA OLEIFERA LAM PARA REMOÇÃO DE PESTICIDAS GLIFOSATO E DIURON. *Universidade Tiradentes - UNIT*.
- Barrenechea, A. (2012). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua.
- Barrenechea, M. (2005). Aspectos fisicoquímicos de la Calidad del Agua. *CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*.
- Bezerra, A., Momenté, V., & Medeiros, S. (2004). Germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de moringa (*Moringa oleifera* Lam) em função do peso da semente e do tipo de substrato. *Horticultura Brasileira*, 296-299.
- Cabrera, A., & García, E. (2006). Identificación de microorganismos indicadores y determinación de puntos de contaminación en aguas superficiales provenientes del cementerio Jardines del recuerdo ubicado en el norte de Bogotá. *Ponticia Universidad Javeriana*.
- Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., Garcia, J., & Fuentes, L. (2007). *Eficiencias de las semillas de Moringa oleífera como coagulante alternativo en la potabilización del agua*. Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Castillo, G., & al., e. (2004). Ensayos toxicológicos y Métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. *Instituto de Medicina Tropical IMT*.
- Cdaguas. (2006). *Cdaguas*. Obtenido de Nitratos en agua potable: [http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/06\\_Nitratos\\_en\\_agua\\_potable.pdf](http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/06_Nitratos_en_agua_potable.pdf)
- CEPIS. (2001). Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Sección 2. Evaluación y manejo del riesgo. Versión actualizada. *OPS/CEPIS/PUN*.

- Concejo Municipal de Ocaña. (2012). Acuerdo No. 015. Adopción del Plan de Desarrollo Ocaña 2012-2015. *Municipio de Ocaña, Norte de Santander*.
- De Vargas, L. (2015). Procesos Unitarios y plantas de tratamiento.
- Dorea, C. (2006). Use of Moringa spp. seeds for coagulation: A review of a sustainable option. *Water Science and Technology: Water supply*.
- Droxaine . (2016). Bula de remédio. *Laboratorio Daudt Oliveira Ltda*.
- European Aluminum Association. (2011). Obtenido de [www.abal.org.br/site/pdf/o-aluminio-no-corpo-humano.pdf](http://www.abal.org.br/site/pdf/o-aluminio-no-corpo-humano.pdf)
- Folkard, G., & Sutherland, J. (1996). Moringa oleifera un árbol con enormes potenciales. *FAO. University de Leicester* . , 2-4.
- Furtado, J., & Vendramini, D. (2015). Estudo do uso do coagulante natural Moringa oleífera Lam em uma ETA. *XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento*., 2.
- Gámez, C., & Ramírez, E. (2008). Determinación de la concentración letal media (CL 50.48) del herbicida Roundup 747 sobre ecosistemas acuáticos mediante pruebas toxicológicas con *Daphnia magna*. *Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria*, 112-116.
- Gassenschmidt, U., Jany, K., Tauscher, B., & Niebergall, H. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from Moringa oleifera sees by salt solution. . *Water Research*.
- Gómez, F. (2016). Evaluación de la eficiencia de las semillas de Moringa oleífera Lam como coagulante natural en la ciudad de Pasto-Colombia. *Libros Editorial UNIMAR* .
- Gupta, A., & Chaudhuri, M. (1992). Domestic water purification for developing countries. *Aqua*, vol. 41.
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Rev. U.D.C.A.*, 256-262.
- Hurtado, J. (2000). En *Metodología de la investigación holística* (págs. 384- 414). Caracas: Fundación Sypal.
- IDEAM. (2006). Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas. *IDEAM*.
- Jahn, S. (1988). Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. *Water Works Assoc.*, 43.

- Lo Monaco, P., Matos, A., Ribeiro, I., Nascimento, F., & Sarmiento, A. (2010). Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e água residuária. *Ambi Água, Taubaté*, 222-231.
- Luna, J. (2009). Nematodo de vida libre *Panagrellus redivivus* (Goodey, 1945): Una alternativa para la alimentación inicial de larvas de peces y crustáceos. *Investigación y ciencia*. No. 45, 4-11.
- Martins de Paula, H., & Sangoi de Oliveira, M. (2016). Uso da Moringa oleífera no tratamento de águas residuárias de usinas de concreto: Mapeamento sistemático. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 51-58.
- Mas y Rubi, M., Martínez, D., Carrasquero, S., & Vargas, L. (2011). Uso de la Moringa oleífera para el mejoramiento de la calidad del agua de un efluente doméstico proveniente de lagunas de estabilización. *Boletín del centro de Investigaciones Biológicas. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela*. Vol. 45, 170-171.
- Matos, A., Cabanellas, C., Cecon, P., Brasil, M., & Mudado, C. (2007). Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. *Engenharia Agrícola*, vol. 27.
- Melo, G., & Turriago, F. (2012). Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de Moringa oleífera como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales del Caño Cola de Pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. Villavicencio*, 22.
- Mera, C., Gutiérrez, M., Rojas, C., & Concha, J. (2016). Efecto de la Moringa oleífera en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Revista Facultad Ciencias Agrarias*, Vol. 14 No 2. .
- Min Ambiente. (2012). Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia*, 72-73.
- Molano, L. (2011). Las semillas de Moringa oleífera Lam, como alternativa de coagulante natural para purificación de aguas. *Universidad Industrial de Santander*, 17-18.
- Moscoso, R. (2014). Determinación de la toxicidad por Aluminio del efluente de la planta potabilizadora de El cebollar en el río Tomebamba, utilizando bioensayos ecotoxicológicos. *Universidad de Cuenca. Tesis de Maestría en toxicología industrial y ambiental*.

- Muñoz Rodríguez, S., García Roque, O., & Muñoz, M. R. (2005). Empleo de producto coagulante natural para clarificar agua. *Revista CENIC Ciencias Químicas. Cuba*.
- Muyibi, S., & Evison, L. (1995). Moringa oleífera seeds for softening hardwater. *Water Research*.
- Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. (1998). Use of Moringa oleífera seeds as a primary coagulant in wastewater treatment. *Environmental Technology*, 789;800.
- Ndabigengesere, A., Subba Narasiah, K., & Talbot, B. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. *Water Research*, 704.
- Nishi, L., Madrona, G., Viera, A., Bassetti, F., Silva, G., & Bergamasco, R. (2011). Coagulação/Floculação com Sementes de Moringa oleífera Lam para Remoção de Cistos de Giardia spp. e Oocistos de Cryptosporidium spp. da água. *International Workshop: Advances in Cleaner Production*, 3.
- Oocities. (2009). Obtenido de <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/dboydqd2.pdf>
- Palada, M., & Chang, L. (2003). Suggested cultural practices for moringa. *AVRDC International Cooperators' Guide*, 545.
- Pérez, J. (2010). Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal. *Universidad Industrial de Santander*, 18-22.
- Pisano, G., Alves, A., Oliveira, S., Moraes, L., Nishi, L., Angélica, M.,... Bergamasco, R. (2015). Tratamento de Efluente Lácteo Sintético Utilizando Diferentes Concentrações do Coagulante Natural Moringa oleífera Lam em Comparação ao Coagulante Policloreto de Alumínio. *V Simpósio de bioquímica e biotecnología. Londrina*.
- Pro familia. (2010). Encuesta Nacional de Demografía y Salud. Colombia.
- Reyes, N. (2004). Marango cultivo y utilización en la alimentación animal. *Serie técnica N° 5. Universidad Nacional Agraria Nicaragua. Dirección de Investigación, Extensión y Postgrado (DIEP)*.
- Rodríguez, H. (2001). *La presencia de nitritos en el agua*. Obtenido de UPC: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/94296/04ComponentesAguas05.pdf>
- Rodríguez, S., Muñoz, R., García, O., & Fernández, E. (2005). Empleo de un producto coagulate natural para clarificar agua. *Revista CENIC. Ciencias químicas. La Habana, Cuba*, ISSN 1015-8553 Vol. 36.

- Rondón, M., Díaz, Y., Rodríguez, S., Guerra, B., & Tabio, D. (2017). Empleo de semillas de Moringa oleífera en el tratamiento de residuales líquidos. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, 87-101.
- Sánchez, L., & Vélez, Y. (2016). DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO, EMPLEANDO LAS ESPECIES *COSTUS SPICATUS* Y *HELICONIA PSITTACORUM*. *UFPSO*.
- Sandoval, M., & Laines, J. (2013). Moringa oleífera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. *Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 2*, 93-101.
- Santos, R., Rabelo, T., & Scrhank, S. (2007). Uso de sementes de Moringa oleífera para o tratamento de efluentes têxteis. *24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria, Belo Horizonte*.
- Sarabia, O. (s.f). Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos. *Centro Nacional de Prevención de Desastres de México*.
- Silva, M., Souza, M., Florencio, W., & Suzana, S. (2015). Viabilidade da utilização da Moringa oleífera como método alternativo de tratamento de água no semiárido nordestino. *SCIRE*.
- Solórzano, H. (2014). El aluminio: su relacion con la enfermedad de Alzheimer. *Terapia bioquímica nutricional*. Obtenido de <http://hector.solorzano.com.mx/046.html>
- Song, Z., Williams, C., & Edyvean, R. (2004). Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. *Desalination, vol 164*.
- Tat, W., Idris, A., Noor, M., Mohamed, T., Ghazali, A., & Muyibi, S. (2010). Optimization study on sewage sludge conditioning using Moringa oleífera seeds. . *Desalination and Water Treatment, vol. 16*.
- Vargas, C., & Romero, L. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa rica. *Revista on Line. Tecnología en Marcha. Vol. 19*.

- Vieira, A., Vieira, M., Silva, G., Araújo, A., Fragundes-Klen, M., & Bergamasco, R. (2010). Use of Seed as a Natural Adsorbent for Wastewater Treatment. . *Water, Air, and Soil Pollution*.
- Zhen, B. (2009). Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoria, Curubardé, Guanacaste, Costa Rica, año hidrológico 2007-2008. *Universidad Estatal a Distancia (Tesis de maestría)*, 10-16.

# Apéndices

**Apéndice A. Solicitud de apoyo técnico a la empresa ESPO S.A. para prueba de jarras.**

**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT 800 163 130-01

Pág. 1(1)

O-IV-GIA-0003  
2.15.50.00 38.01

Ocaña, 21 de febrero de 2017

Ingeniera Civil  
**LIBETH ARGÉNIDA SARABIA**  
Gerente  
Empresa de Servicios Públicos de Ocaña - ESPO  
Carrera 33 #7A-11  
Tel. 5613018  
Ocaña, Norte de Santander

**Asunto:** Solicitud de colaboración

Cordial saludo:

Por medio del presente me permito solicitarle de manera respetuosa el apoyo institucional y/o técnico de ESPO S.A., para el desarrollo del proyecto de grado, titulado "Evaluación de la eficacia de semillas de *Moringa oleifera* como agente natural en el tratamiento de agua cruda y residual en la ciudad de Ocaña", investigación que está siendo realizada por el estudiante de Ingeniería Ambiental Jorge Andrés Duarte Duarte, identificado con código: 160919, y dirigido por la docente investigadora PhD. María Angélica Acosta Pérez.

Para el estudio en cuestión, se requiere realizar pruebas de jarras, con el fin de evaluar la eficacia de la solución coagulante natural, aplicada a agua cruda y residual, proceso que se requiere realizar por triplicado bajo unas condiciones hidráulicas establecidas previamente por la investigación.

**Nota:** Anexo carné institucional y seguro del estudiante.

Agradezco de antemano su atención y colaboración al presente.

**JUAN CARLOS HERNANDEZ CRIADO**  
Director del Grupo de Investigación GI@DS

Transcriptor: Ever Peñaranda Vásquez

Vía Acoisure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552  
Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104  
info@ufpsol.edu.co - www.ufpsol.edu.co



**Apéndice C. Resultados fisicoquímicos de agua.**

**LABORATORIO DE AGUAS**

**RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS**

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Residual.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Puente Primero de mayo **PUNTO:** punto 1.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 15:00 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 25 de mayo del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 26 de mayo del 2017 **HORA:** 08:30 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, Sólidos Suspendidos, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno Amoniacal, Sólidos Sedimentables.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 1
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	7,8
DQO	mg/L	511
DBO <sub>5</sub>	mg/L	230
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	340
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/L	< 1,0
NITRITOS	mg/L	0,3
NITRATOS	mg/L	0,8
N. AMONICAL	mg/L	0,2



**MSc. Diana M. Valdes S.**  
**Coord. Laboratorio de Aguas.**

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Residual.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Puente Primero de Mayo **PUNTO:** punto 2.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 15:00 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 25 de mayo del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 26 de mayo del 2017 **HORA:** 08:30 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, Sólidos Suspendidos, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno Amoniacal, Sólidos Sedimentables.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 2
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	8,1
DQO	mg/L	267
DBO <sub>5</sub>	mg/L	100
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	380
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/L	< 1,0
NITRITOS	mg/L	0,3
NITRATOS	mg/L	121
N. AMONICAL	mg/L	0,1



**MSc. Diana M. Valdes S.**  
Coord. Laboratorio de Aguas.



**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT. 800 163 130 - 0

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Cruda.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Pto Captación PTAP- ESPO **PUNTO:** punto 1.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 14:40 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 04 de mayo del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 05 de mayo del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, Color, turbiedad, conductividad, Nitritos, Nitratos, Aluminio, Dureza, Sulfatos, Hierro.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 1
COLOR	UPtCo	86
TURBIEDAD	NTU	39
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	94
POTENCIAS DE HIDRÓGENO	pH	8,2
NITRITOS	mg/L	0,1
NITRATOS	mg/L	18
ALUMINIO	mg/L	0,03
DUREZA	mg/L	32
SULFATOS	mg/L	6,0
HIERRO	mg/L	0,7

**MSc. Diana M. Valdes S.**  
**Coord. Laboratorio de Aguas.**



**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT. 800 163 130 - 0

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Cruda.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Pto Captación PTAP- ESPO **PUNTO:** punto 2.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 14:40 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 04 de mayo del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 05 de mayo del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, Color, turbiedad, conductividad, Nitritos, Nitratos, Aluminio, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Hierro.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 2
COLOR	UPtCo	92
TURBIEDAD	NTU	37
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	91
POTENCIAS DE HIDRÓGENO	pH	7,3
NITRITOS	mg/L	0,1
NITRATOS	mg/L	18
ALUMINIO	mg/L	0,02
DUREZA	mg/L	31
SULFATOS	mg/L	5,0
FOSFATOS	mg/L	0,4
HIERRO	mg/L	0,54

**MSc. Diana M. Valdes S.**  
Coord. Laboratorio de Aguas.

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Cruda.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Pto Captación PTAP- ESPO **PUNTO:** punto 1.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 16:10 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 17 de abril del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 17 de abril del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, Color, turbiedad, conductividad, Nitritos, Nitratos, Aluminio, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Hierro.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 1
COLOR	UPtCo	333
TURBIEDAD	NTU	59
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	0,8
POTENCIAS DE HIDRÓGENO	pH	7,6
NITRITOS	mg/L	76
NITRATOS	mg/L	55
ALUMINIO	mg/L	0,06
DUREZA	mg/L	33
SULFATOS	mg/L	11,0
FOSFATOS	mg/L	0,8
HIERRO	mg/L	1,34



**MSc. Diana M. Valdes S.**  
**Coord. Laboratorio de Aguas.**



**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT. 800 163 130 - 0

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Cruda.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Pto Captación PTAP- ESPO **PUNTO:** punto 2.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 16:10 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 17 de abril del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 17 de abril del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, Color, turbiedad, conductividad, Nitritos, Nitratos, Aluminio, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Hierro.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 2
COLOR	UPtCo	26
TURBIEDAD	NTU	5,2
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	0,9
POTENCIAS DE HIDRÓGENO	pH	7,7
NITRITOS	mg/L	13
NITRATOS	mg/L	7
ALUMINIO	mg/L	0,06
DUREZA	mg/L	32
SULFATOS	mg/L	16
FOSFATOS	mg/L	26,8
HIERRO	mg/L	0,13

**MSc. Diana M. Valdes S.**  
**Coord. Laboratorio de Aguas.**



**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT. 800 163 130 - 0

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUÍMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Residual.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Río Tejo **PUNTO:** punto 1.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 14:00 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 04 de abril del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 05 de abril del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, Sólidos Sedimentables, Sólidos totales, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno amoniacal.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 1
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	7,3
DQO	mg/L	167
DBO <sub>5</sub>	mg/L	85
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	50
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/L	3,0
NITRITOS	mg/L	0,3
NITRATOS	mg/L	90
N. AMONICAL	mg/L	11,7

**MSc. Diana M. Valdes S.**  
Coord. Laboratorio de Aguas.



**Universidad**  
Francisco de Paula Santander  
Ocaña - Colombia

NIT. 800 163 130 - 0

## LABORATORIO DE AGUAS

### RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

**MATRIZ DE LA MUESTRA:** Agua Residual.

**TIPO DE MUESTRA:** Compuesta.

**LUGAR DE MUESTREO:** Río Tejo **PUNTO:** punto 1.

**TOMADA POR:** Jorge Duarte **HORA:** 14:00 Hrs.

**FECHA TOMA DE MUESTRA:** 04 de abril del 2017.

**FECHA ENTREGA LABORATORIO AGUAS:** 05 de abril del 2017 **HORA:** 08:00 Hrs

**ANALISIS SOLICITADOS:** pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, Sólidos Sedimentables, Sólidos totales, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno amoniacal.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR PUNTO 2
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	6,7
DQO	mg/L	249
DBO <sub>5</sub>	mg/L	215
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	47
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/L	<1,0
NITRITOS	mg/L	0,4
NITRATOS	mg/L	117
N. AMONICAL	mg/L	15

**MSc. Diana M. Valdes S.**  
Coord. Laboratorio de Aguas.

## Apéndice D. Resúmenes de regresiones de pruebas de toxicología

Resumen regresión. Toxicidad crónica agua cruda y sulfato de aluminio.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,938037689
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,879914706
R <sup>2</sup> ajustado	0,839886274
Error típico	0,321117489
Observaciones	5

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2,266730675	2,266730675	21,98224301	0,018342017
Residuos	3	0,309349325	0,103116442		
Total	4	2,57608			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	5,313846101	0,148211655	35,8530921	4,77173E-05	4,842170469	5,785521734
Variable X 1	2,577265511	0,549696738	4,688522476	0,018342017	0,827885158	4,326645863

Resumen de regresión. Toxicidad crónica.  
Agua cruda y M. oleífera

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9866163
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,9734117
R <sup>2</sup> ajustado	0,9645490
Error típico	0,0944466
Observaciones	5

ANÁLISIS DE  
VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,9797194	0,979719495	109,83195	0,00185491
Residuos	3	0,0267605	0,008920168		
Total	4	1,00648			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	4,5349771	0,0435918	104,0327738	1,958E-06	4,396248544	4,67370574
Variable X 1	1,6943771	0,1616760	10,48007395	0,0018549	1,179851717	2,20890250

Resumen de regresión. Toxicidad crónica. Agua residual y sulfato de aluminio

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,95314518
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,90848574
R <sup>2</sup> ajustado	0,87798099
Error típico	0,24653128
Observaciones	5

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1,81006699	1,81006699	29,7817764	0,012088966
Residuos	3	0,18233301	0,06077767		
Total	4	1,9924			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	5,52356316	0,11378642	48,543256	1,925E-05	5,161444	5,88568232
Variable X 1	2,30306675	0,42201824	5,45726822	0,01208897	0,960016348	3,64611715

Resumen de regresión. Toxicidad crónica. Agua residual y M. oleífera.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99670325
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99341736
R <sup>2</sup> ajustado	0,99122315
Error típico	0,06673229
Observaciones	5

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2,0161604	2,016160404	452,744308	0,000227117
Residuos	3	0,0133596	0,004453199		
Total	4	2,02952			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	4,95606986	0,03080026	160,9099803	5,2925E-07	4,858049676	5,054090048
Variable X 1	2,43064616	0,11423396	21,27778907	0,00022712	2,06710271	2,794189614