

DESARROLLO DE UN COAGULANTE ORGÁNICO A PARTIR DE LA SEMILLA
DE MORINGA PARA LA EMPRESA COMERCIAL DACETEX LTDA

LAURA SOFÍA CASTELLANOS BELTRÁN

MARÍA ALEJANDRA MARTÍN DAZA

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

DESARROLLO DE UN COAGULANTE ORGÁNICO A PARTIR DE LA SEMILLA
DE MORINGA PARA LA EMPRESA COMERCIAL DACETEX LTDA

LAURA SOFÍA CASTELLANOS BELTRÁN

MARÍA ALEJANDRA MARTÍN DAZA

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director

CÉSAR AUGUSTO ESPINOSA OTÁLORA

Ingeniero Químico

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

Nota de aceptación

Ing. Javier Francisco Rey Rodríguez

Ing. Duvian Alberto Vera Romero

Bogotá D.C, Febrero 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados (E)

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto de grado a mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de todo este camino, por su esfuerzo, por la increíble educación que me brindaron y por su infinito amor, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

María Alejandra Martín

Dedico este proyecto principalmente a mis padres, por ser uno de los pilares más importantes en este proceso en el cual aportaron a mi formación tanto profesional como humana a pesar de las adversidades e inconvenientes. A mis tíos y a mi abuela, quienes compartieron momentos significativos conmigo y siempre estuvieron dispuestos a apoyarme incondicionalmente en cualquier momento.

Laura Sofía Castellanos Beltrán

AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo de grado agradecemos primordialmente a Dios por ser nuestra guía y acompañante en el trascurso de este proceso profesional, dándonos las fuerzas para continuar con cada una de nuestras metas propuestas.

Agradecemos al tecnoparque, por abrirnos sus puertas y permitirnos culminar la etapa inicial de nuestro proyecto, por brindarnos los equipos e instrumentos que necesitábamos y por el soporte intelectual.

A Ana María Gómez Ortiz, nuestra directora del tecnoparque por estar pendiente siempre, por colaborarnos en las diferentes prácticas de laboratorio, por su vocación, por su apoyo y conocimiento.

A Ahudrey Leal Quintero, por colaborarnos con los equipos e herramientas que requeríamos para seguir nuestro desarrollo experimental, por su apoyo en el proceso y aporte a la realización de este proyecto.

Agradecemos a cada uno de los docentes que nos aportaron su sabiduría, conocimiento y apoyo en estos cinco años de proceso académico, motivándonos a desarrollarnos como personas en la Universidad de América.

A David Espinosa y Cesar Espinosa, por ayudar en la dirección, aportando sus conocimientos a lo largo de la elaboración de esta investigación, además de ayudarnos con cada una de las herramientas y materias primas necesarias para el desarrollo a nivel laboratorio.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	21
1.3 ANTECEDENTES	22
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1 MORINGA	25
2.2 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN	25
2.3 CULTIVO DE MORINGA	26
2.3.1 Cultivo de moringa en Colombia	26
2.4 USOS DE LA MORINGA	27
2.5 ACEITES ESENCIALES	28
2.5.1 Métodos de extracción: aceites esenciales	29
2.6 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTE	30
2.7 AGUA	31
2.7.1 Contaminación del agua	31
2.8 PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA	33
2.8.1 Coagulación	33
2.8.2 Mecanismos de coagulación	36
3. MARCO LEGAL	38
4. MATERIALES Y MÉTODOS	40
4.1 MATERIA PRIMA	40
4.1.1 Semilla de moringa	40
4.1.2 Aceite de moringa	40
4.1.3 Agua residual sintética	41
4.2 MÉTODOS	41
4.2.1 Extracción de aceite por soxhlet	41
4.2.2 Diseño de experimentos	42
4.2.3 Ensayo de jarras	44

4.2.4	Actividad coagulante y porcentaje de remoción	45
4.2.5	Comparación coagulante químico	45
5.	OBTENCIÓN DEL COAGULANTE	46
5.1	PROCESO DE DESCASCARADO, MOLIENDA Y TAMIZADO	46
5.1.1	Descripción del proceso.	46
5.2	EXTRACCIÓN DEL ACEITE POR SOXHLET	47
5.2.1	Recuperación del hexano	49
5.3	CONCENTRACIÓN COAGULANTE DE MORINGA	50
5.4	PREPARACIÓN COAGULANTE	50
6.	DETERMINACIÓN DE LA ACCIÓN COAGULANTE	52
6.1	PREPARACIÓN AGUA PATRÓN	52
6.2	CONTROL Y AJUSTE DE PH	52
6.2.1	Dosis de coagulante de moringa	53
6.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DE COAGULANTE	54
6.4	DETERMINACIÓN DEL PH Y DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE	55
6.4.1	Influencia del pH sobre la turbidez final	58
6.4.2	Influencia de la dosis sobre la turbidez final	60
6.4.3	Análisis Estadístico	61
6.4.4	Análisis de varianza ANOVA	62
6.5	COMPARACIÓN MORINGA OLEÍFERA Y SULFATO DE ALUMINIO	64
6.5.1	Muestra de agua tipo textil	65
6.5.2	Muestra de agua residual doméstica	67
6.5.3	Influencia del sulfato de aluminio sobre el ph	70
7.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÉTODO SELECCIONADO	71
7.1	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO	71
7.1.1	Diagrama de bloques	72
7.1.2	Diagrama de flujo de proceso	74
7.1.3	Especificaciones de equipos.	75
8.	COSTOS ASOCIADOS AL MÉTODO SELECCIONADO	85
8.1	COSTOS DE OPERACIÓN	85
8.1.1	Costos de materia prima	85
8.1.2	Costos de mano de obra	86
8.1.3	Costo servicios auxiliares	87
8.1.4	Costo producto final	88
8.2	INVERSIÓN TOTAL	89
8.2.1	Costo equipos	89

9. CONCLUSIONES	91
10. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	98

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Actividad coagulante de las diferentes formas de moringa	35
Tabla 2. Frecuencias mínimas para la medición de coagulantes.	39
Tabla 3. Dosis coagulante	53
Tabla 4. Valoración de factores selección método de obtención	54
Tabla 5. Variables del diseño para el proceso de coagulación	56
Tabla 6. Resultados turbidez final (Agua patrón)	56
Tabla 7. Resultados – Visor de datos del desarrollo experimental	61
Tabla 8. Resultados agua textil (Promedio)	66
Tabla 9. Resultados agua residual doméstica (Promedio)	68
Tabla 10. Condiciones y valores de producción de coagulante	71
Tabla 11. Variables para el dimensionamiento del cuarto de almacenamiento	76
Tabla 12. Variables para el dimensionamiento del tanque de agitación	77
Tabla 13. Variables para el cálculo del número de Reynolds	78
Tabla 14. Variables para el cálculo de la potencia del agitador	79
Tabla 15. Variables para el dimensionamiento del filtro de separación	79
Tabla 16. Variables para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento	80
Tabla 17. Variables para el dimensionamiento del Molino Triturador	81
Tabla 18. Variables para el dimensionamiento del Horno Industrial	81
Tabla 19. Variables para el dimensionamiento de la lavadora general	82
Tabla 20. Características principales dimensionamiento de equipos	82
Tabla 21. Variables para el dimensionamiento del cuarto frío	83
Tabla 22. Valores de transferencia a través de las paredes	84
Tabla 23. Costo de materia prima	85
Tabla 24. Costo total mano de obra	86
Tabla 25. Costo total servicio energético	87
Tabla 26. Costo total de producción	88
Tabla 27. Costo equipos	89
Tabla 28. Costo total inversión	90

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Usos de la moringa	28
Figura 2. Coagulación / Floculación de una Suspensión Coloidal	33
Figura 3. Esquema del mecanismo de coagulación, neutralización de carga.	37
Figura 4. Semillas de moringa	40
Figura 5. Diagrama de diseño del proceso experimental	43
Figura 6. Descascarado de la materia prima	46
Figura 7. Lavado y secado de la materia prima	47
Figura 8. Proceso de triturado y tamizado	47
Figura 9. Extracción de aceite de moringa	48
Figura 10. Resultado polvo de la extracción	49
Figura 11. Rotavapor Heidolph	49
Figura 12. Preparación coagulante	50
Figura 13. Proceso de filtrado coagulante con aceite	51
Figura 14. Proceso de filtrado coagulante sin aceite	51
Figura 15. Montaje experimental	53
Figura 16. Resumen del diseño experimental multinivel	56
Figura 17. Sedimentación agua residual sintética	58
Figura 18. Intervalos de porcentaje de remoción vs Dosis	61
Figura 19. Diagrama de Pareto para el efecto estandarizado de los factores	62
Figura 20. Desarrollo Análisis de Varianza	62
Figura 21. Valores del modelo aplicado	64
Figura 22. Montaje experimental agua textil	65
Figura 23. Ensayo de jarras del agua residual doméstica.	68
Figura 24. Diagrama de entradas y salidas	72
Figura 25. Etapas de operación	73
Figura 26. Diagrama de bloques	74
Figura 27. Diagrama de unidades y corrientes	75
Figura 28. Dimensionamiento cuarto de almacenamiento	76
Figura 29. Filtro de placas horizontales	80
Figura 30. Turbidímetro Lovibond TB 300 IR	99
Figura 31. pH metro digital inoLab 7310	100

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Principales efectos para el porcentaje de remoción.	57
Gráfica 2. Curva de pH con extracto de moringa	59
Gráfica 3. Curva de turbidez con extracto de moringa	60
Gráfica 4. Comparación entre el pH final e inicial en agua tipo textil	66
Gráfica 5. Comparación turbidez final e inicial en agua textil	67
Gráfica 6. Comparación turbidez final e inicial en agua doméstica	69
Gráfica 7. Comparación entre el pH final e inicial en agua doméstica	69

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Índice de remoción de turbidez	45
Ecuación 2. Concentración coagulante	50
Ecuación 3. Dosis de coagulante	53
Ecuación 4. Ecuación del modelo aplicado	63
Ecuación 5. Número de Reynolds	78
Ecuación 6. Potencia agitador	78
Ecuación 7. Tasa de calor	84
Ecuación 8. Costo total materia prima	85
Ecuación 9. Costos energéticos	87
Ecuación 10. Costos de producción	88
Ecuación 11. Precio de venta	88

RESUMEN

En el tratamiento de aguas residuales, la coagulación representa un alto nivel de importancia y para llevar a cabo este proceso se requiere del uso de coagulantes que en la actualidad son generalmente de origen químico, sin embargo, agentes como el sulfato de aluminio traen consigo afectaciones en la salud humana y el ecosistema. Por esta razón, se debe tener a disposición diferentes alternativas para encontrar compuestos o sustancias que provean remociones comparables con las sales metálicas, así como los agentes naturales. En el presente trabajo de grado, se evidencia la acción coagulante de la semilla de *Moringa Oleífera* y las especificaciones técnicas de los equipos para la elaboración del coagulante a nivel industrial. La semilla se evaluó con y sin la extracción de su aceite mediante un equipo soxhlet, debido a que su porcentaje oleaginoso podría reducir la formación de flóculos. Adicionalmente, para determinar la capacidad de remoción de la moringa, se preparó agua residual sintética con una turbidez inicial de 277 NTU a diferentes dosis y valores de pH (ácido, neutro y alcalino), donde a través de un diseño de experimentos se determinó que la interacción entre ellos influye en la turbidez final y con base en los resultados se seleccionó el coagulante sin extracción de aceite y se obtuvo una dosis óptima de 40 mg/L a pH 7. Posteriormente, se realizaron pruebas en fuentes hídricas tipo textil y residual doméstica con una turbidez inicial de 72.9 y 34.9 NTU respectivamente, en las cuales se ha comprobado la existencia de una gran cantidad de materia orgánica y contaminantes químicos; En comparación con el sulfato de aluminio, se obtuvieron porcentajes de remoción de 65.89% para el agua textil y 62.18% para el agua residual doméstica. Se concluye que la semilla de *Moringa Oleífera* tiene una capacidad de remoción relativamente alta con resultados promisorios que se representan en los bajos valores de turbidez final.

PALABRAS CLAVE: Aguas Residuales, Coagulante, Dosificación, *Moringa Oleífera*, Tratamiento, Sulfato de Aluminio.

ABSTRACT

In the treatment of wastewater, coagulation represents a high level of importance and to carry out this process requires the use of coagulants that are usually of chemical origin, however, agents such as aluminum sulfate bring affectations in human health and the ecosystem. For this reason, different alternatives must be available to find compounds or substances that provide comparable removals to metal salts, as well as natural agents. In the present grade work, the coagulant action of the Moringa Oleífera seed and the technical specifications of the equipment for the preparation of the coagulant at the industrial level is evidenced. The seed was evaluated with and without the extraction of its oil by a soxhlet equipment, due to its oil percentage it could reduce the formation of flocs. In addition to determine the moringa removal capacity, synthetic waste water was prepared with an initial turbidity of 277 NTU at different doses and pH values (acid, neutral and alkaline), where through an experiment design it was determined that the interaction between them influences the final turbidity and based on the results the coagulant was selected without oil extraction and a dose was obtained at an optimal dose of 40 mg/L at pH 7. Subsequently, tests were carried out on textile and domestic wastewater sources with an initial turbidity of 74.9 and 34.9 NTU respectively, in which the existence of a large amount of organic matter and chemical contaminants has been proven; compared with aluminum sulfate, removal percentages were obtained for textile water 65.89% and 62.18% for domestic wastewater. It is concluded that the Moringa Oleífera seed has a relatively high removal capacity with promising results that are represented in the low final turbidity values

KEY WORDS: Wastewater, Coagulant, Dosing, Moringa Oleifera, Treatment, Aluminum Sulfate

INTRODUCCIÓN

El agua es el principal compuesto en la constitución humana, la calidad de vida depende en gran parte de ella. En la actualidad, los contaminantes que se encuentran en el agua son más de origen antrópico o químico que orgánico, provocando una degradación en el recurso a tal punto de no ser apto para el consumo humano o para otro tipo de actividades, generalmente agroindustriales. Los efluentes industriales se caracterizan por tener una composición muy diversa y compleja debido a la materia prima e insumos que se utilizan y que proporcionan características particulares en cada tipo de agua.

Esta es una de las razones por la cual se hace necesario el tratamiento del agua contaminada a través de procesos como la coagulación-floculación. Actualmente, existen diferentes agentes químicos que permiten llevar a cabo este propósito, entre los más utilizados se encuentran el sulfato de aluminio, cloruro férrico, el policloruro de aluminio entre otros.¹

Dichos agentes son utilizados en la clarificación del agua gracias al efecto que tienen sobre la turbidez, sin embargo, presentan una gran dificultad y es la generación de lodos tóxicos. A partir de esta y otras problemáticas se han venido desarrollando diversas propuestas que servirán finalmente como un referente para poder implementar coagulantes de origen natural en el tratamiento de aguas como alternativa de las sales de aluminio que se usan convencionalmente en las plantas de tratamiento industrial y doméstico del país.

El proyecto tiene como objetivo general elaborar un coagulante a partir de la semilla de Moringa Oleífera y evaluar su acción coagulante por medio del porcentaje de remoción de la carga contaminante en muestras de aguas residuales de tipo textil y domésticas en la ciudad de Bogotá. Para el cumplimiento de los diversos objetivos propuestos se dividirá el proyecto en cinco capítulos, los cuales son: introducción y planteamiento del problema, antecedentes, metodología, resultados y análisis, y por último conclusiones y recomendaciones.

¹ CARRASQUERO. et. al, 2015

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener un coagulante orgánico a base de la semilla de moringa para la empresa comercial Dacetex Ltda.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar el método de obtención del coagulante a base de la semilla de moringa.
2. Determinar la acción coagulante de la semilla de moringa por medio de un desarrollo experimental a nivel de laboratorio.
3. Establecer las especificaciones técnicas del método de obtención seleccionado.
4. Determinar los costos asociados del método seleccionado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El agua es el elemento más abundante del planeta, puesto que abarca aproximadamente 1,390 millones de Km³, sin embargo, únicamente el 2.5% del total es agua dulce y de esta cifra tan solo el 0.26% está disponible para el uso del ser humano²; La preservación de este recurso es indispensable, puesto que al ser de carácter vital debe cumplir con ciertos niveles permitidos, tanto físicos como químicos para poder ser consumida por el ser humano; Por lo tanto, al no ser totalmente pura contiene partículas en suspensión que deben ser removidas para mejorar la calidad del agua y ayudar con la prevención de enfermedades.

Para la remoción de los agentes contaminantes presentes en el agua, se realiza un tratamiento primario en el cual se incluyen procesos físicos y químicos como la sedimentación, coagulación y floculación. En el proceso de coagulación, generalmente se utilizan agentes químicos como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, los cuales logran un 90-99% de remoción microbiológica³, sin embargo, generan problemas a nivel económico, social y ambiental, pues el coagulante que no alcanza a reaccionar altera las características naturales de las fuentes hídricas y produce entre un 60-70% de lodos tóxicos⁴.

Comercial DACETEX LTDA, es una empresa encaminada a la solución de las necesidades de la Industria textil, mediante el desarrollo de productos de calidad que sean amigables con el medio ambiente; entre sus principios resaltan la continua investigación e innovación de sus productos para aumentar la eficiencia y el compromiso con el entorno al incluir estrategias que minimicen el impacto ambiental⁵. Por esta razón, la empresa busca encontrar nuevas y eficientes alternativas como la semilla de moringa, que no solo brindan la posibilidad de mejorar la calidad del agua sino también romper el paradigma de la exclusividad de los productos químicos industriales como coagulantes. De esta manera, se abren las puertas a la posibilidad de nuevas tecnologías de bajo costo, respetuosas con el medio ambiente e inocuas para la salud humana⁶.

En la actualidad, se ha potencializado el desarrollo de coagulantes de origen natural por ser biodegradables y seguros para la salud humana, pues producen cantidades

² HIRIART, Marisa. Instituto de Ecología de la UNAM- Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2003.

³ MILLER, John A. 2008 Wiley Periodicals, Inc.

⁴ ARBOLEDA, Valencia ed. Acodal, 1992. Colombia.

⁵ LTDA., D. (03 de mayo de 2019). Dacetex. Obtenido de <http://www.dacetex.com/nosotros/nosotros.html>

⁶ ARCILA, H. R., & Peralta, J. J. (21 de junio de 2015). AGENTS AS NATURAL ALTERNATIVE FOR WATER TREATMENT. Bogotá, Colombia.

de lodo que van entre el 20-30% aproximadamente, cantidad que es mucho menor que la generada por agentes metálicos, como el alumbre⁷. La moringa (*Moringa Oleífera*) es un agente natural que ha sido ampliamente estudiado para el desarrollo de coagulantes debido al gran potencial que representa en los procesos de coagulación, el cual contiene un componente activo que actúa como un polielectrolito catiónico natural que permite la remoción de las partículas coloidales en las aguas contaminadas⁸. Adicionalmente, la semilla es muy versátil, puesto que, al extraer sus aceites esenciales, se puede aprovechar la torta residual del proceso para este propósito.

Existen otros agentes naturales como diferentes tipos de cactus, el nopal, semilla de tamarindo, almidón, residuos de café, entre otros, que también han sido objeto de estudio, pero su efecto coagulante se limita a valores de turbidez entre 17.5 y 300 NTU⁹. No obstante, la semilla de moringa ha demostrado una actividad coagulante comparable con el sulfato de aluminio¹⁰, no altera las propiedades del agua tratada y se pueden llegar a obtener altos porcentajes de remoción de turbidez en soluciones con cloruro de sodio y agua de mar para valores de turbidez de hasta 1500 NTU¹¹.

De acuerdo con el planteamiento anterior, se expone la pregunta principal:

¿Cuáles son los determinantes asociados a la semilla de moringa oleífera para la aplicación en coagulantes orgánicos?

Para resolver el problema principal de esta investigación, se deben tener en cuenta los siguientes interrogantes:

¿Cuál es el mejor método para la producción de un coagulante a partir de la semilla de moringa?

⁷ SCIBAN M, KLASNJA M, ANTOV M, y SKRBIC B. 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn, *Bioresource Technology*, 100: 6639 – 6643.

⁸ PRITCHARD, M. T. C. (23 July 2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water- An alternative sustainable solution for developing countries. United Kingdom.

⁹ RAMÍREZ ARCILA, Hildebrando J. J. (21 de Julio de 2015). AGENTES NATURALES COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA. *Facultad de ciencias básicas*, 136-156.

¹⁰ RIDWAN M. F., WAHIDATUL A. Z. N., PANG C. P., NASRUL H. (2011). Mechanism of Turbidity and Hardness Removal in Hard Water Sources by using *Moringa Oleifera*. *Revista de Ciencias Aplicadas*,

¹¹ RAMÍREZ ARCILA, Hildebrando J. J. (21 de Julio de 2015). AGENTES NATURALES COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA. *Facultad de ciencias básicas*, 136-156.

¿Cuál sería la acción coagulante de la semilla de moringa en muestras de aguas residuales?

¿Qué aspectos se deben tomar en cuenta para producir el coagulante a partir de la semilla de moringa a nivel industrial?

¿Cuáles serían los costos del método de producción de coagulante seleccionado?

1.2 JUSTIFICACIÓN

Colombia al ser un país en vía de desarrollo, aún no cuenta con la facilidad económica para implementar nuevas alternativas en pro de mejorar el tratamiento de aguas residuales¹², lo que provoca que el uso de coagulantes metálicos predomine y en consecuencia a la baja biodegradabilidad que poseen en el agua y en el suelo representan un problema para la salud y el medio ambiente al producir lodos suspendidos con altos niveles de toxicidad, enfermedades como el Alzheimer y, además, otros estudios han reportado que sus residuos pueden ser carcinógenos¹³; Adicionalmente, el lodo presenta una mayor dificultad en cuanto al manejo que se le debe dar.

La empresa comercial Dacetex Ltda resalta que la responsabilidad ambiental recae tanto en los individuos como en las empresas, por esta razón, están comprometidos con el entorno al incluir estrategias que minimicen el impacto ambiental¹⁴. Actualmente, Dacetex busca ampliar su portafolio y aumentar sus ingresos con el desarrollo de coagulantes orgánicos a partir de la semilla de moringa, una alternativa más ecológica y sostenible frente a los coagulantes inorgánicos convencionales. Los agentes naturales, como la moringa, permiten disminuir los efectos nocivos ocasionados por el uso de metales al no modificar las características del agua a tratar y mediante diferentes métodos de producción se puede generar un coagulante que en comparación con los anteriormente mencionados sea más favorable. Asimismo, el producto estará enfocado no solo hacia la industria textil sino a todas aquellas industrias que estén interesadas en disminuir el impacto ambiental.

Las investigaciones basadas en el uso de coagulantes orgánicos para el tratamiento de aguas han demostrado a través de la experimentación que se pueden obtener altas remociones de agentes contaminantes con bajas dosis de agentes naturales,

¹² MARIA JULIANA LOPERA GOMEZ, S. M. (2012). Ais uniwater. Obtenido de http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/COLOMBIA.pdf

¹³ SANGHI, R.; BHATTACHARYA, B.; DIXIT, A. & SINGH, V (2006). Ipomoea dasysperma seed gum: an effective natural coagulant for the decolorization of textile dye solutions. *Journal of Environmental Management*, 81(1), 36-41.

¹⁴ LTDA., D. (03 de mayo de 2019). Dacetex. Obtenido de <http://www.dacetex.com/nosotros/nosotros.html>

dentro de esta denominación se encuentra la semilla de moringa oleífera, la cual contiene una proteína soluble (MOC-SC-PC) que actúa como un polielectrolito catiónico natural y causa la coagulación del agua mediante mecanismos de parche electrostático¹⁵. Se tiene en cuenta que el proyecto evaluará la acción coagulante de la semilla en diferentes tipos de aguas residuales, delimitándose a determinar la influencia de la dosis y pH sobre la turbidez final.

La ingeniería química como disciplina provee conocimientos en procesos, equipos y tecnologías para la producción de coagulantes que tengan la capacidad de remover los agentes contaminantes en el agua, es por esto, que el papel del Ingeniero Químico es fundamental, pues tiene la capacidad de proponer la manera adecuada en la que el proceso se puede llevar a cabo, conoce las operaciones unitarias que se necesitan, los diferentes tipos de reactores y los balances de materia para cada uno de los equipos, además de establecer las especificaciones técnicas del método, para transformar la semilla de moringa en un coagulante orgánico de uso comercial.

1.3 ANTECEDENTES

En el trabajo de grado “Métodos de extracción de aceite esencial de la semilla de moringa (Moringa Oleífera)” realizado por Maylin Zulema Valencia Oseida en la Universidad Rafael Landívar en el año 2018, ejecutó una propuesta detallada de diversos métodos de extracción para la obtención de aceites y proteínas esenciales de la semilla de moringa, por el cual se realizó un estudio con tres métodos los cuales fueron extracción Soxhlet la cual género ventajas por su efectividad y buen rendimiento con un alto porcentaje de contenido graso en la muestra, Arrastre por Vapor que cuenta resultados favorables a pesar de del largo tiempo en su desarrollo, de aproximadamente 18 horas y la Prensa Manual que contó con la utilización de la semilla y sus residuos; como lo son la cáscara y cortezas, siendo el proceso menos efectivo debido a sus resultados de rendimientos debido a la baja cantidad de aceite obtenido. De esta manera el trabajo mencionado proporciona una guía técnica y estructurada de procedimientos y parámetros de elección a los procesos de extracción y un aporte significativo en la determinación de resultados favorables con índices de costos en el proceso productivo de los diversos métodos estudiados.

En el proyecto de grado "Eficiencia de los Biocoagulante a base de semilla de Moringa Oleífera para aplicación de tratamiento de agua usando como fuente de captación el río Guayas" realizado por Danya Melany Tumbaco Talledo y Kevin

¹⁵ PRITCHARD, M.; CRAVEN T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S. & O'NEILL, J. G. (2010a). A study of the parameters affecting the effectiveness of Moringa oleifera in drinking water purification. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 791-797.

Marlon Acebo en la Universidad de Guayaquil en el año 2017, se realiza un estudio en el que se investigó la efectividad de la semilla de moringa como Biocoagulante en el tratamiento de agua, donde se comprobaron los componentes activos responsables del mecanismo de coagulación/floculación al analizar las muestras antes y después del tratamiento con el Biocoagulante de Moringa Oleífera para diferentes parámetros (Turbidez, Color, pH) y encontrando la dosis óptima y el mejor tiempo de respuesta a través de un test de jarras. Entre los resultados obtuvieron una remoción del 100% en turbidez y color de la muestra.

De esta manera el trabajo mencionado proporciona un conocimiento claro de los componentes activos en la semilla de moringa que logran el proceso de coagulación, y abarca un procedimiento de uso de parámetros definidos para encontrar la dosis adecuada en un tiempo de respuesta representativo.

“Empleo de semillas de moringa oleífera en el tratamiento de residuales líquidos” de Maylín Rondón Macías, Yosvany Díaz Domínguez, Susana Rodríguez Muñoz, Beatriz Guerra Álvarez, Elina Fernández Santana, Danger Tabio García publicado en la biblioteca electrónica “SciELO” en el año 2017, se caracterizó el coagulante en base de estudios y experimentación, con parámetros físicos como granulometría y se determinaron rangos de pH para la utilización efectiva de coagulante orgánico a partir de la extracción de aceites, con el uso del test de jarras de contenido de 600 ml de agua residual, con un agitador múltiple. En la presente investigación, el artículo brinda una alternativa para la comparación de valores de agua residual inicial, con los obtenidos después del proceso de coagulación, partiendo de diferentes modelos de procesos de extracción de aceite en las semillas de moringa oleífera para la determinación de la mejor dosis y efectividad para clasificaciones como los máximos permisibles promedios en tratamientos de agua.

En el artículo “Caracterización de aceites de las semillas de Moringa Oleífera a partir de la extracción por diferentes métodos” de Diana Gómez Mitjans, Vicenta Pita Bravo y Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas publicado en la revista colombiana de biotecnología de la Universidad Nacional en el año 2016, se desarrolló un diseño experimental de multinivel factorial, donde $k=3$, con factores considerados como el tipo de disolvente, tiempo de extracción y el tamaño de partícula. Los niveles de tiempo de extracción son de 4 y 6 horas, los disolventes utilizados son el hexano y el etanol y los niveles de partícula fueron de menor - mayor a 0.315 mm. En la presente investigación, el artículo brinda variables de porcentaje de extracción de aceite, teniendo en cuenta la composición de los aceites por métodos de cromatografía y determinación de ácidos grasos totales y nos indica el valor de rendimiento y tiempo que se puede tener en cuenta, con varios tipos de disolventes y métodos desarrollados.

“Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión” de Luis Guzmán, Ángel Villabona, Candelaria Tejada y Rafael García publicado en la biblioteca electrónica “SciELO” en el año 2013, se desarrollaron ensayos de laboratorio con los extractos de: Moringa oleífera, Jatropha curcas y Goma de guar. Los extractos fueron agregados a las muestras de agua obtenidas de cinco pozos poco profundos en Malawi. Los ensayos consistieron en ensayos de jarras para evaluar el potencial de la coagulación y evaluando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los extractos demostraron mejores resultados en las aguas más turbias. Una reducción en coliformes era alrededor de 80 para todos los extractos. El artículo brinda las alternativas claras y detalladas, al proceso de evaluación de potencial de coagulación con una eficiencia de remoción superior al 90% con niveles de turbidez mayores a (49 NTU) con el uso en dos fuentes de agua; agua híbrida y agua de río, siendo realizado todo el proceso en mecanismos de prueba de jarras y variando la dosificación en un rango de 50 – 100 mg/L.

En el artículo Moringa Oleífera un árbol con enormes potencialidades de Geoff Folkard y John Sutherland, publicado en la revista “Agroforestry Today” en el año 2010, se desarrolló un tratamiento prototipo para la purificación de agua de río, en el cual la planta se instaló en la región de Nsanje, Malawi. En la presente investigación, el artículo brinda una alternativa clara del efecto de la extracción del aceite que contiene todos los ingredientes activos que logran el efecto coagulante, con cantidades de semilla de Moringa Oleífera en un rango de 75 a 250 mg/L, además identifica que en la comparación de coagulantes, los coagulantes de tipo químico como lo es el alumbre, utilizado actualmente se desempeña bien solo en ciertos rangos de pH, pero el coagulante orgánico desarrollado se desempeña bien independientemente del pH del agua. Esto determina una ventaja para producción de coagulantes orgánicos con utilización en diferentes zonas con un control efectivo del pH previo a la coagulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MORINGA

La moringa es una planta originaria del sur del Himalaya, Bangladesh, Afganistán, Nordeste de la India y Pakistán. El árbol de moringa alcanza hasta los 10 m de altura, es de fácil cultivo y se extiende mayoritariamente en partes de África e India. Actualmente se identifican hasta 14 especies diferentes¹⁶, los cuales producen semillas en vainas con una longitud entre los 150 y 1200 mm entre especie y ubicación. Se encuentra diseminada en una gran parte del planeta. En América Central fue introducido en los años 1920 como planta ornamental y para cercas vivas, se encuentra en áreas desde el nivel del mar hasta los 1800 metros. La calidad de las semillas de moringa puede variar entre las vainas de la misma longitud y se ha demostrado que las semillas individuales varían en peso entre 150 y 300 mg¹⁷.

Las hojas tienen cualidades nutritivas sobresalientes con un contenido de proteína del 27%, además de cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, así como vitamina A Y C. Todas estas cualidades son de gran importancia en la seguridad alimentaria que se ve amenazada por largos periodos de sequía, pues las hojas de moringa pueden cosecharse en estas épocas cuando no hay vegetales frescos disponibles. A comparación la semilla indica un perfil de ácido graso del 73% de ácido oleico, indicando el mismo nivel de cantidad y distribución que el aceite de oliva¹⁸.

2.2 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN

Propagación vegetativa: es el principal método de propagación de diferentes cultivos florícolas, el cual comienza con la cosecha de las estacas en un sustrato adecuado y otorgándoles las condiciones ambientales óptimas para que regeneren nuevas raíces y produzcan una nueva planta¹⁹. Las estacas de moringa son cortadas a finales de la época de sequía, puesto que presentan un prendimiento del 95% y una supervivencia del 90%²⁰.

¹⁶ JAHN, S.A.A. (1988) Using Moringa oleifera Lam. Seeds as Coagulant in Developing Countries. Journal of the American Water Works Association, 6, 43-50

¹⁷ JAHN, S. A. (1989). Moringa Oleifera for food and water purification - selection of clones and growing of annual short stem. *Entwicklung + Landlicher Raum*, 23(4), 22-25

¹⁸ SUTHERLAND, John. (1998) "Workforce reduction strategies: an empirical examination of the options", Employee Relations, Vol. 20 Issue: 2, pp.148-163

¹⁹ SISARO, D., & HAGIWARA, J. C. (2016). Propagación vegetativa por medio de estacas de tallo. Buenos Aires.

²⁰ CASTELLANOS LOPEZ, D. J., & JIMENEZ BARRERA, O. A. (2015). Análisis de viabilidad técnico financiera para el cultivo de la planta de Moringa Oleifera en el municipio de Cumaral- Meta. Villavicencio.

Semilla sexual: la siembra de cultivo con semillas gámicas presenta ventajas sobre la propagación vegetativa con estacas. Este tipo de propagación depende principalmente de la formación de gametos seguida por la fecundación en las plantas con flor. En el caso de la moringa, el peso promedio de cada semilla es de 0.3- 0.4 g, lo que significa que hay aproximadamente 300 semillas por kg²¹.

2.3 CULTIVO DE MORINGA

La moringa es una especie que no es exigente en cuanto a las condiciones agroambientales para establecerse. La planta puede cultivarse como monocultivo o en conjunto con especies como leucaena y guácima, cultivos de cereales o gramíneas. A continuación, se muestran algunas de las condiciones en las que se puede cultivar la moringa:

Siembra: suelo/ bolsas de vivero.

Propagación: semillas/ estacones. Cuando se busca obtener mayor producción de frutos y raíces es más recomendable la propagación a partir de estacones.

Área de cultivo:

Para jardín: 5x10 cm o 20x20 cm

Para cultivos más grandes: se recomienda un espacio entre planta de 75x100cm.

Cosecha y producción. La moringa se caracteriza por su buen crecimiento y producción. El ABC del finkero, recomienda que: la primera cosecha de hojas se puede hacer a los dos meses y medio después de sembrada. Los intervalos de corte recomendados fluctúan entre 15 y 75 días, dependiendo de las condiciones agroambientales. La producción, al primer corte puede fluctuar entre 27 y 120 toneladas por hectárea de materia verde. Mayores tasas de crecimiento y producción se pueden obtener en condiciones secas usando fertilizantes y riego²².

2.3.1 Cultivo de moringa en Colombia. Colombia es uno de los países de Latinoamérica con mayor potencial para el desarrollo de áreas de cultivo, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, un punto a favor que le permite convertirse en una de las grandes despensas del mundo²³.

²¹ CASTELLANOS LOPEZ, D. J., & JIMENEZ BARRERA, O. A. (2015). Análisis de viabilidad técnico financiera para el cultivo de la planta de Moringa Oleífera en el municipio de Cumaral- Meta. Villavicencio.

²² FINKEROS, Moringa: Cultivo y aprovechamiento, 2015

²³ RODRÍGUEZ, Diana (2018). Plan exportador de Moringa como suplemento alimentario para bovinos, hacia el mercado americano "Texas". Universidad de Santander UDES.

El potencial de expansión del área agrícola del país, sin afectaciones en el área del bosque natural, lo posiciona de puesto 25 de los 223 países que han sido evaluados, puesto que los 22 millones de hectáreas cultivables, solamente están sembradas 4.8²⁴.

Capacidad de producción de moringa en Colombia: cuando se siembra moringa como árbol para la producción de semillas, en el primer año se pueden obtener aproximadamente 1,000 kg por hectárea, en el segundo 2,000 kg y a partir del tercer año se producen 3,000 kg por hectárea hasta la finalización de su vida útil de 25 años²⁵.

En Colombia, se pueden encontrar cultivos de moringa en el departamento de Nariño, los corregimientos de Arroyo Grande, Arroyo de Piedra y Pasacaballos en Cartagena, norte del Tolima, entre otros. La moringa se adapta bien en las regiones secas del trópico, es una gran reserva de agua en épocas de sequía.

La productividad de la moringa en los últimos años se ha estado incrementando en las zonas de cultivo así como su producción neta. En el 2016, fue de 3,190 hectáreas con una producción de 15658 toneladas a lo largo del país, siendo la zona Andina, Arauca y Magdalena las de mayor potencial de cultivo²⁶.

2.4 USOS DE LA MORINGA

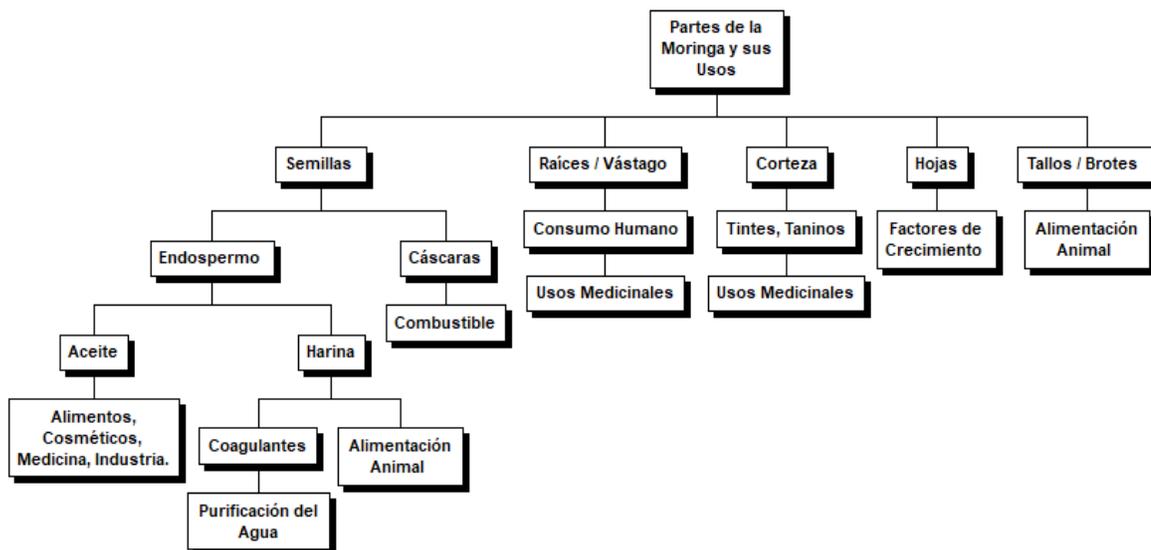
En la figura 1 se pueden observar los diferentes usos que tiene la moringa de acuerdo con cada una de sus partes.

²⁴ RODRÍGUEZ, Diana (2018). Plan exportador de Moringa como suplemento alimentario para bovinos, hacia el mercado americano "Texas". Universidad de Santander UDES.

²⁵ RODRÍGUEZ, Diana (2018). Plan exportador de Moringa como suplemento alimentario para bovinos, hacia el mercado americano "Texas". Universidad de Santander UDES.

²⁶ MINISTERIO DE AGRICULTURA COLOMBIA 2016.

Figura 1. Usos de la moringa



Fuente: TORAL, O., REINO, J., SANTANA, H., & CEREZO, Y. (2013). Caracterización morfológica de ocho procedencias de *Moringa oleífera* (Lam.) en condiciones de vivero. *Pastos y Forrajes*, 36(4), 409-416.

2.5 ACEITES ESENCIALES

Aceites esenciales se dieron a conocer en occidente alrededor del año 485 a.C, comenzado en los tejidos vegetales que contenían propiedades específicas de la planta de donde son obtenidos.

Un aceite esencial es un aceite volátil que se obtiene por medio de destilación por vapor de un tipo de materia prima, cada uno de estos se evapora a diferentes velocidades bajo una temperatura promedio y una presión atmosférica²⁷.

Las semillas de *Moringa Oleífera* presentan aceites comestibles y sustancias solubles en agua que logran determinar esta materia prima natural como el coagulante más estudiado y de mayor rendimiento en extracción de aceite²⁸. Los residuos de la extracción del aceite de las semillas se logran utilizar en posteriores procesos productivos como la adecuación del suelo o fertilizante, con un gran potencial de ser suplementos alimenticios avícolas y ganaderos. Las hojas verdes

²⁷ GÜNTHER, E. (1948) the essential oils History and origin in plants production analysis. Krieger Publishing, New York, 235-240

²⁸ YIN, C.Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochem.* 45:1437-1444. ünther, E. (1948) the essential oils History and origin in plants production analysis. Krieger Publishing, New York, 235-240

constituyen una parte muy útil y las semillas pulverizadas se utilizan en ungüentos/pomadas para el tratamiento de infecciones dermatológicas.

2.5.1 Métodos de extracción: aceites esenciales. En cuanto a los métodos de extracción, existen diferentes maneras de desarrollar el coagulante, ya sea a partir del aceite o directamente con el polvo de la semilla. Entre los métodos más utilizados encontramos:

- Extracción por prensado en frío: es un método de extracción de aceites exclusivamente mecánico que trabaja con bajas temperaturas con el fin de conservar la proporción de ácidos grasos esenciales que contienen los aceites. La técnica del prensado se utiliza para obtener el aceite esencial de cortezas, cáscaras, semillas etc.

Las semillas, con cáscara incluida, pasan por una prensa de baja presión manteniendo una temperatura interior por debajo de los 40 grados centígrados, al extraerse el aceite, se bombea a través de un sistema de filtración²⁹.

- Extracción Soxhlet: es una técnica de separación sólido- líquido utilizado comúnmente para la determinación del contenido graso de muestras de diferente naturaleza. Este sistema se fundamenta en la extracción del componente activo mediante el uso de solventes químicos en un balón aforado para su evaporación y desengrasado³⁰.

Según Grau, (1982), su funcionamiento consiste en hacer hervir en el matraz el disolvente con el cual se va a extraer la materia sólida deseada que se encuentra en la muestra depositado en el cartucho del Soxhlet. Los vapores del disolvente ascienden por el extractor y se condensan en el refrigerante cayendo gota a gota sobre el cartucho.

- Extracción por arrastre de vapor: es un tipo de destilación que se utiliza para separar sustancias orgánicas insolubles en agua, ligeramente volátiles de otras no volátiles, de igual manera, es una técnica que se usa frecuentemente para la separación de aceites esenciales en tejidos orgánicos. El funcionamiento del método consiste en colocar en un recipiente el agua y el material a extraer, se calientan a ebullición y el aceite extraído es arrastrado junto con el vapor de agua

²⁹ ENGINEERING, K. (s.f.). Extracción con solventes. Obtenido de <http://www.plantasaceiteras.com/procesos-de-extraccion-por-solventes.html>

³⁰ NÚÑEZ, C. E. (2008). Extracciones con Soxhlet, Buenos Aires, Argentina. OSEIDA, M. Z. (octubre de 2018). MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE LA SEMILLA DE MORINGA (Moringa Oleífera). Universidad Rafael Landívar.

hacia un condensador que enfría la mezcla, la cual es separada posteriormente para obtener el producto deseado³¹.

- Extracción por fluidos supercríticos: consiste en utilizar como material de arrastre sustancias químicas en condiciones especiales de temperatura y presión. El material vegetal, se empaca en una cámara de acero inoxidable por donde se hace circular un líquido supercrítico. Los aceites esenciales se solubilizan y el líquido supercrítico que actúa como solvente extractor se elimina por descompresión progresiva hasta alcanzar la presión y temperatura ambiente. Finalmente se obtiene un aceite puro³².

La EFS es una alternativa interesante para la obtención de aceites vegetales, ya que no presenta los inconvenientes de los disolventes orgánicos tradicionales y por las ventajas que ofrece el CO₂ supercrítico, mencionadas anteriormente, principalmente la calidad de aceite obtenido por esta tecnología³³.

- Extracción por solventes: según KMEC engineering, la extracción por solventes es un proceso que implica la extracción de aceite de los materiales que lo contienen mediante el tratamiento con disolventes. Con el método de extracción con disolventes se recupera casi todo el aceite, dejando tras de sí solo del 0.5% al 0.7% de aceite residual en la materia prima³⁴.

2.6 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTE

- Extracción acuosa: Es un método de extracción que, utiliza agua destilada para preparar una solución con la harina de la semilla previamente triturada y extrae el componente activo de la misma.
- Extracción salina: Técnica sencilla que utiliza una solución de cloruro de sodio para extraer el componente activo de la semilla con la cual se trata. Se ha demostrado que la fuerza iónica de la solución mejora la eficiencia de la extracción del producto de interés. Para llevar a cabo este tipo de extracción, la semilla es previamente triturada.

³¹ O., REINO, J., SANTANA, H., & CEREZO, Y. (2013). Caracterización morfológica de ocho procedencias de Moringa oleífera (Lam.) en condiciones de vivero. Pastos y Forrajes, 36(4), 409-416

³² SENA. (2018). INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA DE LOS ACEITES ESENCIALES DE PLANTAS MEDICINALES Y AROMÁTICAS. Obtenido de https://repositorio.sena.edu.co/sitios/introduccion_industria_aceites_esenciales_plantas_

³³ MANGOLD, 1983, citado por Velasco, Villada y. Carrera, 2007

³⁴ ENGINEERING, K. (s.f.). Extracción con solventes. Obtenido de <http://www.plantasaceiteras.com/procesos-de-extraccion-por-solventes.html>

2.7 AGUA

El agua es un compuesto químico que se forma a partir de la unión de un átomo de hidrógeno y dos de oxígeno mediante enlaces covalentes, el agua es el elemento más abundante en el globo terráqueo y el más importante para los organismos vivos.

Es un líquido incoloro, inoloro e insípido que es denominado el solvente universal, ya que es capaz de disolver una gran variedad de sustancia al entrar en contacto con ellas, sin importar el estado en el que se encuentren, formando coloidales, iones complejos o partículas disueltas que varían de acuerdo con el peso y tamaño³⁵.

2.7.1 Contaminación del agua. El agua contaminada es hoy en día un problema que acarrea no solo afectaciones en la salud humana sino también tiene un impacto negativo en los ecosistemas marinos, la flora y la fauna. Se denomina contaminación a cualquier cambio químico, físico o biológico que afecta la calidad del agua.

A partir de eso, se identifican tres tipos de contaminación:

- Físicos: variación en el color, sabor, olor, turbidez, temperatura.
- Químicos: orgánicos e inorgánicos.
- Biológicos: presencia de microorganismos patógenos.

Existen ciertas características fisicoquímicas y biológicas que determinan la calidad del agua puesto que afectan las condiciones estéticas del agua y su aceptabilidad. Dentro de los principales están la turbidez, el color, el olor y sabor, DBO, DQO³⁶.

En el trópico las principales poblaciones utilizan los ríos como fuente de agua. El agua de los ríos puede estar muy turbia y contaminada, sobre todo en la estación lluviosa cuando se remueven los sedimentos fluviales y quedan en suspensión junto con pasos de agua que transportan material de corte de árboles, bacterias y microorganismos. En esencia, en los procesos de purificación se quiere lograr eliminar la mayor cantidad de estos materiales antes de que la fuente hídrica pase a la etapa de desinfección, para eliminar el material sólido se utilizan coagulantes que se adicionan a la fuente, normalmente se utilizan productos químicos como el sulfato de aluminio o Polielectrolitos sintéticos.

³⁵ Cánepa de Vargas, Lidia; Maldonado, Víctor; Barrenechea, Ada; ... Lima. ; CEPIS. ; 2004. , I. 306. p. Ilus. /tab. (OPS/CEPIS/PUB/04.109.)O., Reino, J., Santana, H., & Cerezo, Y. (2013). Caracterización morfológica de ocho procedencias de *Moringa oleífera* (Lam.) en condiciones de vivero. *Pastos y Forrajes*, 36(4), 409-416

³⁶ *Ibid.*, 409-416

2.7.1.1 Turbidez. La turbiedad es el nivel de opacidad del agua, cuando es sometida en el turbidímetro y se mide en NTU Unidades Nefelométricas de turbiedad, son las unidades en que se expresa la turbiedad cuando ha sido determinada por el método nefelométrico. Es de aclarar que la opacidad del agua es debida a los coloides presentes³⁷.

2.7.1.2 Color. Las principales causas del color en agua son la presencia de hierro y manganeso y el contacto con desechos orgánicos e industriales, sin embargo, el color natural del agua es un efecto de las partículas coloidales cargadas negativamente y debido a esto se puede efectuar su remoción.

Se reconocen dos tipos de color en el agua, el primero es el color de la muestra una vez removida la turbiedad y el color aparente que hace referencia al color debido a las sustancias en solución y coloidales y al material suspendido³⁸.

2.7.1.3 Olor y Sabor. Entre las causas de olores y sabores en el agua, se encuentra el cloruro de sodio, el sulfato de sodio y magnesio, fenoles, desechos orgánicos, diferentes especies de algas, hongos, etc.³⁹

2.7.1.4 Conductividad. La conductividad es la expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Dicha capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de la medición⁴⁰.

2.7.1.5 Tratamiento del agua. La carga contaminante del agua es removida al ser sometida a una serie de operaciones unitarias con el fin de disminuir las afectaciones en la salud, el impacto en los ecosistemas y asegurándose así que los parámetros del agua se encuentran entre los rangos establecidos por la normativa.

El tratamiento primario del agua consiste en 3 etapas: coagulación, floculación y sedimentación. Para que la coagulación se pueda realizar, se requiere un coagulante ya sea de origen químico u orgánico. Posteriormente, se llevan a cabo dos tratamientos más (secundario y terciario), basados en procesos químicos y biológicos utilizando operaciones unitarias.

³⁷ GUIDELINES FOR CARCINOGEN RISK ASSESSMENT (PDF) (166 pp, 479 K, March 2005, 630-P-03-001F).

³⁸ GÓMEZ-FRAGUELA, J.A., GARRA, A. y ROMERO, E. (2002)

³⁹ GÓMEZ-FRAGUELA, J.A., GARRA, A. y ROMERO, E. (2002)

⁴⁰ APHA, AWWA and WPCF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington DC

2.8 PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA

2.8.1 Coagulación. La coagulación y la floculación son fenómenos relacionados que normalmente ocurren simultáneamente e implican la unión de partículas con la consecuente desestabilización y la salida de compuestos o sólidos en suspensión como se indica en la figura 2. Hablando químicamente, la floculación es un proceso físico de contacto y adherencias donde los agregados forman grupos de mayor tamaño llamado flóculos y la coagulación es el proceso por el cual la materia coloidal presente, se dispersa / suspenda en un líquido⁴¹.

Figura 2. Coagulación / Floculación de una Suspensión Coloidal



Fuente: NIETO C, ORELLANA V. 2011. Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante. (Trabajo de grado), Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales: Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. 1-132.

⁴¹ INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY, (2018)

2.8.1.1 Coagulantes químicos. La coagulación química se ha utilizado para desestabilizar suspensiones coloidales, logrando la precipitación de especies metálicas e inorgánicas eliminándolas mediante sedimentación y/o filtración de las corrientes de agua, las técnicas de medida de separación solo se basaban en el tamaño de partícula. Los coagulantes que más se han usado son las sales de hierro, aluminio, cal, polímeros y otros, es decir de la rama sintética⁴².

2.8.1.2 Biocoagulantes. Son agentes naturales producidos espontáneamente por reacciones en plantas y animales, pertenecen a los tipos más seguros y cuidadosos con el medio ambiente, ya que todos los coagulantes naturales están libres de toxicidad, pues cuentan con compuestos bioactivos como lo son las proteínas, polisacáridos, mucílagos, entre otros. En el uso de tratamiento de efluentes tanto industriales como domésticos, se ha logrado desarrollar coagulantes que permiten la desestabilización de la contaminación sólida y la eliminación de sólidos disueltos.

Los coagulantes naturales generan ciertas ventajas sobre la comparación de tipos de uso químico, al no consumir alcalinidad, no generan cambios bruscos de pH en las aguas y producen cinco veces menos lodo residual⁴³.

2.8.1.3 Moringa como coagulante. Los extractos de plantas tales como Moringa Oleífera han demostrado ser eficaces en la eliminación de sólidos en suspensión, en la eliminación de turbidez, en el ablandamiento de agua dura y también en la reducción de la suspensión producida en comparación con la producida por coagulantes químicos⁴⁴. En la moringa se ha encontrado una proteína soluble que actúa como un polielectrolito catiónico natural durante el tratamiento y causa la coagulación del agua turbia⁴⁵.

⁴² FOLKARD, G. and SUTHERLAND, J. (2002) Development of a naturally derived coagulant for water and wastewater treatment. *Water Science and Technology Water*.

⁴³CHOI DH, et al. (2014) Hrq1 facilitates nucleotide excision repair of DNA damage induced by 4-nitroquinoline-1-oxide and cisplatin.

⁴⁴ NDABIGENGESERE, A. and NARASIAH, K.S. (1998) Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds. *Water Research*.

⁴⁵ BARTH, H.; HABS, M.; KLUTE, R.; MULLER, S.; TAUSCHER, B. (1982). Trinkwasseraufbereitung mit samen von Moringa oleifera lam. *Chemiker-Zeitung (Drinking Water Treatment with Moringa oleifera Seeds)*. *Chemists Newspaper*, 106, 75-78

2.8.1.4 Proteínas Coagulantes – Activas. Las proteínas tipo solubles presente en la semilla de moringa oleífera poseen cargas positivas de punto isoeléctrico (pI)>10, al triturar las semillas posteriormente se agregan en agua, estas actúan como imanes atrayendo partículas negativas, la unión de estas partículas ya neutralizadas se denominan flóculos, la formación de esta red genera la eliminación por procesos de sedimentación y filtración. El componente activo de la semilla se debe a un péptido catiónico con peso molecular entre 6 y 16 KDa (MO2.1 Y MO2.2), presentando un alto contenido de glutamina (26%), prolina (6.9%), alanina (6.9%) y aminoácidos como arginina e histidina⁴⁶.

La actividad coagulante de la semilla de M. oleífera proviene directamente de la planta seca, específicamente en las semillas sin cáscara, como se observa a continuación:

Tabla 1. Actividad coagulante de las diferentes formas de moringa

Formas de Moringa	Actividad de Coagulación
Plantas Verdes	
Todas	Ausente
Semillas	Ausente
Verdes Secas	Ausente
Plantas Secas	
Todas	Ausente
Semillas Sin Cascara	
Sin Filtrar	Presente
Filtrado	Presente
Solidos Residuales	Ausente
Semillas Descascaradas	
Sin Filtrar	Presente
Filtrado	Presente
Solidos Residuales	Ausente
Corteza de Planta	Ausente
Corteza de Semilla	Ausente

Fuente: NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, K. S., & TALBOT, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. Water Research, 29(2), 703–710.

⁴⁶ BRAVO GALLARDO, M (2017). Coagulantes Y Floculantes Naturales Usados En La Reducción De Turbidez, Sólidos Suspendidos, Colorantes Y Metales Pesados En Aguas Residuales. Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

2.8.2 Mecanismos de coagulación. Las interacciones que existen entre los diferentes tipos de agentes coagulantes con las partículas coloidales presentes en el agua se generan mediante mecanismos de coagulación que permiten desestabilizar las partículas, la neutralización de carga, la formación de puentes, parche electrostático y de barrido⁴⁷.

A partir de la dosis óptima, el coagulante hace contacto con las partículas coloidales suspendidas en el agua mediante procesos como la adsorción, interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, etc. Lo cual conduce a la desestabilización de dichos coloides y suspensiones; y posteriormente conlleva a un reordenamiento de la conformación del polímero adsorbido de tal manera que las partículas en suspensión adsorbidas se agregan para formar grandes flóculos que a continuación se establecen de manera efectiva⁴⁸.

2.8.2.1 Parche electrostático. Este mecanismo, también conocido como el modelo de parche, comprende una distribución desigual de las cargas resultantes debido a la adsorción de parches discretos de polímeros en la superficie.

Al verse reducida la carga negativa en las partículas se reduce de igual manera la repulsión interna de partículas. Este efecto es denominado neutralización de carga y se encuentra asociado con la reducción de la movilidad electroforética⁴⁹.

2.8.2.2 Neutralización de cargas por adsorción. Es un mecanismo de coagulación que se lleva a cabo cuando el agente coagulante y las partículas coloidales son de carga opuesta; lo cual permite que dichas partículas puedan ser desestabilizadas⁵⁰.

Mediante interacciones como puentes de hidrógeno, enlaces covalentes, reacciones de coordinación y reacciones de intercambio iónico puede darse la adsorción de especies químicas en la superficie de la partícula coagulante⁵¹; esto quiere decir que, las partículas coloidales que poseen carga negativa en sus superficies, atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide⁵², como se evidencia en la figura 3, en el cual el polímero genera la atracción de las cargas para así lograr una red en la que se genera el proceso de coagulación. Sin embargo, puede suceder que al

⁴⁷ BOHUSLAV DOBIAS, H.S., (2005). Coagulation and Flocculation, 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America.

⁴⁸ BOLTO, Gregory. (2007). Polielectrolitos orgánicos en el tratamiento de aguas. Agua Res., 41, pp. 2301-2324.

⁴⁹ Sharma et al., 2006. Indian J. Anim. Sci., 76 (7): 538-541. Document reference. Sharma, K.; Sharma, S. D., 2006

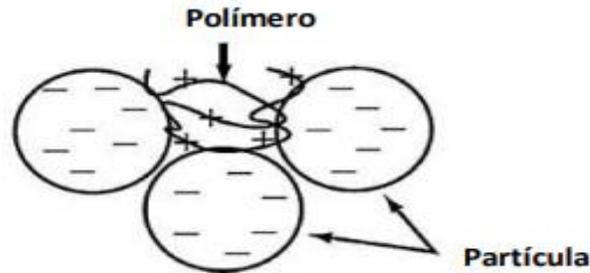
⁵⁰ BRAVO GALLARDO, Mónica Alejandra, Coagulantes Y Floculantes Naturales Usados En La Reducción De Turbidez, Sólidos Suspendidos, Colorantes Y Metales Pesados En Aguas Residuales, 2015.

⁵¹ OJEDA BÁEZ, L. F. Op. Cit

⁵² GOYCOOLEA, F.; CÁRDENAS, A. 2004. Pectins from Opuntia spp.: a short review. J. Profess. Assoc. Cactus Develop. 5:17-29.

añadir una cantidad excesiva de coagulante se establece la partícula y no se dé el proceso.

Figura 3. Esquema del mecanismo de coagulación, neutralización de carga.



Fuente: BOHULAV, D. (2005). Coagulation and Flocculation. Boca Ratón: Taylor & Francis.

2.8.2.3 Compresión de la doble capa eléctrica. La superficie de las partículas contaminantes suele estar cargada negativamente, entonces, en la interfaz sólido-líquido los iones positivos se adhieren fuertemente a la partícula formando así la doble capa eléctrica. Los iones negativos se acercan a los positivos, y a su vez repelen a los iones que tienen la misma carga que la partícula eliminando la barrera de energía⁵³.

2.8.2.4 Mecanismo de barrido. Este tipo de mecanismo se presenta cuando el contenido de partículas coloidales en el agua es bajo, entonces, al agregar una cantidad elevada de coagulante, los hidróxidos que se forman debido a la reacción de alcalinidad entre el agua y el coagulante se precipitan, ya que se excedió el límite de solubilidad; Al formarse el precipitado, se produce una reducción de la turbidez del agua⁵⁴.

⁵³ MOJICA, D. C., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). EVALUACIÓN DE LOS POLIFENOLES EXTRAÍDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE *Coffea arabica*, PARA LA PRODUCCIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL

⁵⁴ MOJICA, D. C., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). EVALUACIÓN DE LOS POLIFENOLES EXTRAÍDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE *Coffea arabica*, PARA LA PRODUCCIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL

3. MARCO LEGAL

Según el ministerio de la protección social, ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, en la resolución No 2115 expedida el 22 de junio del año 2017, por medio de la cual se señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. El capítulo II “Características físicas y químicas del agua para el consumo humano” en el artículo 9° “Características químicas de otras sustancias utilizadas en la potabilización”, dentro las características químicas del agua para consumo humano se deberán tener en cuenta los siguientes valores aceptables para otras sustancias químicas utilizadas en el tratamiento del agua, así:

1. El valor máximo aceptable del residual de aluminio derivado de su uso como coagulante en el tratamiento de agua para consumo humano en su forma (Al³⁺) será de 0.2 mg/L. Si se utiliza otro coagulante basado en sales de hierro, el valor máximo aceptable para el residual será 0.3 mg/L.

En el artículo 23, reportes de control, se evidencia la cantidad de productos químicos utilizados, tales como coagulantes, desinfectantes, alcalinizante, entre otros, que deben cumplir con estándares de calidad. En el caso de los productos que están sujetos a registros sanitarios, deben indicar el número de registro del INVIMA ó el número de resolución expedida por el Ministerio de la Protección Social. Los coagulantes que pueden emplearse en el tratamiento son los siguientes: Sulfato de aluminio, de acuerdo con la norma NTC 531 (Rev. 5) o AWWA B403 Cloruro férrico líquido, de acuerdo a la norma NTC 3976 Sulfato férrico, de acuerdo a la norma AWWA B406 Sulfato ferroso, de acuerdo a la norma AWWA B402 Aluminato de aluminio Hidroxicloruro de aluminio, de acuerdo a la norma AWWA B408.

La importancia de la resolución 2115, genera implicaciones en la investigación de empleo de coagulantes para el tratamiento del agua con estándares de calidad para determinaciones de condiciones óptimas de operación que se deben desarrollar a partir de ensayos de laboratorio, teniendo en cuenta el empleo de productos como ayudantes de filtración o acompañamiento en el proceso de coagulantes metálicos. En caso de emplear productos químicos distintos de los aquí mencionados, debe pedirse permiso al Ministerio de Salud para su aplicación. En caso de emplear el polímero poliaminas EPI-DMA para el tratamiento del agua, éste debe cumplir con lo exigido por la Norma Técnica Colombiana NTC 3699. Para el uso del cloruro de poli aluminio, policloruro de dialildimetilamonio y la poliacrilamida estas deben cumplir con lo exigido en las Normas Técnicas ANSI/AWWA B408-93, ANSI/AWWA B451-92 y la ANSI/AWWA B453-96 respectivamente.

En el capítulo V “Procesos básicos de control de la calidad del agua para el consumo humano”, el artículo 21, “Frecuencias y número de muestras de control de la calidad física y química del agua para consumo humano que debe ejercer la persona prestadora”, en el parágrafo 1 las personas prestadoras que utilizan sales metálicas de hierro y aluminio como coagulante deben cumplir las frecuencias mínimas para la medición del coagulante serán:

Tabla 2. Frecuencias mínimas para la medición de coagulantes.

Población atendida por persona prestadora por municipio (habitantes)	Frecuencia mínima	Número mínimo de muestras a analizar por cada frecuencia
Menores o igual a 2.500	Trimestral	1
2.500 - 10.000		2
10.001 - 20.000		3
20.001 - 100.000	Bimestral	1
100.001 - 500.000		2
500.001 – 800.000	Mensual	3
800.001 – 1.000.000		4
1.000.001 – 1.250.000		5
1.250.001 – 2.000.000		6
2.000.001 – 4.000.000		7
Mayor a 4.000.000		7 muestras de acuerdo a la frecuencia más 5 muestras por cada millón o fracción adicional.

Fuente: MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. “Procesos básicos de control de la calidad del agua para el consumo humano”, artículo 21.

La norma técnica NTC Colombiana 3903, “Procedimiento para el ensayo de coagulación - floculación en un recipiente con agua o método de jarras”, brinda a la investigación el procedimiento general para determinar la dosis óptima de reactivo a utilizar con el fin de reducir del agua el material disuelto, en suspensión y coloidal, mediante ensayos de coagulación. Además, también brinda el procedimiento de evaluación de la eficiencia de color, turbiedad, entre otros parámetros. Esta norma suministra una evaluación sistemática de las variables que se encuentran en los procesos de coagulación, estableciendo las prácticas de salud y seguridad apropiadas.

La resolución 631 expedida el 18 de abril del 2015, establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, entre otras disposiciones.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIA PRIMA

4.1.1 Semilla de moringa. Se utilizaron 250 g de semilla de Moringa Oleífera adquiridos en la Plaza de Mercado Las Ferias en la ciudad de Bogotá. Las muestras de moringa se seleccionaron tras la separación de las semillas que presentaban defectos en su maduración, así como oscurecimiento de la semilla o falta de esta durante el proceso de descascarado, tal como se observa en la figura 4. Estos factores se tuvieron en cuenta ya que, es importante evitar el reblandecimiento y la desecación extrema de la misma.

Figura 4. Semillas de moringa



Fuente: elaboración propia

4.1.2 Aceite de moringa. La elaboración del coagulante se llevó a cabo con y sin la extracción del aceite de la semilla, el cual fue extraído a través de un equipo Soxhlet utilizando como agente extractor el hexano en relación 2:1, durante aproximadamente cuatro horas; se elige trabajar con este solvente por el buen rendimiento que ha presentado en otras investigaciones.

4.1.3 Agua residual sintética. El agua con la que se trabajó para determinar la dosis óptima de coagulante fue preparada a nivel de laboratorio. Adicionando 10 g de Caolín por cada litro de agua del grifo⁵⁵. El agua fue preparada un día antes de realizar las pruebas y transcurrido ese tiempo, se obtuvo una turbidez inicial de 277 NTU a un pH de 6,97.

Se utiliza caolín porque es un mineral que, al contener pequeñas cantidades de mica, cuarzo, feldespato, alunita, entre otros, se pueden lograr altos valores de turbidez⁵⁶.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Extracción de aceite por soxhlet. La extracción es una operación básica que se utiliza con frecuencia a nivel laboratorio. Se define como la acción de separar una fracción específica de una muestra por medio de un líquido, de tal manera que se pueda dejar el resto lo más íntegro posible⁵⁷. La separación de fases se puede realizar a partir de los tres estados de la materia, extracción líquido-líquido, sólido-líquido y gas- líquido.

La extracción sólido-líquido es la más utilizada y se puede llevar a cabo mediante un equipo soxhlet, el cual permite separar las fases a través de un solvente cuya función es “lavar o extraer” sucesivamente, los componentes más solubles de una mezcla sólida, es decir, extrae de la mezcla, los componentes cuya solubilidad en el solvente es muy baja debido al efecto acumulativo de las múltiples reacciones.⁵⁸

En la mayoría de las sustancias, el proceso de extracción presenta una baja eficiencia, esto sucede porque una vez se agrega el solvente, la parte que está en contacto íntimo con el componente a extraer, se satura rápidamente y se tiene que filtrar para trabajar nuevamente con solvente fresco; esto se traduce a un aumento en la cantidad y mayor manipulación del solvente aparte de la atención personalizada que requiere la operación⁵⁹. No obstante, el extractor soxhlet realiza un sinnúmero de extracciones o sifones de manera automática con el mismo solvente que se evapora y condensa, llegando siempre sin impurezas al material; es un equipo comúnmente utilizado para la determinación del contenido graso de una

⁵⁵ OKUDA, Y OKIMOTO, R KUMAI, KI KOBAYASHI, Y TOKURA. Physical Review B 61 (1), 422, 2000. 458, 2000. Metallic ordered double-perovskite

⁵⁶ BARTOLOMÉ, Margarita (1997) presenta oportunamente una clara síntesis García Castaño, F. J., Pulido, R. & Montes, A. (1997)

⁵⁷ NÚÑEZ, 2008. Extracciones con Soxhlet. cenunez.com.ar.

⁵⁸ CALDAS, 2012. OPTIMIZACIÓN, ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE EXTRACCIÓN SÓLIDO LÍQUIDO. Universidad de cuenca.

⁵⁹ NÚÑEZ, 2008. Extracciones con Soxhlet. cenunez.com.ar.

muestra y se caracteriza por su efectividad y buen rendimiento en comparación con otros métodos.

Esta técnica de extracción se fundamenta en el siguiente procedimiento: 1) Se coloca el solvente en un balón. 2) Se calienta hasta el punto de ebullición para que se evapore y llegue un condensador de reflujo. 3) Una vez se condensa, cae sobre un recipiente en el cual se encuentra la muestra al interior de un cartucho poroso. 4) El nivel del solvente asciende y cubre el cartucho hasta que se produce el reflujo que devuelve el solvente con el material extraído al balón. 5) Se repite el proceso hasta que la muestra quede agotada. El material extraído se concentra en el balón del solvente.

Para que se pueda llevar a cabo el proceso, es importante tener en cuenta la cantidad de solvente a utilizar, pues debe ser el suficiente para que al ascender al cartucho y antes de que se produzca el sifón, no quede seco el balón, ya que, se puede quemar y secar la muestra o producir una explosión de vapores al caer el líquido de la sifonada sobre el vidrio recalentado⁶⁰.

4.2.2 Diseño de experimentos. Diseñar un experimento, significa planear un experimento de forma que reúna información pertinente del problema u oportunidad de investigación. La reproducción proporciona una estimación del error experimental, obteniendo una estimación más precisa del efecto de cada uno de los factores a evaluar. La aleatorización hace válida las suposiciones que se tienen en el diseño para el proceso de coagulación en el tratamiento de aguas.⁶¹

Enunciado el planteamiento del problema; Se busca determinar si variables independientes como el pH y la concentración de dosis de coagulante de moringa afecta la turbidez final en proceso de tratamiento y con ello el porcentaje de remoción final en aguas residuales.

Proposición de la técnica experimental y el diseño

Se tiene en cuenta el uso de un diseño de experimentos de nivel multifactorial completamente al azar, utilizando dos (2) variables independientes y una (1) variable dependiente. El número de variables y la complejidad del proceso de coagulación son una de las razones por las cuales la mayoría de los estudios de tratamiento de aguas residuales tienen un mayor consumo de tiempo y un alto

⁶⁰ NÚÑEZ, 2008. Extracciones con Soxhlet. cenunez.com.ar.

⁶¹ SOLÍS Reyna Norma Irene. (2008, marzo 19). Diseño de experimentos en la estadística aplicada. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/disenio-de-experimentos-en-la-estadistica-aplicada/>

número de experimentos que muestran las diversas interacciones entre las variables.

El diseño se trabajó con dos repeticiones y dos factores; el pH y la dosis de coagulante, con 4 y 5 niveles, respectivamente y para determinar si los efectos de estos factores son significativos, se planteó una hipótesis nula y una alternativa, como se muestra a continuación:

Hipótesis nula: No hay efecto entre la variación del pH de la muestra y la dosis de coagulante en la turbidez final.

Hipótesis alterna: Si hay efecto entre la variación del pH de la muestra y la dosis de coagulante en la turbidez final.

Se definieron los factores que tienen mayor influencia en la variable respuesta y se elaboró el proceso experimental correspondiente a la figura 5, teniendo en cuenta referencias bibliográficas. De esta manera, se puede deducir el desarrollo experimental y por ende permite reducir el número de niveles en cada uno de los factores. Adicionalmente, utilizar un diseño de multinivel factorial permite identificar los valores óptimos de los parámetros a analizar. El proceso cuenta con factores constantes, como el tipo de agua, tipo de coagulante, tiempo de sedimentación, tiempo de mezcla rápida y mezcla lenta y se evidencian las variables de entrada y la variable de salida (respuesta) en el proceso del tratamiento.

Figura 5. Diagrama de diseño del proceso experimental



Fuente: elaboración propia

Para el análisis estadístico se utilizó el software MINITAB 19 con un grado de confiabilidad del 95 %, teniendo en cuenta diagramas de interés como el de Pareto, ANOVA y diferentes coeficientes de predicción de condiciones de las variables independientes y su respectiva influencia.

4.2.3 Ensayo de jarras. La coagulación es un proceso que se utiliza en plantas de tratamiento de agua, como la parte inicial de una serie de procedimientos que incluye la coagulación, sedimentación, filtración y floculación para la remoción del color, turbidez, materia orgánica y otros compuestos que se encuentran en estado coloidal⁶². A nivel laboratorio, el ensayo de jarras se compone de diversas piezas y es uno de los modelos más empleados como elemento de control en el proceso de coagulación.

En la actualidad, se ha ido perfeccionado aún más el ensayo de jarras para poder definir variables tan importantes como la determinación de la dosis óptima de coagulante, pH óptimo de coagulación, la influencia de la concentración de coagulante sobre el proceso, la influencia de la forma y secuencia de aplicación de los coagulantes y la selección y dosificación de los ayudantes de coagulación.

Para llevar a cabo esta prueba, generalmente los equipos constan de⁶³:

- Un agitador mecánico equipado con tres a seis paletas, con capacidad para operar a velocidades variables (0 a 100 rpm)
- Iluminador de flóculos ubicado en la base del agitador.
- Vasos de precipitado de 1 a 2 L de forma baja y cristal refractario.

El procedimiento que se tendrá en cuenta para este proyecto será el descrito por A.M, Sancha, J.P. Schifini, E. Causa y C. Pinto, en el documento “EXPERIENCIAS DE COAGULACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS”, en el cual se realiza una mezcla rápida a 100 rpm, por un minuto, posteriormente se baja la velocidad a 40 rpm y se mantiene la mezcla bajo estas condiciones durante 15 minutos y finalmente se detiene la mezcla y se deja sedimentar por un tiempo apropiado, aproximadamente entre 30-60 minutos.

La Norma Técnica Colombiana (NTC) 3903, en el procedimiento para el método de jarras en la coagulación. Floculación, establece existen algunas posibles interferencias que pueden afectar la determinación de las condiciones óptimas durante el ensayo de jarras como los cambios de temperatura al presentarse corrientes térmicas o de convección que impidan la sedimentación, la liberación de gas debido a la formación de burbujas causadas por el agitador mecánico, la reacción química o el incremento de la temperatura y por último el periodo de

⁶² A.M, Sancha, J.P. Schifini, E. Causa, C. Pinto. “EXPERIENCIAS DE COAGULACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS”

⁶³ A.M, Sancha, J.P. Schifini, E. Causa, C. Pinto. “EXPERIENCIAS DE COAGULACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS”

ensayo, en el cual las características de coagulación del agua en el depósito prolongado se pueden ver modificada por la actividad biológica u otros factores⁶⁴.

4.2.4 Actividad coagulante y porcentaje de remoción. Una vez terminada la experimentación, se puede determinar la acción coagulante de la semilla de la moringa por medio del índice de remoción, el cual realiza una comparación entre la turbidez inicial y la turbidez final de la muestra (ecuación 2)⁶⁵.

Ecuación 1. Índice de remoción de turbidez⁶⁶

$$IRT\% = \frac{(Turbidez\ inicial - Turbidez\ final)}{Turbidez\ inicial} * 100$$

4.2.5 Comparación coagulante químico. Para comparar la acción coagulante de la semilla de moringa con el sulfato de aluminio, se prepararon ambas soluciones a una misma concentración de 20,000 ppm y se añadió una dosis de 40 mg/L a cada una de las muestras de agua, tipo textil y residual doméstica. Las pruebas se manejaron a pH 7, ya que si la coagulación se lleva a cabo fuera del rango óptimo de pH, se debe aumentar la cantidad de coagulante⁶⁷.

La comparación de ambos coagulantes se hace con el propósito de buscar una alternativa óptima y sostenible, sin tener en cuenta aspectos técnicos en cuanto a las diferencias entre un producto químico y uno de carácter orgánico.

⁶⁴ ICONTEC. (1996). NTC 3903. Gestión ambiental. agua. procedimiento para el método de jarras en la coagulación-floculación del agua

⁶⁵ MOJICA, D. C., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). EVALUACIÓN DE LOS POLIFENOLES EXTRAÍDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE *Coffea arabica*, PARA LA PRODUCCIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL

⁶⁶ MOJICA, D. C., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). EVALUACIÓN DE LOS POLIFENOLES EXTRAÍDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE *Coffea arabica*, PARA LA PRODUCCIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL

⁶⁷ CÁRDENAS, I. Y. (abril de 2000). TRATAMIENTO DE AGUA. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Lima.

5. OBTENCIÓN DEL COAGULANTE

En este capítulo se describe el procedimiento realizado para obtener el coagulante orgánico a partir de la semilla de moringa, se incluye la etapa de molienda y tamizado, la extracción del aceite, preparación del coagulante y el proceso de filtrado.

5.1 PROCESO DE DESCASCARADO, MOLIENDA Y TAMIZADO

5.1.1 Descripción del proceso. Una vez se obtiene la semilla de moringa, se inicia un proceso de descascarado manual debido a que la cubierta de la semilla no es utilizada para este propósito; se debe tener en cuenta diversos factores para una selección adecuada de la materia prima ya que solo son útiles aquellas semillas maduras, cuya cascara este totalmente seca y posea un color café oscuro, es de vital importancia que las semillas no presente reblandecimiento, desecación extrema o una coloración verdosa ya que estas no poseen una acción coagulante óptima.⁶⁸ Se lavan las semillas con agua destilada para remover las impurezas restantes del procedimiento anterior y finalmente se secan en una mufla, según referencia bibliográfica, a una temperatura aproximada de 104°C durante 1 hora⁶⁹, para evaporar el agua. En la figura 6 y 7, se puede evidenciar el proceso de adecuación de la materia prima.

Figura 6. Descascarado de la materia prima



Fuente: elaboración propia

⁶⁸ ACEVEDO PICÓN Ernesto (2019). USO DE SEMILLAS DE MORINGA (MORINGA OLEÍFERA) COMO FLOCULANTE NATURAL PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUAS CRUDAS DE RIO NEGRO, RIO DE ORO Y QUEBRADA FLORIDABLANCA, SANTANDER. Universidad de Santander.

⁶⁹ ESPINOSA, R; ZULUAGA, S (2018). Evaluación de la capacidad de dos coagulantes naturales para la remoción de cargas contaminantes en el efluente final de la empresa textil Inruzz S.A.S con respecto al coagulante comercial sulfato de aluminio. Universidad del Bosque.

Figura 7. Lavado y secado de la materia prima



Fuente: elaboración propia

En cuanto se secan las semillas, son trituradas con ayuda de un mortero hasta pulverizarlas y después se tamizan a $425 \mu\text{m}$ para obtener un polvo más fino, como se puede observar en la figura 8. El propósito de disminuir el tamaño de partícula es mejorar la disolución entre el polvo de la moringa y la solución de NaCl 1M, solución que es utilizada a continuación para preparar el coagulante.

Figura 8. Proceso de triturado y tamizado



Fuente: elaboración propia

5.2 EXTRACCIÓN DEL ACEITE POR SOXHLET

Debido a que la semilla de *moringa oleífera* cuenta con un aproximado de 35% – 40% de su peso en aceite, se procede a hacer la extracción de la materia prima, puesto que se postula que, el porcentaje de aceite podría formar un recubrimiento de película e inhibir la formación de flóculos. En este proceso se extrajo la mayor cantidad de aceite en el polvo obtenido teniendo en cuenta el uso de un equipo soxhlet, con agente extractor hexano (C_6H_{14}) en una relación 1:2, ya que se necesitaba una mayor cantidad del hexano para completar cada sifón por el exceso de aceite de la semilla. Se realizaron dos procesos de extracción, porque necesitaba

un valor en peso de polvo de moringa con extracción de 20 g, por lo cual en la primera extracción se le agregó 27 g de polvo de moringa triturado y tamizado con 100 mL de agente extractor, en el cual el proceso contó con 13 sifones y posteriormente la torta residual fue llevada a una mufla tipo Nabertherm 30 -3000 a 99°C por una (1) hora aproximadamente, para lograr la evaporación total del agente extractor, este primer proceso generó un peso en torta residual de 14 g. En la figura 9 se evidencia el proceso de extracción del aceite a través del método por extracción de solventes.

Figura 9. Extracción de aceite de moringa



Fuente: elaboración propia

La segunda extracción realizada se agregó 22.5 g de polvo de moringa triturado y tamizado con 130 mL de agente extractor, en el cual el proceso conto con 15 sifones y posteriormente la torta residual fue llevada a una mufla tipo Nabertherm 30 -3000 a 99°C por una (1) hora aproximadamente, para lograr la evaporación total del agente extractor, este segundo proceso genero un peso en torta residual de 12 g. Hay que tener en cuenta que en este segundo proceso se debió agregar más agente extractor, ya que se usaron partes de la trituración que contaban con mayor cantidad de aceite y el equipo soxhlet no lograba realizar el sifón por la cantidad que se retiraba, posteriormente el componente liquido se llevó a proceso de recuperación de hexano. La figura 10 muestra el polvo que se obtiene después de la extracción.

Figura 10. Resultado polvo de la extracción



Fuente: elaboración propia

Se obtuvo un peso en torta residual de 26 g, que es el polvo obtenido ya con proceso de extracción, obteniendo los 20 g necesarios para la concentración óptima de semilla en la preparación del coagulante.

5.2.1 Recuperación del hexano. Para este procedimiento, se tomó como referencia la segunda extracción que se realizó, en la cual, se agregaron 22.5 g de polvo de moringa y llevó la sustancia oleaginosa un Rotavapor Heidolph y teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas del hexano, se trabajó con una presión de 335 mBar, 75°C y una frecuencia de 60-70 rpm, para recuperar la cantidad de solvente restante. En la figura 11 se observa el proceso de recuperación del agente extractor.

Figura 11. Rotavapor Heidolph



Fuente: elaboración propia

5.3 CONCENTRACIÓN COAGULANTE DE MORINGA

Se estableció una concentración de 20,000 ppm para la preparación de cada coagulante, teniendo en cuenta el apartado 4.2.5, se tomaron 20 g de polvo de moringa por litro de solución de NaCl 1M. La concentración se seleccionó con el propósito de comparar el coagulante con Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ en una solución al 2%, valor que se ha definido como óptimo según estudios de tratabilidad. La concentración de coagulante se determinó a través de la siguiente ecuación:

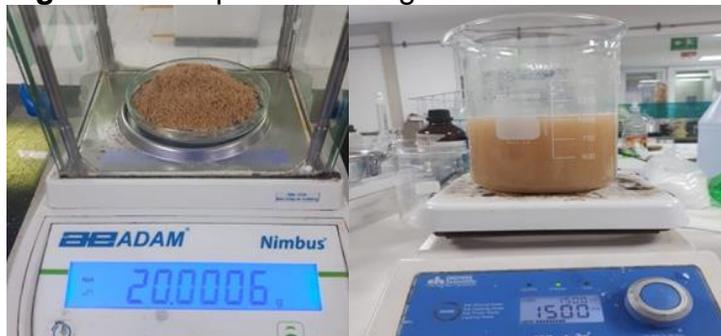
Ecuación 2. Concentración coagulante

$$\text{Concentración} = \frac{20 \text{ gr}}{1 \text{ L NaCl}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}} = 20,000 \text{ ppm}$$

5.4 PREPARACIÓN COAGULANTE

Se prepararon dos coagulantes para hacer una comparación de rendimiento con y sin la extracción de su aceite en una solución de NaCl 1M ya que, se ha demostrado que la fuerza iónica de la solución mejora la eficiencia de la extracción del producto de interés, además de aumentar la solubilidad en el agua de las proteínas presentes en la semilla de moringa⁷⁰. Para ello, se utilizó un agitador magnético donde se mezclaron 20 g de polvo de moringa por litro de solución de NaCl 1M durante 30 minutos. En la figura 12 se evidencia la preparación del coagulante.

Figura 12. Preparación coagulante



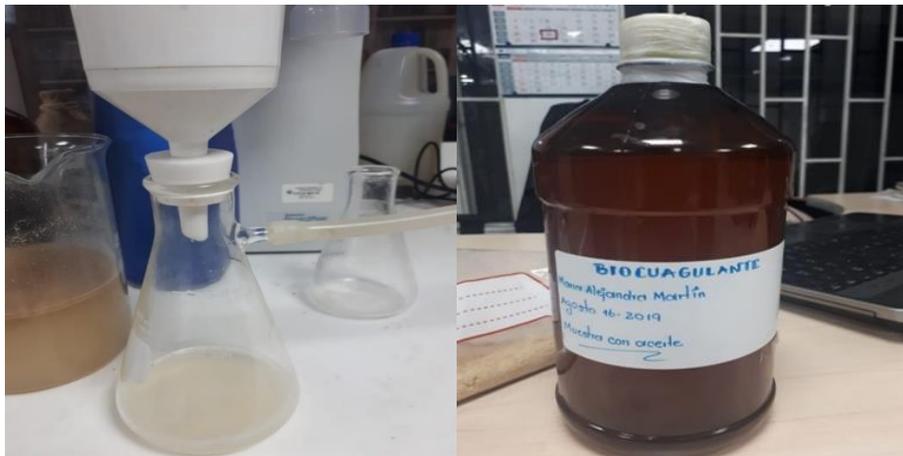
Fuente: elaboración propia

⁷⁰, A. T. A., Silva, M. O., Gomes, R. G., Bergamasco, R., Vieira, M. F., & Vieira, A. M. S. (2017c). Protein fractionation of seeds of *Moringa oleifera* Lam and Baptista its application in superficial water treatment doi://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.seppur.2017.02.040

5.5 FILTRACIÓN DE LA MUESTRA

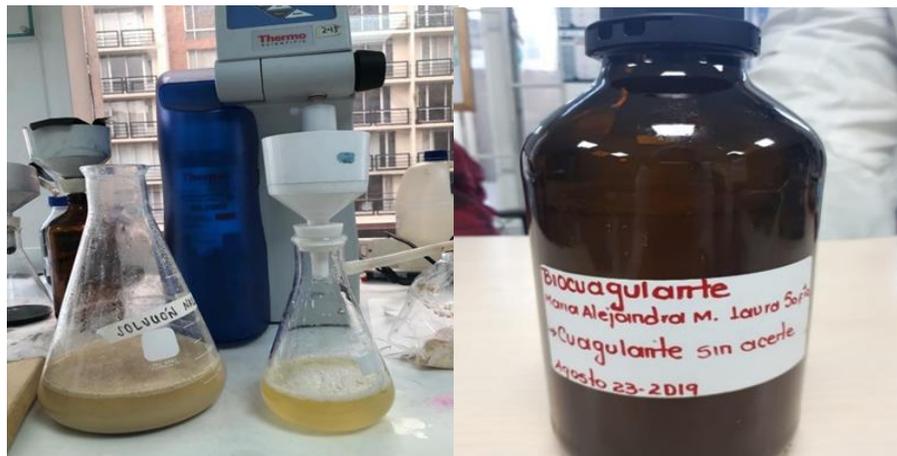
Para eliminar las partículas disueltas restantes, se filtraron las muestras utilizando una bomba de vacío MZ 2C NT, papel filtro y embudos Buchner. El proceso de filtrado se realiza para prolongar la vida útil del coagulante y se puede apreciar en la figura 13 y 14.

Figura 13. Proceso de filtrado coagulante con aceite



Fuente: elaboración propia

Figura 14. Proceso de filtrado coagulante sin aceite



Fuente: elaboración propia

6. DETERMINACIÓN DE LA ACCIÓN COAGULANTE

6.1 PREPARACIÓN AGUA PATRÓN

Para determinar la acción coagulante de la semilla de moringa con y sin la extracción de su aceite a través del ensayo de jarras, se preparó agua residual sintética a partir de caolín, teniendo en cuenta la sección 4.1.3 del presente trabajo de grado. De la cual se obtuvo una turbidez inicial de 277 NTU con pH 6.9, una vez se dejó la muestra en reposo durante el tiempo estipulado. Para que esta preparación no cambie su variabilidad, se tuvo en cuenta el uso de relación de caolín con agua, con el mismo tiempo de hidratación, generando valores de turbidez de semejantes.

6.2 CONTROL Y AJUSTE DE PH

Se realizaron 60 pruebas en el ensayo de jarras, ya que se generaron replicas en cada una, para lograr minimizar el error en los datos obtenidos en la investigación, con el uso diferentes concentraciones de coagulante (20, 40,60, 80, 100 mg/L). Además, con el propósito de verificar la eficiencia del coagulante a diferentes rangos de pH (ácido, neutro y alcalino), se tomaron valores de 3, 5, 7 y 9 en las muestras de agua patrón de 1L, para las cuales se utilizó ácido cítrico al 10% para los valores ácidos y soda cáustica al 10% para los básicos, ya que a una concentración mayor puede llegar a generar cambios drásticos de pH se puede observar el proceso del montaje y desarrollo experimental en la figura 15, en la cual comienza el proceso de test de jarras posterior al ajuste.

En cuanto se ajustaba el pH, se adicionaba la dosis de coagulante al mismo tiempo a cada una de las muestras, teniendo en cuenta que la dosificación se realizó con jeringas para minimizar el error producido por las pipetas, ya que se considera que la dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación del proceso, y una prueba mal realizada puede conducir a una degradación de la calidad del agua.⁷¹ Posteriormente, se iniciaba con una mezcla rápida sometiendo los vasos del ensayo de jarras a 100 rpm, aproximadamente un minuto, para la mezcla lenta se bajaba la velocidad a 40 rpm y se mantenía la mezcla bajo estas condiciones durante 15 minutos y finalmente se detenía y se dejaba sedimentar por un tiempo apropiado de 30 minutos⁷².

⁷¹ ANDÍA CÁRDENAS Yolanda, TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN, SEDAPAL Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico, Lima, Abril del 2000.

⁷² A.M, Sancha, J.P. Schifini, E. Causa, C. Pinto. "EXPERIENCIAS DE COAGULACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS"

Figura 15. Montaje experimental



Fuente: elaboración propia

6.2.1 Dosis de coagulante de moringa. El coagulante se preparó con una concentración de 20,000 ppm, es decir, 20 g de polvo de moringa por cada litro de solución de NaCl 1M y la dosis de coagulante en (mL) se determinó a partir de la siguiente formula:

Ecuación 3. Dosis de coagulante⁷³

$$Dosis = \frac{\text{concentración} \left(\frac{mg}{L} \right) * \text{volumen agua a tratar} * 1000}{\text{concentración del coagulante}}$$

En la tabla 3 se expone la dosis de coagulante que se obtiene de acuerdo con la concentración deseada, los valores de concentración se eligieron teniendo en cuenta diversas investigaciones de con datos y referencias bibliográficas.

Tabla 3. Dosis coagulante

Concentración (mg/L)	Dosis (mL)
20	1
40	2
60	3
80	4
100	5

Fuente: elaboración propia

⁷³ ESPINOSA, R. ZULUAGA, S. (2018) "EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DOS COAGULANTES NATURALES PARA LA REMOCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES EN EL EFLUENTE FINAL DE LA EMPRESA TEXTIL INRUZZ S.A.S CON RESPECTO AL COAGULANTE COMERCIAL SULFATO DE ALUMINIO"

6.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DE COAGULANTE

Para la selección del método de obtención del coagulante se tienen en cuenta los dos procesos ejecutados, con y sin extracción en la composición peso-aceite de la semilla de *Moringa Oleífera*.

La selección considera diferentes elementos, como el rendimiento promedio de cada uno de los procesos de obtención, mayor porcentaje de remoción de carga contaminante logrando el valor más alto en un punto específico y la valoración general del proceso. Para los dos procesos de obtención el tratamiento es equivalente.

Tabla 4. Valoración de factores selección método de obtención

Factor	Coagulante sin extracción	Coagulante con extracción
% Rendimiento	94.69	94.90
% de remoción (+)	96.25	96.40
% de remoción (-)	88.11	92.72
Valoración	Sin pérdida de materia prima	Perdida de materia prima
	Menor tiempo de obtención	Uso de Solventes
	Mayor cantidad de material particulado	Mayor tiempo de obtención
		Proceso de alto costo

Fuente: elaboración propia

Se compararon ambos coagulantes por la influencia de diferentes investigaciones donde se sugiere que se obtienen mejores resultados al extraer el porcentaje de aceite presente en las semillas. Según el estudio realizado por Bhatia, S., Othman, Z., & Ahmad, A. titulado "Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant", la *moringa oleífera* contiene un polielectrolito catiónico de cadena corta que ayuda a eliminar la presencia de sólidos suspendidos a través del mecanismo de coagulación de parche electrostático⁷⁴. Tal mecanismo depende principalmente del contacto superficial entre las cargas de la moringa y las partículas suspendidas en el agua. Por lo tanto, se postula que el contenido de aceite en la semilla puede formar una emulsión o recubrimiento de película que

⁷⁴ U. GASSENSCHMIDT, K.D. JANY, B. TAUSCHER, H. NIEBERGALL, Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam, *Biochem. Biophys. Acta* 1243 (1995) 477–481.

inhibe la superficie de reacción y, en consecuencia, reduce la formación de flóculos⁷⁵.

Se evidencia en los resultados de la tabla 4, que los diversos factores analizados exponen que, aunque efectivamente, el coagulante con la extracción de aceite muestra mejores resultados en el ensayo de jarras, la diferencia entre los dos procesos no es significativa, ya que se muestra una diferencia de rendimiento de solo el 0,21%, un valor bajo teniendo en cuenta resultados de referencias bibliográficas donde se generan amplios rangos de contraste entre los dos coagulantes desarrollados, por lo que se determina seleccionar el coagulante sin extracción de aceite, ya que, de igual manera, presenta un valor de rendimiento del 94.69%, lo que conlleva un alto nivel en el proceso de coagulación. Además, se evita incurrir en costos adicionales, pues en las tecnologías industriales actuales el método de extracción por solventes volátiles resulta costoso por el alto precio comercial de los solventes y por la obtención de aceite mezclado con otras sustancias⁷⁶.

Además el aceite de *Moringa Oleifera*, tiene diversas aplicaciones, ya que aproximadamente por cada kilogramo de semillas, se podría obtener cerca de 354 g de aceite⁷⁷, un indicador que sustenta la gran cantidad de aceite que posee y por lo cual actualmente se tienen investigaciones en diversos campos como lo son los productos cosméticos, producción de biodiesel, fertilizantes, entre otros. Sin embargo, este buen rendimiento soporta elevados costos en su producción.

6.4 DETERMINACIÓN DEL PH Y DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE

Se utilizó un diseño multinivel factorial completamente al azar, con dos repeticiones y teniendo en cuenta dos factores; el pH y la dosis de coagulante, con 4 y 5 niveles respectivamente. La unidad experimental consintió en el uso del agua residual sintética con variaciones de pH de 3, 5, 7 y 9, a la cual se le agregaron diferentes dosis de coagulante de moringa. En total se realizaron 20 unidades experimentales, incluyendo las réplicas, por lo que, la matriz de diseño queda formada por un valor de 60 resultados.

⁷⁵ BHATIA, S., OTHMAN, Z., & AHMAD, A. L. (2007). Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, 145(1-2), 120–126.

⁷⁶ RODRÍGUEZ, M., ALCARAZ, L., & REAL, S. (2012). Procedimiento para la extracción de aceites esenciales en plantas aromáticas. Pág. 17.

⁷⁷ ORDÓÑEZ, Ginna Alejandra. (2012). Aceite de moringa, fuente de oportunidades productivas.

Tabla 5. Variables del diseño para el proceso de coagulación

Factores	Niveles		
	-1	0	1
pH	3	6	9
Dosis (mL/L)	1	3	5

Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19

En la tabla 5 se encuentran los niveles escogidos para cada tratamiento. El diseño de experimentos y el análisis estadístico se desarrolló en el software MINITAB 19, donde se tienen en cuenta las variaciones de los niveles y el efecto que logran en la respuesta de turbidez final del proceso. El resumen del diseño se expone a continuación:

Figura 16. Resumen del diseño experimental multinivel

Resumen del diseño

Factores: 2 Réplicas: 3
Corridas base: 20 Total de corridas: 60
Bloques base: 1 Total de bloques: 1 Número de niveles: 4; 5

Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19

Las medidas de turbiedad fueron realizadas por un turbidímetro marca Lovibond TB 300 IR, el cual es utilizado para medir las partículas suspendidas en un líquido a través de un haz de luz fijado horizontalmente⁷⁸, dando como resultado valores en unidades de NTU (Nephelometric Turbidity Unit) y las medidas de pH con un medidor de pH digital marca inoLab 7310, el cual mide la actividad del ion hidrogeno en soluciones acuosas indicando su grado de acidez o alcalinidad.⁷⁹

Tabla 6. Resultados turbidez final (Agua patrón)

pH	Turbidez Final (NTU)				
	Dosis (mL/L)				
	1	2	3	4	5
3	16.7	12.5	11.9	18.7	22.7
5	13.7	12.2	15.2	12.4	13.2

⁷⁸ GALIANA MINGOT, Tomás: Pequeño Larousse de Ciencias y Técnicas, Pág.1024, Editorial Científico-Técnica, 198

⁷⁹ DELGADO Marco, VANEGAS Manuel, DELGADO Gustavo: Metrología Química I: Calibración de un pH metro y Control de Calidad, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. (UNAN-León), 2007.

Tabla 6. (Continuación)

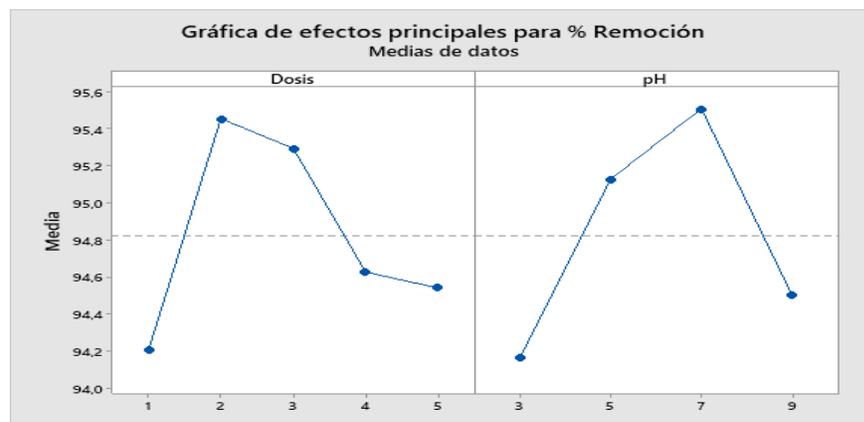
7	14.4	10.4	13.6	11.5	11.7
9	18.8	17.3	10.9	16.3	12.2

Fuente: elaboración propia

Analizando los resultados de la tabla 6, se puede evidenciar cada uno de los valores de turbidez final posteriores a las pruebas realizadas con sus respectivas replicas, evaluando su eficiencia se aprecia que el mínimo valor de turbidez es de 10.4 NTU, con una dosis de coagulante de moringa de 40 mg/L (2 mL) y pH 7, estos valores determinan la dosificación y pH óptimo del coagulante extraído de la semilla de *Moringa Oleifera*, pero se tiene en cuenta que al aumentar la dosificación en el proceso, la turbidez final conlleva un aumento muy significativo en valores de pH 3 y 9, por lo cual el menor rendimiento se encontró a pH 3 con una dosis de 100 mg/L (5 mL) y un porcentaje de remoción de solo el 88,11%, que aunque determina un buen nivel de remoción no fue el más óptimo considerando que la dosificación era la más alta, para un resultado de turbidez final de 22,7 NTU.

Además, la gráfica 1 permite observar que el rendimiento del coagulante disminuye al aumentar la dosis, este efecto se debe a que la moringa tiene un punto máximo de coagulación, considerando afectaciones de microflóculos que no logran una adecuada sedimentación en el proceso por lo cual se verifican los valores más altos de turbidez en dosificaciones de 3 a 5 mL/L, una alternativa para la mejora de esta variación es considerar un tiempo de sedimentación más largo al presentado en este proyecto. Se tiene en cuenta que en el diseño de experimentos la media se encuentra en un valor de % remoción del 94,8%, donde los valores óptimos que generan un proceso de coagulación adecuado con el uso de la semilla de *Moringa Oleifera*, son rangos que están entre 2 - 3 mL/L para la dosis y 5 – 7 para el pH.

Gráfica 1. Principales efectos para el porcentaje de remoción.



Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19.

La tendencia que existe en el aumento de la turbidez final puede generarse ya que al adicionar más cantidad de coagulante se produce una inversión de carga de la partícula, cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas y en consecuencia producen un valor elevado en la turbidez final⁸⁰. Una vez se alcanza la dosis óptima todos los coloides se neutralizan gracias al efecto de parche electroestático que genera una distribución desigual de las cargas resultantes debido a la adsorción de moléculas en la superficie, por lo cual la carga negativa de las partículas se reduce de igual manera que la repulsión interna⁸¹, se sedimentan en un tiempo de 30 minutos lo cual se evidencia en la figura 17, de tal manera que, un exceso de coagulante provocará un aumento en la turbidez debido a que no habrá interacción con las partículas coloidales de cargas opuestas⁸². Por esta razón, el porcentaje de remoción (%RT) también será menor al óptimo en ciertos rangos de coagulante

Figura 17. Sedimentación agua residual sintética



Fuente: elaboración propia

6.4.1 Influencia del pH sobre la turbidez final. Como se puede evidenciar en la gráfica 2, el pH de las muestras antes y después de la aplicación del coagulante sin extracción de aceite, no presentó diferencias significativas, es decir, se mantuvo en un valor relativamente constante para cada uno de los casos, lo cual indica que el coagulante tiene una baja influencia sobre el pH del agua residual sintética. Sin embargo, el ligero aumento en el pH ocurre porque la proteína presente en la M. oleífera actúa como un polielectrolito catiónico natural que al entrar en contacto con el agua se hidroliza y libera grupos hidroxilo, razón por la cual, la solución se vuelve más alcalina⁸³.

Se ha demostrado que la efectividad del coagulante de moringa está influenciada por el pH, especialmente cuando se encuentra alrededor del pH óptimo de 7, el coagulante demostró que es eficiente dentro de ciertos rangos de pH de valor 5 y 7,

⁸⁰ CÁRDENAS, Yolanda Andía, SEDAPAL Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN, Lima, Abril del 2000.

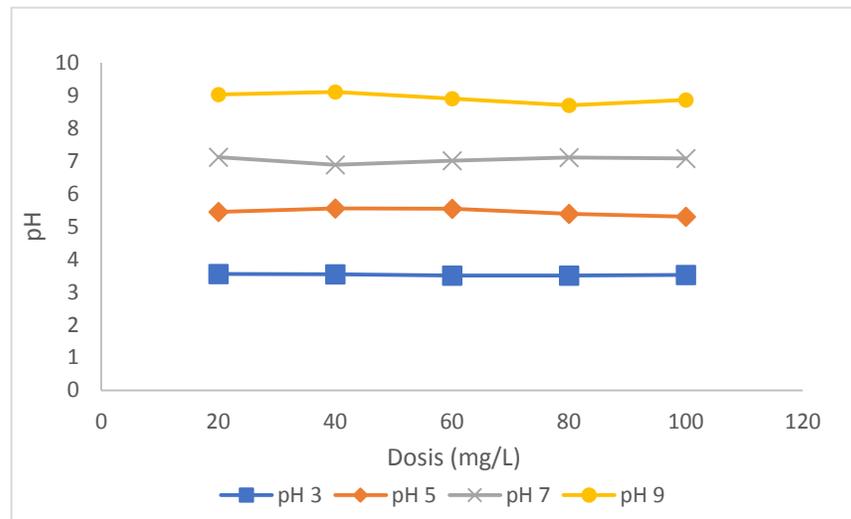
⁸¹ ARISMENDI ESPINOSA WILLIAM ANDRÉS, EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD FLOCULANTE DE TANINOS MODIFICADOS, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, 2016.

⁸² HENDRAWATI et al 2016 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 31 012033

⁸³ HENDRAWATI et al 2016 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 31 012033

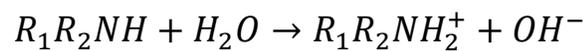
pues dentro de este rango no se sufre una afectación en el tiempo de formación de flóculos.⁸⁴ Adicionalmente, los resultados obtenidos son favorables desde el punto de vista industrial para los procesos de tratamiento de aguas, ya que al no ser necesario tener que hacer una corrección posterior del pH, el proceso se vuelve altamente rentable⁸⁵.

Gráfica 2. Curva de pH con extracto de moringa



Fuente: elaboración propia

La reacción química entre el agua y el polielectrolito catiónico indicada anteriormente es la siguiente:

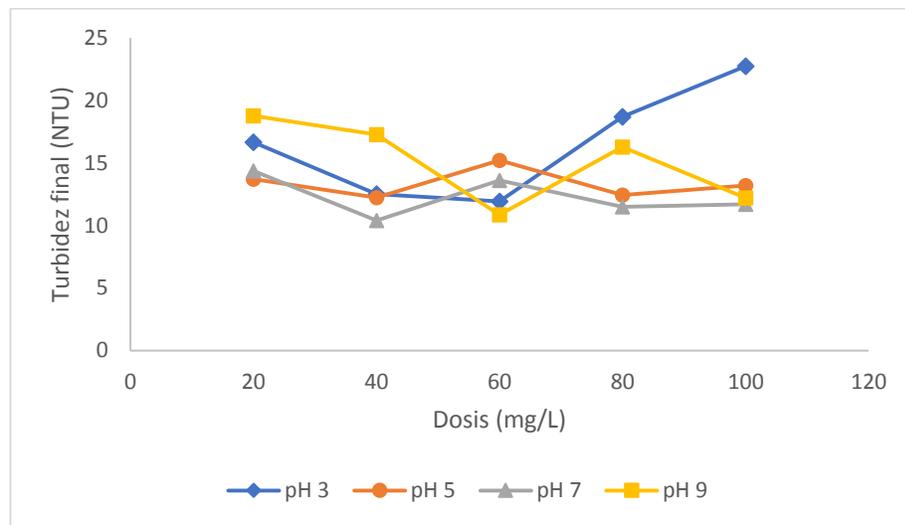


⁸⁴ CALDERA Marín YAXCELYS Antonia, EFECTO DEL PH DE AGUAS CON ALTA TURBIDEZ EN LA EFICIENCIA DEL COAGULANTE, Núcleo Costa Oriental del Lago. Universidad del Zulia (LUZ), 2017.

⁸⁵ LÉDO, Patricia G.S, LIMA, Raquel F.S, Paulo, JOÃO B.A, & DUARTE, Marco A.C. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillas de Moringa oleifera para la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad. Information technological, 20(5), 3-12.

6.4.2 Influencia de la dosis sobre la turbidez final. La gráfica 3 permite determinar que la variación de dosis en las muestras con aplicación del coagulante sin extracción de aceite, se evidencian diferencias significativas en todo el desarrollo experimental donde se logra comprobar que los valores de mayor turbidez se dan en dosis con concentraciones mayores a 80 mg/L, se observan los cambios más variables en todo el transcurso del desarrollo experimental ya que se presentan diversos valores de turbidez final con un rango muy amplio que va de 10 a 23 NTU, considerando los resultados se determina que el factor con mayor influencia en la variable respuesta es la dosis, teniendo en cuenta que se observaron eficiencias superiores al 95% en dosis de 40 y 60 mg/L.

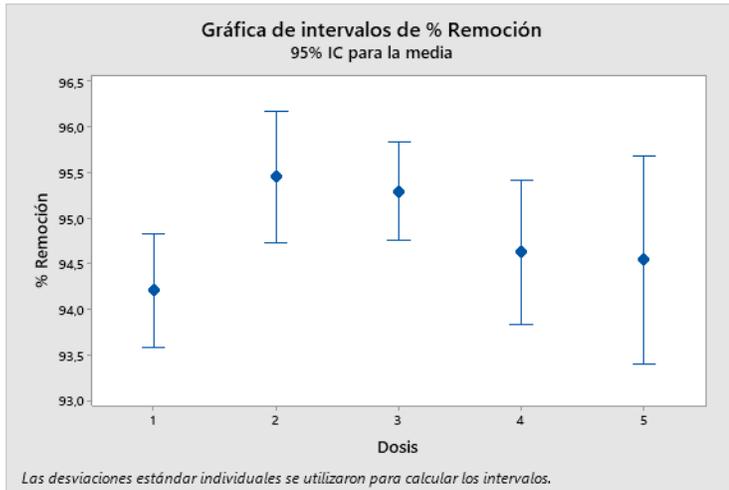
Gráfica 3. Curva de turbidez con extracto de moringa



Fuente: elaboración propia

En la figura 18 se presentan los resultados de los intervalos de confianza del porcentaje de remoción vs la dosis de coagulante, la cual fue desarrollada del diseño de experimentos que contaba con dos factores para su relación, teniendo en cuenta un IC del 95% para la media.

Figura 18. Intervalos de porcentaje de remoción vs Dosis



Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19.

6.4.3 Análisis Estadístico. Se realiza un análisis estadístico con el fin de determinar las variables con mayor efecto significativo sobre la variable respuesta que es el porcentaje de remoción (%RT) de los diversos tratamientos ejecutados. La turbidez del agua patrón fue medida antes de comenzar el proceso experimental, obteniendo un resultado de 277 NTU.

Los valores arrojados por el visor de datos de MINITAB 19, se muestran a continuación:

Tabla 7. Resultados – Visor de datos del desarrollo experimental

Columna		No desaparecido	Único	Mínimo	Máximo
Nombre	Tipo	Valores	Valores		
% RT	Numérico	60	20	91.59	96.79

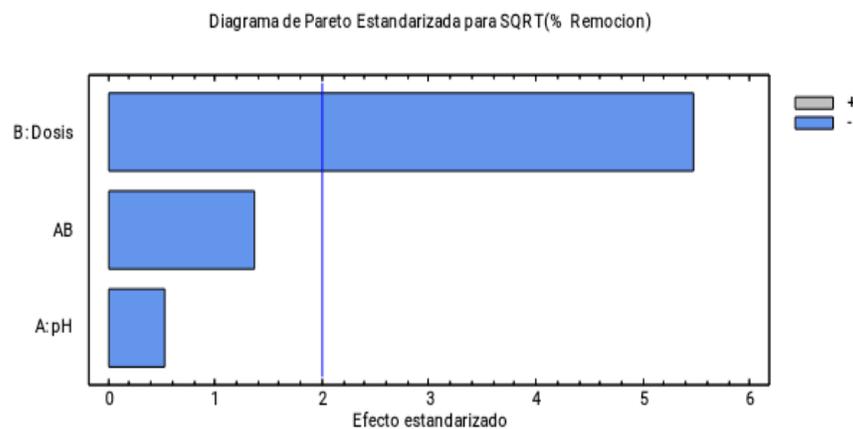
Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19.

Con el propósito de establecer si existen diferencias significativas en los resultados obtenidos y teniendo en cuenta el diseño de experimentos anteriormente elaborado, es necesario aplicar un análisis de ANOVA, donde cada uno de los resultados permitirán definir las condiciones óptimas del tratamiento de aguas, con la influencia de los resultados del test de jarras, posteriormente de aplicar las dosis propuestas a cada una de las muestras a diferentes variaciones de pH.

La figura 19, determina el efecto de cada uno de los factores experimentales, en este proceso se demuestra que el factor B, que es la dosis de coagulante es la que

genera el mayor efecto significativo en nuestra variable respuesta; % remoción. El diagrama de Pareto resalta los valores de datos que se presentan con mayor frecuencia en el desarrollo experimental representando el efecto con la más alta ocurrencia de un valor en específico.⁸⁶ La clase más alta es del 95.27% con un recuento de 6, el cual representa 10.0% del total de los resultados experimentales. El signo indica si es directa (+) o indirectamente (-) proporcional⁸⁷, como el factor con mayor significancia es el B, y con un signo (-) demuestra que presenta un efecto inversamente proporcional, mientras que el factor aumenta la variable de respuesta de turbidez final es menor, teniendo en cuenta afectaciones de micro flóculos que se pueden presentar en el desarrollo experimental.

Figura 19. Diagrama de Pareto para el efecto estandarizado de los factores



Fuente: elaboración propia con base en STATGRAPHICS Centurion

6.4.4 Análisis de varianza ANOVA

Figura 20. Desarrollo Análisis de Varianza

Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Dosis	Fijo	5	1; 2; 3; 4; 5
pH	Fijo	4	3; 5; 7; 9

⁸⁶ STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual

⁸⁷ MESA, Susana Arango, ORTEGA GONZÁLEZ, Wendy Paola, VANEGAS, Alejandro Álvarez, MEDINA ARROYAVE José David - Evaluación del extracto de semillas de Moringa oleífera como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

Figura 20. (Continuación)

Resumen del modelo

	S	R-cuad.	R-cuad.
		(ajustado)	(pred)
	0,735755	57,94%	44,01%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	3	9,327	3,1090	5,74	0,002
Dosis	4	29,457	7,3644	13,60	0,000
Error	52	28,149	0,5413		
Falta de ajuste	12	11,076	0,9230	2,16	0,034
Error puro	40	17,073	0,4268		
Total	59	66,934			

Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19.

En la figura 20, se despliega el desarrollo de la varianza y el resumen del modelo por el cual se obtuvo un coeficiente de regresión de 0.57 y que los valores obtenidos tienen un valor de $P < 0.05$, lo que determina que sí hay diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de cada uno de los factores evaluados, es decir, que con diferentes dosis aplicadas de coagulante en distintos pH de agua patrón, se obtuvieron diferentes respuestas en la turbidez final y por lo tanto, diferentes valores en el porcentaje de remoción.

Se expone que la hipótesis nula afirma que no hay efecto entre la variación entre el pH de la muestra y la dosis de coagulante, sin embargo, al analizar el valor de P, se determina que la hipótesis nula se rechaza, confirmando el hecho de que los dos factores si cuentan con diferencias significativas y tienen efecto sobre la turbidez final.

La ecuación de regresión muestra el modelo aplicado, donde se tienen en cuenta las diferentes variables que propuso el diseño de experimentos, como lo fueron la dosis de coagulante y el pH del agua patrón, se tiene en cuenta que no se observaron variables como la temperatura o velocidades de mezcla, ya que los ensayos del test de jarras se ejecutaron a una temperatura de 18 °C en condiciones de laboratorio y velocidades de mezcla rápida y lenta de 100 rpm y 40 rpm, respectivamente.

Ecuación 4. Ecuación del modelo aplicado

$$\% \text{ Remocion} = 94,9033 - 0,318 \text{ pH}_3 + 0,496 \text{ pH}_5 + 0,271 \text{ pH}_7 - 0,448 \text{ pH}_9 + 0,714 \text{ Dosis}_1 + 0,731 \text{ Dosis}_2 + 0,205 \text{ Dosis}_3 - 0,776 \text{ Dosis}_4 - 0,875 \text{ Dosis}_5$$

De esta manera, si el modelo se ajusta adecuadamente a los datos, la ecuación 4 se puede utilizar para predecir % de remoción para valores específicos de las variables independientes de este desarrollo experimental, o para encontrar la

configuración apropiada de variables independientes que corresponda a un valor o rango de valores deseados para un % de remoción específico⁸⁸.

La desviación estándar en el proceso mide cuanto se dispersan los valores en torno a su promedio, se tiene en cuenta que entre mayor es la desviación estándar, mayor es su dispersión generando una medida de riesgo en el cual los datos obtenidos no poseen una confiabilidad concreta⁸⁹, el valor de desviación es de 1.294, siendo este un valor adecuado para el desarrollo experimental planteado, donde las diferencias no son estadísticamente significativas.

Figura 21. Valores del modelo aplicado

Estadísticas	% Remoción
N	60
Media	94,824
IC de 95%	(94,5; 95,2)
Desv.Est.	1,2942

Fuente: elaboración propia con base en MINITAB 19.

Asumiendo el propósito de la determinación del pH y la dosis optima de coagulante sin extracción a partir de la semilla de *Moringa Oleifera* se determinan que con un desarrollo experimental y teniendo en cuenta las especificaciones dadas en el diseño de experimentos, el valor óptimo de dosis es de 40 mg/L, que indica el uso de 2 mL de coagulante por 1 L de agua residual sintética en un valor de pH de 7.

6.5 COMPARACIÓN MORINGA OLEÍFERA Y SULFATO DE ALUMINIO

La comparación de los dos coagulantes en muestras de agua tipo textil y residual doméstica, se basa en la relación que tiene la empresa comercial DACETEX LTDA con las industrias relacionadas. Adicionalmente, se tiene en cuenta que para este desarrollo experimental, se trabajó únicamente con una muestra de 10 L en ambos casos para evitar la descomposición del agua y se realizaron (2) réplicas para minimizar el error.

⁸⁸ MINITAB, LLC (2019) "Chapter 2", Getting Started with Minitab 19, p. 16-20 – www.minitab.com

⁸⁹ MINITAB, LLC (2019) "Chapter 5", Grafica de efectos principales de % de remoción, Tarjeta de Informe - Getting Started with Minitab 19, p. 16-20 – www.minitab.com

6.5.1 Muestra de agua tipo textil. La muestra de agua tipo textil que se evidencia en la figura 22, se obtuvo de Tintorería y Acabados Industriales Stone Colors S.A.S, en la ciudad de Bogotá. Esta empresa se dedica principalmente al lavado y limpieza de todo tipo de prendas de vestir y productos textiles para el público general o para clientes industriales y comerciales.

El proceso de elaboración de productos textiles maneja un gran número de operaciones unitarias retroalimentadas que disponen de diferentes materiales como el algodón, fibras sintéticas, lana, o la mezcla entre ellos. El impacto ambiental que abarca el agua residual textil suele ser diferente por la variedad de materias primas y reactivos utilizados según el método de producción, sin embargo, la principal fuente de agua residual es el baño de tinte y el agua de lavado, los cuales contienen subproductos (colorante hidrolizado), metales (arsénico, cadmio, cromo, cobalto, cobre, manganeso, mercurio, níquel, plata, titanio, zinc, estaño y plomo), tinta y productos químicos auxiliares⁹⁰. Adicionalmente, los colorantes tienen una fijación pobre sobre las telas y en la descarga se pueden encontrar concentraciones de colorante por encima de 1,500 mg/L⁹¹.

La tabla 8 muestra los resultados que se obtuvieron después de realizar el tratamiento por triplicado, para la muestra residual textil.

Figura 22. Montaje experimental agua textil



Fuente: elaboración propia

⁹⁰ GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando., HERNÁNDEZ Ángel, Marta Lucía., PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio., RODRÍGUEZ RESTREPO, Alejandra., SALAZAR PALACIO, Julián Andrés., Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis. Revista Lasallista de Investigación [en línea]. 2005, 2(1), 15-18

⁹¹ CORTÁZAR MARTÍNEZ, A., CORONEL OLIVARES, C., ESCALANTE LOZADA, A., & GONZÁLEZ RAMÍREZ, C. (s.f.). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado 6 octubre, 2019, de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>

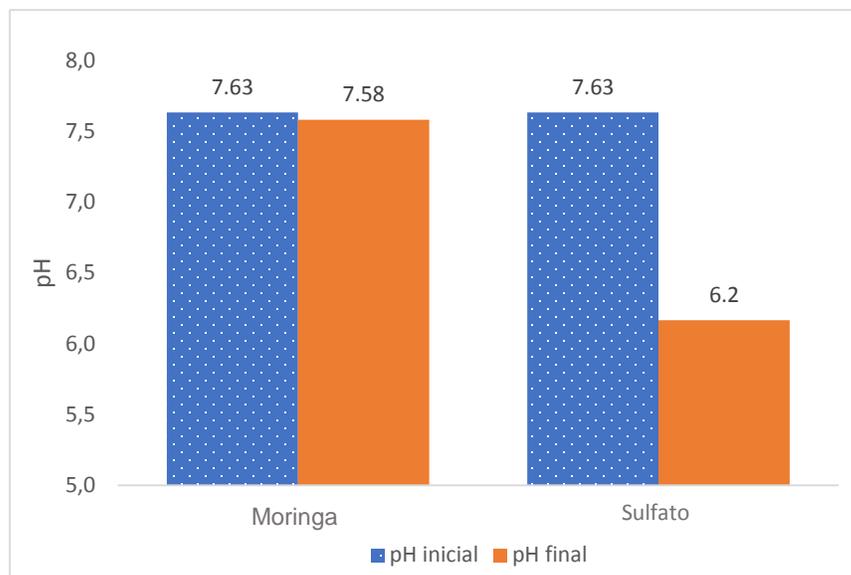
Tabla 8. Resultados agua textil (Promedio)

	Moringa	Sulfato
pH inicial	7.63	7.63
pH final	7.58	6.16
Turbidez inicial (NTU)	72.9	72.9
Turbidez final (NTU)	24.9	17.2
% Remoción	65.89	76.36

Fuente: elaboración propia

La muestra de agua textil inicialmente no presentaba el pH óptimo de 7 para llevar a cabo las pruebas, por lo que, fue necesario realizar un ajuste de pH con ácido clorhídrico 1M. Según los resultados de la gráfica 4, con la moringa el pH se mantuvo en un rango entre 7.63 y 7.58, a diferencia del sulfato de aluminio que redujo considerablemente el valor de 7.63 a 6.16.

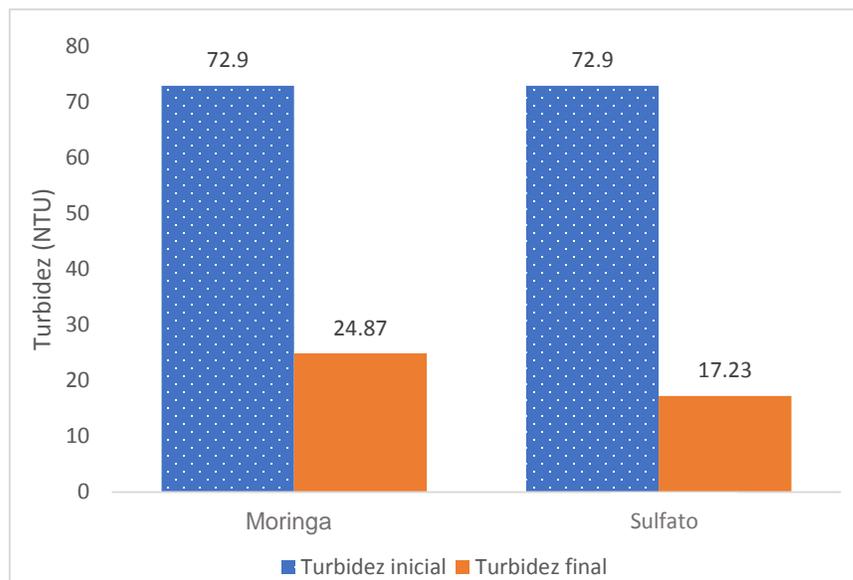
Gráfica 4. Comparación entre el pH final e inicial en agua tipo textil



Fuente: elaboración propia

En la gráfica 5, se puede identificar la variación de la turbidez después del ensayo de jarras. Por un lado, con una dosis de 40 mg/L, el sulfato de aluminio redujo la turbidez inicial de 72.9 NTU a 17.2 NTU con un porcentaje de remoción del 76.36%. No obstante, la moringa se trabajó con la misma dosis y alcanzó una turbidez final de 24.9 NTU con un porcentaje de remoción del 65.89%. Del resultado obtenido, se puede concluir que para el agua tipo textil, el rendimiento del sulfato de aluminio es aproximadamente un 10% mayor.

Gráfica 5. Comparación turbidez final e inicial en agua textil



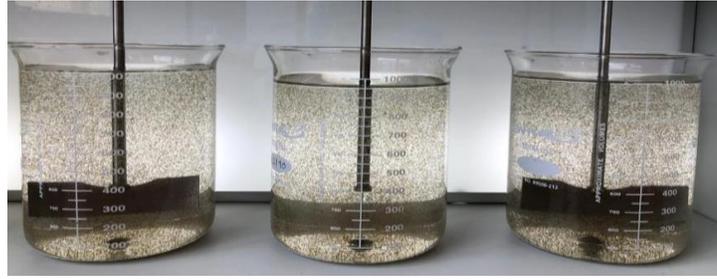
Fuente: elaboración propia

6.5.2 Muestra de agua residual doméstica. La muestra de agua residual doméstica que se expone en la figura 23, fue recogida de un pozo séptico ubicado en el barrio Las ferias de Bogotá; Este pozo, se caracteriza porque es el punto al que llega toda el agua doméstica residual de la localidad de Engativá.

Las aguas domésticas son principalmente de origen residencial (baños, cocina, lavandería, desechos humanos, etc.) y generalmente son recolectadas por las redes de alcantarillado en conjunto con residuos producidos por establecimientos comerciales, públicos y similares. Se estima que las aguas residuales domésticas tienen un contenido de apenas 0.1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, sin embargo, esta pequeña fracción de sólidos es la que genera el mayor problema en cuanto a su tratamiento y disposición⁹². En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para el agua residual doméstica.

⁹² DÍAZ-CUENCA, Elizabeth., ALVARADO-GRANADOS, Alejandro Rafael., CAMACHO-CALZADA, Karina Elizabeth., El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales. 2012, 14(1), 78-97.

Figura 23. Ensayo de jarras del agua residual doméstica.



Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Resultados agua residual doméstica (Promedio)

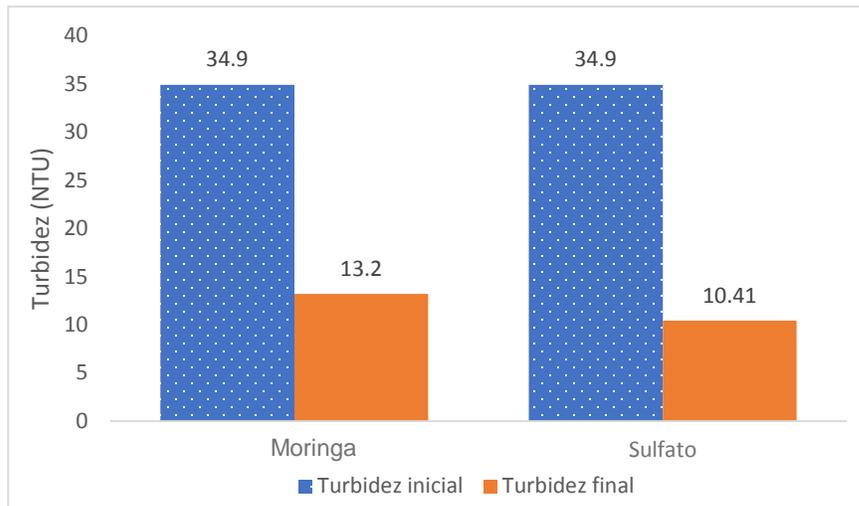
	Moringa	Sulfato
pH inicial	7.21	7.21
pH final	7.28	6.51
Turbidez inicial (NTU)	34.9 NTU	34.9 NTU
Turbidez final (NTU)	13.2 NTU	10.4 NTU
% Remoción	62.18	70.17

Fuente: elaboración propia

En la gráfica 6 se evidencia que la moringa redujo la turbidez inicial de 32.9 NTU a 13.2 NTU con un porcentaje de remoción de 62.18% y el sulfato de aluminio con un porcentaje de remoción de 70.17% obtuvo una turbidez final de 10.4 NTU. De esta manera, es posible establecer que existe una similitud entre ambos coagulantes ya que, el sulfato está únicamente 2.8 puntos por encima del coagulante natural en los valores de la turbidez final.

No obstante, los resultados obtenidos son un indicativo de que se podría alcanzar un mayor porcentaje de remoción en el tratamiento del agua doméstica, si se realiza el ensayo a diferentes dosis.

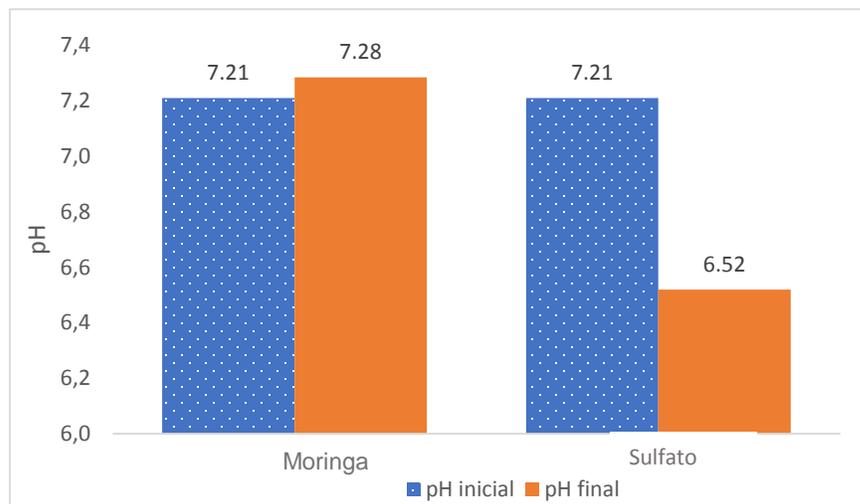
Gráfica 6. Comparación turbidez final e inicial en agua doméstica



Fuente: elaboración propia

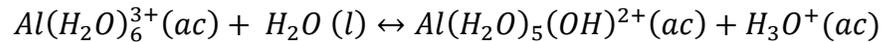
En la gráfica 7, se observar el comportamiento del pH en la muestra de agua doméstica y las diferencias entre el Sulfato de Aluminio y la Moringa Oleífera. El agua inicialmente se encontraba a pH 7, sin embargo, una vez realizado el ensayo de jarras se pudo evidenciar en los resultados que el sulfato de aluminio redujo significativamente el valor del pH pasando de 7.21 a 6.51. Por el contrario, el pH aumentó ligeramente de 7.21 a 7.28.

Gráfica 7. Comparación entre el pH final e inicial en agua doméstica



Fuente: elaboración propia

6.5.3 Influencia del sulfato de aluminio sobre el pH. El Sulfato de Aluminio produjo para ambos casos un descenso del pH, el cual ocurre debido a la hidrólisis del aluminio. En una disolución acuosa, el ion aluminio se asocia con seis moléculas de agua y el correspondiente equilibrio ácido-base, libera iones oxidanio H_3O^+ .



Adicionalmente, los productos de la hidrólisis con iones cargados positivamente se pueden absorber en las partículas negativas, reduciendo la carga y modificando el signo de las partículas cargadas⁹³. Por lo cual En consecuencia, a diferencia de la M. Oleífera, para trabajar con Sulfato de Aluminio en los procesos de coagulación, es importante mantener un control del pH.

De acuerdo con los resultados, la acción coagulante de la semilla de moringa puede llegar a ser comparable con el Sulfato de Aluminio. Los porcentajes de remoción obtenidos son semejantes y la baja influencia que tiene la moringa sobre el pH, posiciona al coagulante como un posible candidato para el tratamiento de aguas a nivel industrial.

⁹³ PINOTTI, A., & ZARITZKY, N. (2001). Effect of aluminum sulfate and cationic polyelectrolytes on the destabilization of emulsified wastes. *Waste Management*, 21(6), 535–542.

7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÉTODO SELECCIONADO

7.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO

Dentro de los principales aspectos a tener en cuenta para diseño, se cuenta con la capacidad de la planta, su ubicación, la caracterización de los equipos para la producción del coagulante y los servicios industriales que requiere el proceso. Las especificaciones de diseño deben adecuarse a las diversas necesidades y condiciones del lugar donde se va a implementar la planta de tratamiento de agua.

Para llevar a cabo el diseño, se tomó como referencia la planta de tratamiento de agua residual– PTAR El Salitre, ubicada en la desembocadura del río Juan Amarillo en la localidad de Engativá, la cual capta las aguas residuales del centro y norte de la ciudad de Bogotá. A su estructura llegan 15 m³/s de agua, pero en la actualidad solo puede abarcar 4 m³/s para su tratamiento primario.⁹⁴

Basados en el suministro de la planta y su canal de tratamiento de agua, donde el coagulante utilizado es cloruro férrico, la dosis que se maneja para aguas de tipo superficial varía normalmente de 22 a 35 mg/L.⁹⁵ Se tiene en cuenta que en la actualidad la PTAR trabaja 15 horas 365 días del año. Las condiciones de producción se muestran a continuación:

Tabla 10. Condiciones y valores de producción de coagulante

Suministro PTAR	Dosis Coagulante	Caudal de Tratamiento	Producción Coagulante
14400 m ³ /h	1,2 m ³	31.6 m ³ /h	0.07897 m ³ /h
		758.4 m ³ /día	1.8952 m ³ /día
		22752 m ³ /mes	56.858 m ³ /mes

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la referencia de suministro de agua a tratar en la PTAR El Salitre⁷⁹, se determina el uso de 56.858 m³ de coagulante al mes, por lo cual para la elaboración del diseño se estableció un valor de 60 m³ al mes.

⁹⁴ PTAR El Salitre un complemento para la descontaminación del Río Bogotá, PTAR EL SALITRE, Empresa Acueducto de Bogotá, CAR (Protección Ambiental), Bogotá D.C, Enero 2013.

⁹⁵ COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO –CRA, Modificación, Por La Causal De Mutuo Acuerdo, Del Costo De Referencia Descargo Por Consumo Del Servicio Público Domiciliario De Alcantarillado Para Incorporar Los Costos De Tratamiento De Aguas Residuales De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales, Ptar Salitre, Presentada Por La Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá E.S.P. Noviembre, 2009.

Capacidad de la planta: La planta operará 12 horas al día los 350 días al año, produciendo 2 m³ de coagulante al día.

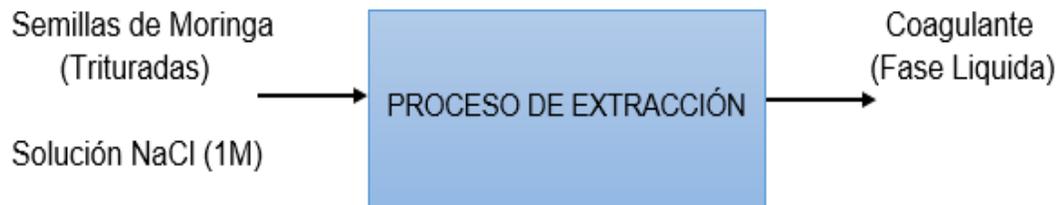
Ubicación de la planta: La planta se ubicaría a las afueras de la ciudad de Bogotá. El clima es moderadamente frío, la temperatura oscila entre 9°C a 20°C. La humedad relativa se encuentra entre 77% al 83%⁹⁶.

Servicios Industriales: La energía eléctrica y el agua potable son los servicios de mayor importancia para el funcionamiento total de la planta, teniendo en cuenta las unidades de operación.

Con las condiciones óptimas obtenidas en los resultados del desarrollo experimental, se realizan las diferentes etapas del diseño conceptual para la producción a nivel escalado del coagulante de *Moringa Oleifera* sin extracción de aceite.

7.1.1 Diagrama de bloques. El diagrama se usa como una herramienta para lograr entender conceptualmente cada entrada y salida que genera el proceso.⁹⁷

Figura 24. Diagrama de entradas y salidas



Fuente: elaboración propia

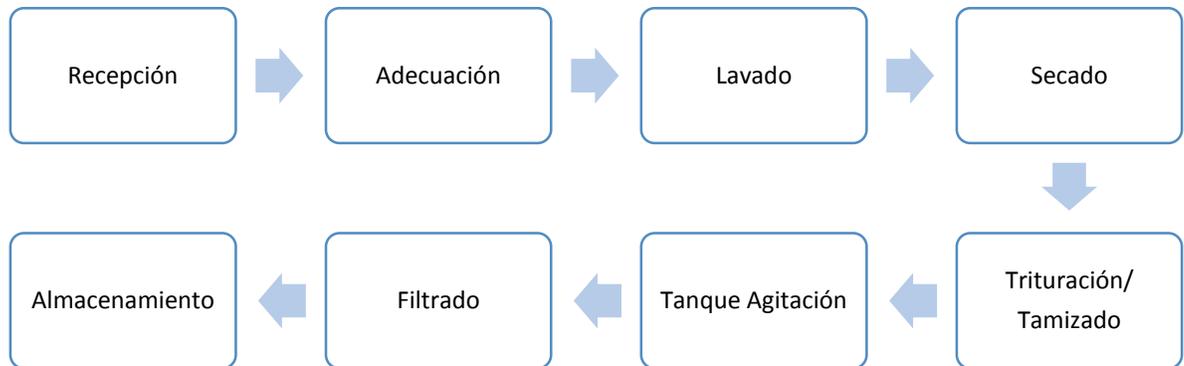
En el diagrama de entradas y salidas representado a través de la figura 24 se puede identificar las materias primas requeridas para el desarrollo a nivel industrial y los productos principales y secundarios correspondientes a la elaboración del coagulante.

En la figura 25 se presenta mediante bloques y flechas, las principales unidades de operación.

⁹⁶ Ideam, Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos, 2013

⁹⁷ T. E. Welch, Moving Beyond Environmental Compliance, New York: Lewis Publishers, 1998

Figura 25. Etapas de operación



Fuente: elaboración propia

Descripción del proceso

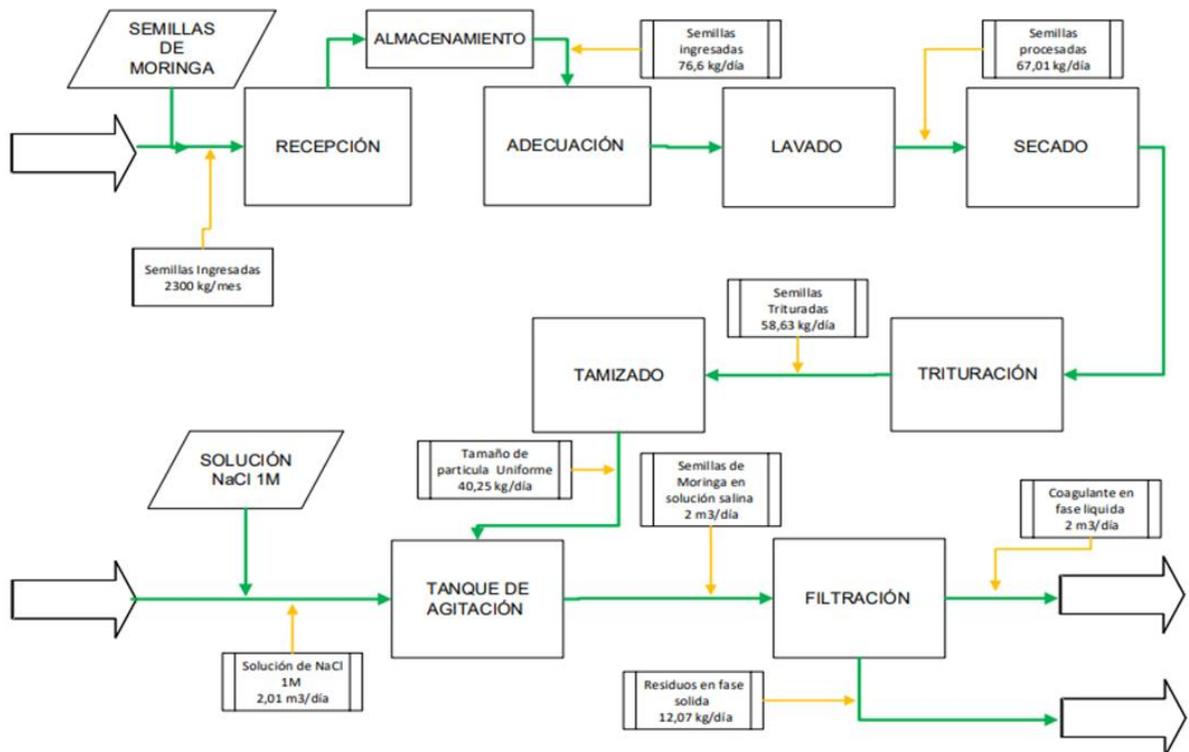
El proceso de elaboración del coagulante inicia con la recepción de las semillas donde se utilizan 46 bultos de 50 kg c/u, para ingresar al área de recepción y adecuación un valor total de 2300 kg de semilla de *Moringa Oleifera* al mes. La materia prima se conservará en un cuarto de almacenamiento antes del proceso de adecuación, para el cual se tendrá en cuenta la capacidad de producción de 2 m³ de coagulante al día.

Para el proceso de extracción del componente activo (MOC-SC-PC) de la *Moringa Oleifera*, ingresarán 76,6 kg/día de semilla descascarada a la etapa de lavado, posteriormente las semillas se llevarán al horno donde se secarán durante 6 horas a una temperatura de 60°C.⁹⁸ Las semillas ya secas se triturarán en un molino triturador OLCB hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 0.425 mm, para luego mezclar el polvo con la solución de NaCl en un tanque de almacenamiento con agitación. Para evitar impurezas en el producto final, se filtrará la solución en un filtro de separación y finalmente, la solución pasará a un tanque almacenamiento donde quedará disponible para el proceso de embalaje y etiquetado.

⁹⁸ MESA, Susana Arango, ORTEGA GONZÁLEZ, Wendy Paola, VANEGAS Alejandro, MEDINA ARROYAVE, José David - Evaluación del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

Con el uso del software para diagramas Microsoft Visio 2019, se construye el diagrama de bloques que se observa en la figura 26, mediante el cual se busca exponer de manera general las unidades principales del proceso de extracción de las semillas de *Moringa Oleifera*.

Figura 26. Diagrama de bloques



Fuente: elaboración propia

7.1.2 Diagrama de flujo de proceso (pfd). Se crea un diagrama de flujo de proceso básico, localizando las unidades del proceso que se van a diseñar conceptualmente.

M-100: Molino triturador TRF tipo 90, para pulverizar las semillas de manera uniforme con el uso de rodillos en perfil de movimiento cíclico.

L-100: Lavadora general industrial, para el área de lavado, limpieza de impurezas en la materia prima ingresada.

H-100: Horno de convección forzada para el proceso de secado de la semilla posterior a la limpieza realizada en el área de lavado.

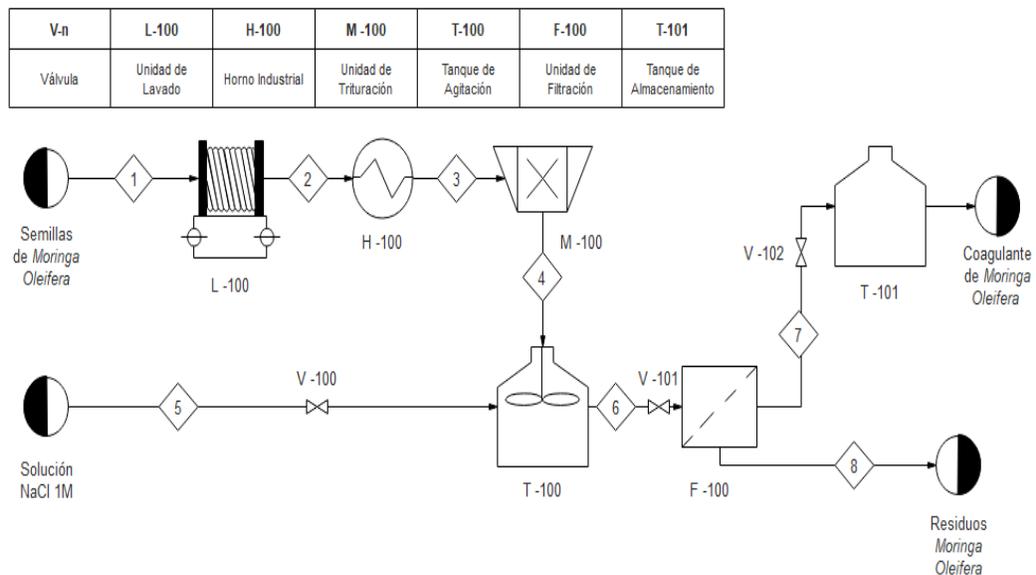
T-100: Tanque de agitación para la solución de NaCl a una concentración 1M para el proceso de extracción de las semillas de *Moringa Oleifera*, con el uso de un agitador de tipo pala.

F-100: Filtro de separación de la fase solida de la semilla sedimentada en la solución y la fase liquida del coagulante elaborado.

T-101: Tanque de almacenamiento del coagulante disponible para el proceso de embalaje.

Adicionalmente, en la figura 27 se puede observar el diagrama de unidades y corrientes, donde se muestran las principales características de los equipos instalados y sus etapas.

Figura 27. Diagrama de unidades y corrientes



Fuente: elaboración propia

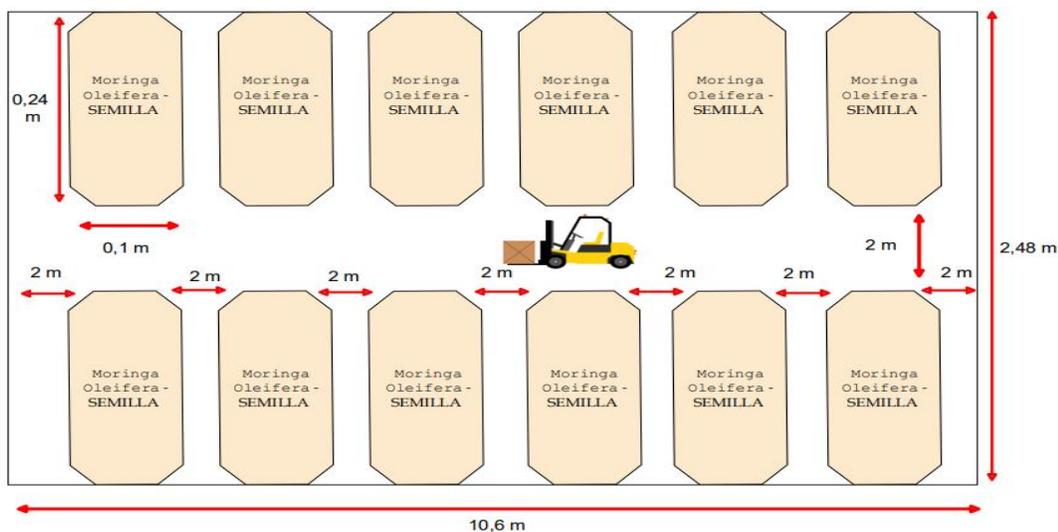
7.1.3 Especificaciones de equipos.

- **Cuarto de almacenamiento.** El cuarto de almacenamiento se dimensiona para la posterior etapa de recepción de las semillas de *Moringa Oleifera*. Se debe tener en cuenta la superficie de un bulto de 50 kg en peso, el cual consiste en 100 cm de ancho por 60 cm de alto⁹⁹, para adecuar los 2300 kg de semilla de

⁹⁹ ALIBABA GLOBAL TRADE STARTS Empaquetado e Impresión – Bolsas de Embalaje, 50 Kg - Here, 2019.

Moringa Oleifera que se necesitan al mes, para la producción de 60 m³ de coagulante.

Figura 28. Dimensionamiento cuarto de almacenamiento



Fuente: elaboración propia

Se tuvo en cuenta para el área de disposición, la capacidad de contener la cantidad requerida de semillas *Moringa Oleifera* con un aumento de aproximadamente 10% más de área, por procesos de contención en diversas situaciones que se puedan presentar en la producción por lotes del coagulante. La figura 28 muestra que el área cuenta con espaciamentos de 0,1 m x 2,4 m en proporción de materia prima, ya que se espera la adecuación de 4 bultos en peso a lo alto del cuarto de almacenamiento, con una disposición de 2 m entre ellos para pasillos de paso y transporte. La tabla 11 se resalta los resultados del dimensionamiento del cuarto de almacenamiento.

Tabla 11. Variables para el dimensionamiento del cuarto de almacenamiento

Variables	Valor	Unidades
Capacidad	2300	kg
Capacidad + 10%	2530	kg
Largo	10.6	m
Alto	2.48	m
Área Total	26.28	m ²

Fuente: elaboración propia

- **T-100: Tanque de agitación.** El tanque debe mantener la distribución de un sólido disperso en un fluido cuyo objetivo es mantener los sólidos en suspensión, conseguir una distribución homogénea y disolver sólidos.¹⁰⁰

Este tiene forma cilíndrica y un agitador magnético ajustado con un motor eléctrico para su rotación, el impulsador será de tipo pala porque gira sobre un eje vertical y cumple eficazmente con procesos de suspensión, dispersión y homogenización para productos pocos viscosos.¹⁰¹ Los agitadores tipo pala giran en velocidades comprendidas entre 20 a 150 rpm.

En la tabla 12, se observan los resultados obtenidos según las diferentes variables para el dimensionamiento del tanque de agitación.

Tabla 12. Variables para el dimensionamiento del tanque de agitación

Variables	Valor	Unidades
Caudal	2	m ³ /día
Volumen	2	m ³
Volumen + 10%	2.2	m ³
Diámetro	1	m
Alto	2.8011	m

Fuente: elaboración propia

La relación óptima de altura/diámetro=3, pero el rango va de 2.5 a 5, y el espacio libre superior que debe tener un tanque de agitación se basa en el valor de 10% por encima de 1.9 m¹⁰². El flujo depende del tipo de impulsor y características del fluido.

Se dispondrá de un agitador magnético de tipo pala, por su trabajo con productos de baja viscosidad y agitación. Su funcionamiento permite generar un gran caudal de recirculación dentro del tanque, por lo cual permite una mezcla homogénea en el menor tiempo posible. Para determinar la potencia del agitador de tipo pala, se calculó el número de Reynolds con la ecuación 5, estableciendo el comportamiento del flujo. Adicionalmente, en la tabla 13 se evalúan las diferentes variables.

¹⁰⁰ VLADIMIR CASTILLO Uribe, DISEÑO Y CÁLCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS, Facultad de Ingeniería - Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013

¹⁰¹ INOXPA, Source of Solutions, Agitadores para los Depósitos Estándares, 2015.

¹⁰² TURTON – WALAS, Heurísticas para tanques de procesos, "Chemical Process Equipment: Selection and Design", <https://www.scribd.com/document/171528606/HEURISTICA-pdf>.

Ecuación 5. Número de Reynolds

$$Re = \frac{N * D^2 * \rho}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

N: Velocidad de Rotación (rps)

ρ : Densidad del Fluido (kg/m³)

μ : Viscosidad Dinámica (Pa*s)

Tabla 13. Variables para el cálculo del número de Reynolds

Variables	Valor	Unidades
Densidad Fluido	1000	Kg/ m ³
Viscosidad (16°C)	0.001109	Pa*s
Velocidad de Rotación	50	rpm
	0.83	rps
Diámetro del Agitador	0.46685	m
Reynolds	830,000	-

Fuente: elaboración propia

Asimismo, se calcula la potencia del agitador con la siguiente ecuación, se emplea para Reynolds mayores a 10,000, donde KT es la constante determinada por cada tipo de impulsor a utilizar, en este caso un impulsor tipo pala posee un valor de 1.7¹⁰³. Se tiene en cuenta que la longitud total de un rodete de palas comprende entre 50 y el 80% del diámetro interior del tanque y la anchura de la pala de 1/6 en longitud.

Ecuación 6. Potencia agitador

$$P = KT * N^3 * da^5 * \rho$$

Donde:

P: Potencia (HP)

N: Velocidad de Rotación (rps)

ρ : Densidad del Fluido (kg/m³)

da: Diámetro del agitador (m)

¹⁰³ VLADIMIR CASTILLO Uribe, DISEÑO Y CALCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS, Universidad del Bio-Bio, Octubre 2013.

Con base en los parámetros, se pueden observar los resultados en la tabla 14:

Tabla 14. Variables para el cálculo de la potencia del agitador

KT	1.7
Potencia (HP)	21.5560
Potencia (KW)	16.0743

Fuente: elaboración propia

- **F-100: Filtro de separación.** El diseño del filtro debe cumplir con los parámetros de tamaño de partícula posterior a la trituración de las *Semillas de Moringa*, el diámetro de abertura debe ser menor al tamaño de partícula, lo que corresponde a 0.425 mm en el proceso. La filtración es esencialmente, una operación mecánica, que no requiere una gran cantidad de energía por lo cual se utilizara un filtro por lotes de acuerdo con su ciclo de operación, que determina la extracción de la torta residual después de cierto tiempo.¹⁰⁴ Una vez se establecieron los parámetros de diseño, se obtienen el tabla 15 los resultados del dimensionamiento del filtro.

Tabla 15. Variables para el dimensionamiento del filtro de separación

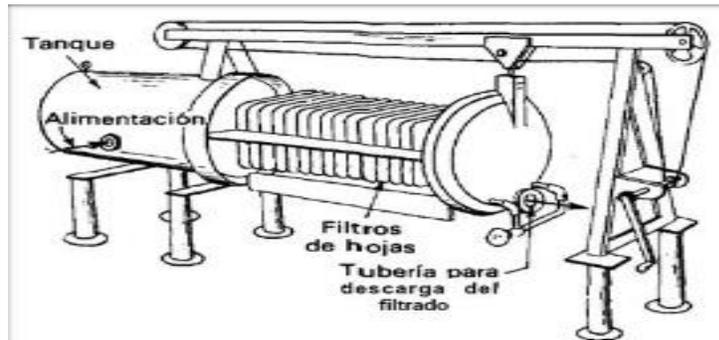
Variables	Valor	Unidades
Caudal	2	m ³ /día
Volumen	2	m ³
Volumen + 10%	2.2	m ³
Área de Filtración	15	m ²
Área	26	m ²

Fuente: elaboración propia

Un filtro de hojas horizontal puede tratar grandes volúmenes de suspensión con un lavado más eficiente, cada hoja del equipo estará cubierta de un medio filtrante, el cual consiste en telas sintéticas con captación para evitar obstruir los poros y que la velocidad del proceso no sea muy lenta. Los filtros de hojas se pueden automatizar para el ciclo de filtración, lavado y limpieza, pero su funcionamiento es cíclico, porque, para el uso de procesos por lotes o producción relativamente modesta, es el equipo más adecuado.

¹⁰⁴ MARTÍNEZ SALDAÑA, Yurico Elizabeth, Filtración, Laboratorio No 3 de Ingeniería de Alimentos, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, 2011.

Figura 29. Filtro de placas horizontales



Fuente: MEDICA PANAMERICANA - Operaciones de Separación Mecánica

Como se observa en la figura 29, en el filtro cada una las hojas está rodeada con la tela filtrante de modo que la torta queda depositada en el exterior y el líquido claro pasa al interior, bien sea por condiciones de operación al vacío o por presión.¹⁰⁵ Se determinó el uso de un filtro de hojas horizontales modelo SFH-SR/1600/70/28.¹⁰⁶

- **T-101: Tanque de Almacenamiento.** El diseño debe ser apto para contener la producción diaria de la planta. El tanque requiere de un sobredimensionamiento el cual se trabajó con la heurística de volumen de 1.5 ¹⁰⁷ para obtener los resultados mostrados a continuación:

Tabla 16. Variables para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Variables	Valor	Unidades
Caudal	2	m ³ /día
Volumen	2	m ³
Volumen + 10%	2.2	m ³
Diámetro	1	m
Alto	2.8011	m

Fuente: elaboración propia

Para el tanque de almacenamiento se debe considerar mantener la temperatura del coagulante constante, puesto que requiere de condiciones óptimas para su conservación y eficiencia. Por esta razón, se utilizará un cuarto frío.

¹⁰⁵ LOZANO Harold, Marriaga Dayana, MARTÍNEZ Carlos, RANGEL Deiler, Filtros de Hojas. Universidad de Córdoba-Facultad de Ingenierías – Ingeniería de Alimentos, 2017.

¹⁰⁶ SHARPLEX, Models & Specifications – Horizontal Pressure Leaf Filter – 2018.

¹⁰⁷ TURTON – WALAS, Heurísticas para tanques de procesos, “Chemical Process Equipment: Selection and Design”, <https://www.scribd.com/document/171528606/HEURISTICA-pdf>.

- **M-100: Molino Triturador.** El molino triturador debe ser capaz de procesar un mínimo de 68 kg de semillas de *Moringa Oleifera* al día, por lo cual el molino triturador TRF tipo 90 es el adecuado en el proceso de producción, ya que tiene la capacidad de triturar semillas oleaginosas y logra alcanzar el tamaño de partícula deseado de 0.425 mm con un consumo mínimo de energía. Los resultados obtenidos del dimensionamiento se pueden observar en la tabla 17.

Tabla 17. Variables para el dimensionamiento del Molino Triturador

Variables	Valor	Unidades
Capacidad	30-60	kg/h
Producción	34	kg/h
Potencia	1.4914	kW

Fuente: elaboración propia

- **H-100: Horno Industrial.** El horno se debe mantener como una cámara totalmente separada capaz de calentar el aire del proceso aproximadamente a 60°C durante 6 horas. La capacidad debe contar con un peso máximo de 76.6 kg, obteniendo los 67.01 kg/día necesarios para producir 2 m³ de coagulante al día. El horno se determina como marca BINDER, tipo FD 115¹⁰⁸. A continuación, se presentan las variables para el dimensionamiento del horno industrial:

Tabla 18. Variables para el dimensionamiento del Horno Industrial

Variables	Valor	Unidades
Capacidad	70	kg
Producción	67	kg
Potencia	1.6	kW
Largo	0.835	m
Ancho	0.705	m
Alto	0.645	m
Tiempo Calentamiento	105°C - 16.18	min

Fuente: elaboración propia

- **L-100: Lavadora general industrial.** La lavadora debe retirar completamente cualquier impureza, cumpliendo con los requerimientos del proceso de elaboración del coagulante. Se debe indicar el control de tiempo de lavado de las semillas de *Moringa Oleifera*, con el propósito de que, al finalizar la etapa, el operador pueda retirar las semillas sin necesidad de tocarlas y se pueda pasar

¹⁰⁸ MESA Susana Arango, ORTEGA GONZÁLEZ Wendy Paola, ÁLVAREZ VANEGAS Alejandro, MEDINA ARROYAVE José David - Evaluación del extracto de semillas de *Moringa oleifera* como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

directamente al proceso de secado. Las variables para el dimensionamiento se evalúan en la tabla 19.

Tabla 19. Variables para el dimensionamiento de la lavadora general

Variables	Valor	Unidades
Capacidad	20 - 40	kg/h
Producción	38.3	kg/h
Potencia	1.5	kW
Largo	0.175	m
Ancho	0.110	m
Alto	0.110	m

Fuente: elaboración propia

Se ve involucrado el uso de equipos secundarios como un descascarador de semillas tipo KMEC para el proceso de adecuación, con una capacidad de 77 kg/día como también el uso de una banda transportadora de tipo modular que albergue el área de recepción y cuente con un proceso de calidad en la selección de las semillas de *Moringa Oleifera*, ya que se deben verificar factores como la maduración, el color y la disposición, para evitar el uso de materia prima con reblandecimiento o desecación extrema.

En la tabla 20 se evidencian las principales características de diseño en cada uno de los equipos para el esquema de una planta de producción de coagulante a partir de la semilla de *Moringa Oleifera*.

Tabla 20. Características principales dimensionamiento de equipos

Equipo	Cantidad	Material	Características	
			Capacidad	Potencias
T – 100 Tanque de Agitación	1	Acero Inoxidable	2.2 m ³	16.0743 KW
T-101: Tanque de Almacenamiento	1	Acero Inoxidable	2.2 m ³	-
F-100: Filtro de Separación	1	Acero Inoxidable	2.2 m ³	12.271 KW

Tabla 20 (Continuación)

M-100: Molino Triturador	1	Acero Especial - Tratamiento Anticorrosivo	34 Kg/h	1.4914 KW
H-100: Horno Industrial	1	-	11.16 Kg/h	1.6 KW
L-100: Lavadora Industrial	1	Acero Inoxidable	38.3 Kg/h	1.5 KW
Descascarador de Semillas	1	Acero Inoxidable	10 Kg/h	1.22 KW
Banda Transportadora	2	Teflón	10 Kg/h	0.2 – 1.0 KW

Fuente: elaboración propia

- **Cuarto frío de almacenamiento.** En la última etapa del proceso se considera para el cuarto frío, la carga térmica por el tiempo deseado de funcionamiento. Se habla de equipos de baja temperatura para la conservación del producto por tiempos aproximados de 20 -22 horas.¹⁰⁹

Tabla 21. Variables para el dimensionamiento del cuarto frío

Variables	Valor	Unidades
Pared Lateral I	15	m ²
Pared Lateral II	15	m ²
Pared Posterior	12	m ²
Pared Principal	12	m ²

Fuente: elaboración propia

La transmisión de calor que se puede dar a través de las paredes se define de acuerdo con las dimensiones que requiera el cuarto, la tabla 21 representa las variables para el dimensionamiento del cuarto frío, basando su valor en las dimensiones necesarias de tanque de almacenamiento y establecimiento de zona de embalaje. El coeficiente global de transferencia de calor (K) se evidencia en la tabla 22 y se obtiene de las especificaciones técnicas del panel de referencia de aislación, solo se toma en cuenta las paredes en el proceso ya que la aislación del suelo puede ser despreciable si se quieren mantener son

¹⁰⁹ DIRECCIÓN GENERAL DE FORMACIÓN PROFESIONAL, Manual para el participante, calculo y diseño de cuartos fríos – Departamento de Curriculum., Instituto Nacional Tecnológico, Refrigeración y Aire Acondicionado, 2010.

temperaturas superiores a 0 °C.¹¹⁰ La tasa de calor se determina a través de la ecuación 7.

Ecuación 7. Tasa de calor

$$Q = K * A * \Delta T$$

Donde:

Q: Tasa de Calor (W)

K: Coeficiente global de transferencia de calor (W/m²*C)

A: Superficie (m²)

ΔT: Diferencia térmica en el cuarto (°C)

Tabla 22. Valores de transferencia a través de las paredes

Variabes	K (W/m²*C)	A (m²)	ΔT (°C)	Q (W)
Pared Lateral I	0.13	15	9.8	19.11
Pared Lateral II	0.13	15	3.4	6.63
Pared Posterior	0.13	12	8.2	12.792
Pared Principal	0.13	12	3.4	5.304

Fuente: elaboración propia

La temperatura exterior se define en 16°C y la interior en 3°C, además de diferentes correlaciones que se dan según la orientación del cuarto, considerando valores para el hemisferio sur, se genera un resultado de 43.836 W. Los fabricantes de paneles aislantes recomiendan un espesor cercano a los 150 mm.¹¹¹ El aislante escogido se constituye de dos láminas de acero, con núcleo aislante de poliuretano de alta densidad, lo que confiere alta resistencia mecánica en el cuarto de intervención con aislación térmica controlada de bajo peso y para el refrigerante se considera usar el R-717, primordial en la industria.

¹¹⁰ VÁSQUEZ BENAVIDES, José Leonardo, JARA POLANCO, Juan Nicolás – Cálculo de una cámara de frío para conservación de hielo, hortalizas y frutas congeladas, Universidad del Bio-Bio, 2013.

¹¹¹ ISOPUR, ICAM – Especialistas en montajes Industriales, 1992.

8. COSTOS ASOCIADOS AL MÉTODO SELECCIONADO

Para los costos asociados al método se tendrán en cuenta los costos de materia prima, mano de obra y servicios auxiliares que se necesitan para producir 1 m³ de coagulante a partir de la semilla de moringa y con base en esta información se determinará el precio de venta del producto.

8.1 COSTOS DE OPERACIÓN

8.1.1 Costos de materia prima. Los insumos representan una fracción importante para la elaboración del coagulante. El costo total de la materia prima se obtiene a través la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Costo total materia prima

$$\text{Costo total} = \text{Valor comercial} * \text{Cantidad}$$

En la tabla 23, se puede observar el costo total según la cantidad y el valor comercial que se necesita de cada uno de los insumos.

Tabla 23. Costo de materia prima

Insumo	Valor comercial (COP)	Cantidad		Costo total (COP/día)	Costo anual (COP)
M. Oleífera	\$ 30.000 COP/kg	76.67	Kg/día	\$ 2.300.000	\$ 805.000.000
Agua potable	\$ 3.902 COP/m ³	2.01	m ³ /día	\$ 7.843	\$ 2.745.057
NaCl	\$ 1.490 COP/kg	117.50	Kg/día	\$ 175.075	\$ 61.276.250
Total	\$ 35.392	196		\$ 2.482.918	\$ 869.021.307

Fuente: elaboración propia

El costo de la M. Oleífera se establece de acuerdo con el precio de venta de \$ 30.000 COP/kg obtenido de un proveedor a través de mercadolibre.com, el cual extrae las semillas de un cultivo propio en Santander y asegura que dependiendo del tamaño de la semilla, un kg puede contener en promedio de 3 a 5 mil unidades¹¹². En cuanto al precio del cloruro de sodio, también se tomó como

¹¹² MERCADOLIBRE. Artículo.mercadolibre.com.co. (2020). Vendo Semillas De Moringa - \$30.000 Kilo. - \$ 30.000. [online] Available at: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-526061586-vendo-semillas-de-moringa-30000-kilo-JM?quantity=1#position=7&type=item&tracking_id=4160ba40-e90e-459d-bc71-e4a648e84c66 [Accessed 7 Feb. 2020].

referencia la misma empresa y el costo del agua potable se adquirió de las tarifas de acueducto y alcantarillado para Bogotá año 2019¹¹³.

8.1.2 Costos de mano de obra. Se determina el número de operarios necesarios, considerando cuatro (4) operarios teniendo en cuenta equipos que tengan la necesidad de un proceso arduo manual, como lo es la parte de adecuación y carga, que conlleva un contenido meticuloso de la materia prima, la selección de la misma debe ser manual ya que el dejar pasar semillas con reblandecimiento o desecación extrema, ya que solo generarían pérdidas en el proceso, pues no poseen un efecto coagulante óptimo.

El proceso de filtrado, en el cual se necesita operación manual para la extracción de torta residual, que se genera cada cierto tiempo, teniendo en cuenta que si no se retira, no funciona de manera adecuada y el líquido resultante, tendría una cantidad de residuos muy elevada, además el proceso de agitación y almacenamiento requiere de un control constante, siendo las unidades operacionales más importantes de todo el proceso.

Adicionalmente, para determinar los costos de mano de obra, se tendrá en cuenta un Ingeniero Químico para el cargo de supervisor de la planta y un gerente administrativo, como se muestra a continuación:

Tabla 24. Costo total mano de obra

Cargo	Empleados	Sueldo neto	Prestación de servicios	Total al mes (COP)	Total al año (COP)
Operario	4	\$ 828.116	\$ 469.100	\$ 5.188.864	\$ 62.266.368
Ingeniero Químico	1	\$ 1.883.226	\$ 807.058	\$ 2.690.284	\$ 32.283.408
Gerente administrativo	1	\$ 2.000.000	\$ 857.107	\$ 2.857.107	\$ 34.285.284
Total	6	\$ 4.711.342	\$ 2.133.265	\$ 10.736.255	\$ 128.835.060

Fuente: elaboración propia

¹¹³ EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, Acueducto.com.co. (2020).

8.1.3 Costo servicios auxiliares. La energía eléctrica es el servicio de mayor importancia para el funcionamiento total de la planta. A través de la ecuación 9 se establecen los costos energéticos para cada uno de los equipos involucrados, considerando el valor de la electricidad 287.11 COP/kWh.¹¹⁴ El valor se determina teniendo en cuenta la bolsa de energía, el cual es un sistema de negociación que existe en el mercado de energía eléctrica donde los generadores hacen sus ofertas de precio y cantidad de energía y se cruza con la demanda que posee el comerciante.¹¹⁵

Ecuación 9. Costos energéticos

$$\text{Costo energético} = \text{Potencia (Kwh)} * 287.11 \frac{\text{COP}}{\text{kWh}}$$

La tabla 25 representa el costo total del servicio energético según la potencia y el consumo de cada equipo durante el periodo de tiempo requerido.

Tabla 25. Costo total servicio energético

Equipo	Potencia (kWh)	Consumo (kWh/año)	Costo al mes (COP)	Costo anual (COP)
Tanque agitación	16.0743	33756,03	\$ 138.400	\$ 9.687.981
Molino triturador	1.4914	3131,94	\$ 12.841	\$ 898.867
Horno industrial	1.6	3360	\$ 13.776	\$ 964.320
Descascarador	1.22	2562	\$ 10.504	\$ 735.294
Banda transportadora	0.6	1260	\$ 5.166	\$ 361.620
Cuarto frío	0.043836	184,111	\$ 377	\$ 52.840
Lavadora	1.5	3150	\$ 12.915	\$ 904.050
Total	22.53	47404	\$ 193.979	\$ 13.578.551

Fuente: elaboración propia

El precio de energía se base en el mercado eléctrico nacional mediante un esquema libre de oferta y demanda, traducido a una mayor economía en los costos de operación dl sistema interconectado nacional (SIN) para beneficios de usuarios industriales en este caso. La bolsa de energía genera un despacho económico de los recursos térmicos e hidráulicos mediante una oferta de precios con cantidad de

¹¹⁴ DINERO. (2019, Febrero). PRECIOS EN LA BOLSA DE ENERGÍA DE 2019. Recuperado <https://www.dinero.com/pais/articulo/aumento-en-los-precios-de-la-energia-en-bolsa-2019/267100>

¹¹⁵ PORTAFOLIO, ¿Cómo funciona la venta de energía de Colombia?, Noviembre 2008, Recuperado de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/funciona-venta-energia-colombia-459928>

energía requerida, logrando hacer contratos a largo plazo con generadores de energía a precios libres.¹¹⁶

8.1.4 Costo producto final. Para determinar el costo total del producto final se tiene en cuenta la producción mensual de coagulante y con base en la ecuación 10, se establecen los costos de producción.

Ecuación 10. Costos de producción

$$\text{Costo de producción} = \frac{\text{Costos operacionales}}{\text{Producción de coagulante}}$$

A continuación, se observan los resultados obtenidos para producir 1 m³ de coagulante a partir de la semilla de moringa:

Tabla 26. Costo total de producción

COSTOS OPERACIONALES			
Mano de obra	\$	178.047	COP/m ³
Materia prima	\$	1.235.283	COP/m ³
Servicios auxiliares	\$	3.217	COP/m ³
Total	\$	1.416.547	COP/m³

Fuente: elaboración propia

De esta manera, el costo total de producción es de \$ 1.416.547 COP. El precio de venta se obtiene de la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Precio de venta

$$P = C * \left(\frac{100}{100 - R} \right)$$

Donde:

P: Precio de venta

C: Costo total de producción

R: Margen de ganancia

¹¹⁶ SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS, Súper servicios, Mercado de Energía Mayorista, 2016.

De modo que, el precio de venta del coagulante de moringa será:

$$P = 1.416.547 * \left(\frac{100}{100 - 50} \right)$$

$$P = 2.833.094 \frac{COP}{m^3}$$

El precio de venta se relaciona directamente con la rentabilidad o margen de ganancia establecido por la empresa, para este caso se trabajará con una rentabilidad del 50% considerando que es un producto novedoso y amigable con el medio ambiente. Por lo tanto, el precio de venta para el coagulante será de \$ 2.833.094 COP por metro cúbico.

8.2 INVERSIÓN TOTAL

8.2.1 Costo equipos. Al igual que para los costos del producto, la inversión total contempla la adquisición de los bienes de acuerdo con su capacidad para la producción de 60.3 m³ al mes. Los costos de equipos mostrados en la tabla 27, se cotizaron directamente con proveedores para reducir la incertidumbre de estimación.

Tabla 27. Costo equipos

EQUIPOS/MAQUINARIA	Precio (COP)
Lavadora general	\$ 32.585.000
Molino triturador	\$ 5.165.613
Horno	\$ 9.047.000
Tanque agitación	\$ 25.726.200
Descascarador	\$ 15.000.000
Banda transportadora	\$ 8.232.384
Tanque de almacenamiento	\$ 8.541.098
Filtro	\$ 37.388.744
TOTAL	\$ 141.686.039

Fuente: elaboración propia

Los proveedores que proporcionaron los diferentes costos de la maquinaria fueron Alibaba.com, Mercado libre Colombia y Lab Brands.

Una vez se establecieron los costos para la inversión total, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 28. Costo total inversión

COSTOS INVERSIÓN TOTAL		
Equipos	\$	141.686.039
Mano de obra	\$	128.835.060
Servicios auxiliares	\$	19.604.735
Materia prima	\$	869.021.307
Total	\$	1.159.147.141

Fuente: elaboración propia

Así pues, para determinar la inversión inicial se tuvo en cuenta el costo de los equipos, mano de obra, servicios auxiliares y materia prima, dando como resultado un total de \$ 1.159.147.141 COP.

9. CONCLUSIONES

- Al comparar los dos métodos de obtención de coagulante con y sin la extracción del aceite de *Moringa Oleifera*, se determinó que aunque se puede obtener un valor mayor de rendimiento del coagulante sin aceite, la diferencia entre los dos procesos solo es del 0,21%, por lo que su contraste no es significativo, razón por la cual, se considera que el coagulante sin extracción de aceite resulta ser una opción adecuada para evitar incurrir en gastos adicionales, mayor tiempo de obtención y uso de agentes químicos.
- Dado el proceso de desarrollo experimental se concluye que la solución de semilla de moringa con NaCl no logra una sustitución completa de los coagulantes convencionales en la industria de tratamiento de aguas, pero puede ser evaluado como complemento para la reducción de diversos parámetros.
- A través del diseño experimental, se comprueba que la dosis de coagulante y el pH son factores que influyen directamente sobre la turbidez final de la muestra. El coagulante a partir de *Moringa Oleifera* demostró un mejor rendimiento a pH neutro y a una dosis de 2 mL/L. Teniendo en cuenta que el factor más relevante en el proceso se genera en el factor B; Dosis de coagulante.
- Una vez se realizaron las pruebas de laboratorio, se pudo observar que la moringa presentaba una baja influencia sobre el pH final de la muestra, ya que presentaban valores muy equivalentes con diferencias de solo el 0.07, lo cual resulta ser un punto a favor a nivel industrial, ya que, no es necesario tener que hacer un ajuste posterior del pH para cumplir con el rango establecido.
- La comparación entre la semilla de moringa y el sulfato de aluminio en aguas residuales determina que para el agua tipo textil, el sulfato tiene un rendimiento aproximadamente 10% mayor y para el agua residual doméstica 8%.
- El diseño conceptual demostró que para la proyección del uso del coagulante desarrollado para el tratamiento de aguas residuales, conlleva una viabilidad técnica en cuanto a adecuación de materia prima, selección de procesos fijos y equipos, teniendo en cuenta equivalencias de su capacidad con la potencia requerida en cada una de las unidades operacionales.
- Basado en la resolución de los costos, el proyecto es viable económicamente ya que genera los ingresos suficientes para cumplir con el mantenimiento general de la planta y el pago de la inversión inicial. Adicionalmente, el precio de venta de 2.833.094 COP por metro cúbico puede llegar a ser muy comparable con el que se encuentra actualmente para los coagulantes convencionales.

- A pesar de los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos ejecutados, se debe emprender este tipo de alternativas en el tratamiento de aguas para que las investigaciones futuras logren un producto que pueda entrar a competir con los coagulantes tradicionales, evitando impactos en la salud humana y el ecosistema.

10. RECOMENDACIONES

- El proceso de descascarado genera una gran cantidad de residuos que pueden ser evaluados para la generación de combustibles.
- Las semillas no deben presentar una coloración verdosa, ya que al no estar maduras no se va a obtener el rendimiento esperado con el coagulante.
- Para prologar la vida útil del coagulante se recomienda almacenar la muestra en un frasco tipo ámbar para evitar su descomposición por efecto de la luz y mantenerlo bajo refrigeración antes de ser utilizado.
- En cuanto al proceso de extracción del componente activo, sería de gran utilidad el evaluar los componentes en diferentes disposiciones de sales o agua, para poder determinar su capacidad de remoción.
- Se recomienda realizar una indagación más profunda del proceso de extracción de la proteína que logra el proceso de coagulación, para así determinar la concentración del componente activo que contiene la semilla.
- Es muy importante continuar con el desarrollo de investigaciones enfocadas en el rendimiento de la semilla de moringa oleífera, en el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales, buscando estrategias más limpias.
- Durante la preparación del coagulante, se recomienda tener en cuenta otros métodos como la liofilización para determinar si se puede obtener un mejor rendimiento.
- Al tratarse de un agente natural, se debe evaluar el tiempo de conservación para evitar la degradación de la materia orgánica.
- Evaluar la relación de concentración de coagulante 1:1 para obtener una mejor comparación entre el sulfato de aluminio y la semilla de moringa.

BIBLIOGRAFÍA

- 20 MINUTOS EDITORA, S.L., (en lo sucesivo “20minutos”). 20minutos está inscrita en el Registro Mercantil de Zaragoza, tomo 3306, folio 1, hoja Z-39726, inscripción 1º, provista de CIF nº B-99083966.
- ARBOLEDA J. (2000), Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, McGraw Hill, Colombia
- ARCILA, H. R., & PERALTA, J. J. (21 de junio de 2015). AGENTS AS NATURAL ALTERNATIVE FOR WATER TREATMENT. Bogotá, Colombia.
- AVILA, A. P. (2012). OPTIMIZACIÓN, ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE UNA PLANTA. Cuenca: Universidad de cuenca.
- BARTH, H., 1982. Trinkwasseraufbereitung mit samen von Moringa oleifera lam, Chemiker-Zeitung, p. 106
- BHATIA, S., OTHMAN, Z., & AHMAD, A. L. (2007). Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using Moringa oleifera seeds as natural coagulant. Journal of Hazardous Materials, 145(1-2), 120–126.
- BIOCOMERCIO SOSTENIBLE. 2003 ESTUDIO DEL MERCADO NACIONAL DE ACEITES ESENCIALES. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT, BOGOTÁ, COLOMBIA. 109 PP
- BOHULAV, D. (2005). Coagulation and Flocculation. Boca Raton: Taylor & Francis.
- BRATBY, John. (2006). Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment (2nd Edition). IWA Publishing. Obtenido de
- BRAVO GALLARDO, M. A. (2017). Coagulantes y Floculantes Naturales Usados en la Reducción de Turbidez, Sólidos Suspendidos, Colorantes y Metales Pesados en Aguas Residuales.
- CÁRDENAS, I. Y. (abril de 2000). TRATAMIENTO DE AGUA. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Lima.
- CASTELLANOS LOPEZ, D. J., & JIMENEZ BARRERA, O. A. (2015). Análisis de viabilidad técnico financiera para el cultivo de la planta de Moringa Oleífera en el municipio de Cumaral- Meta. Villavicencio.
- CHÁVEZ M, Fernández A, HERRERA F, Mas YR, MEJÍAS D y DÍAZ A (2008) Evaluación del exudado gomoso de Acacia siamea como coagulante en la clarificación de las aguas para consumo humano. Revista técnica de la facultad de ingeniería Universidad de Zulia 31:32-40.
- COLOMBIA, IDEAM y MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Protocolo titulado: “Toma de muestras de aguas superficiales para la red de calidad del IDEAM”, Código TI0207, 6 De abril del 2010, 6p
- CORTÁZAR MARTÍNEZ, A., CORONEL OLIVARES, C., ESCALANTE LOZADA, A., & GONZÁLEZ RAMÍREZ, C. (s.f.). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado 6 octubre, 2019, de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>

DE VARGAS, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

DÍAZ-CUENCA, Elizabeth., ALVARADO-GRANADOS, Alejandro Rafael., CAMACHO-CALZADA, Karina Elizabeth., El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales. 2012, 14(1), 78 -97.

ENGINEERING, K. (s.f.). Extracción con solventes. Obtenido de <http://www.plantasaceiteras.com/procesos-de-extracci-n-por-solventes.html>

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES. (s.f.). Práctica 4. Propiedades ácido-base de las sales: Hidrólisis. Recuperado 8 octubre, 2019, de https://www.eii.uva.es/~organica/practicass_17-18/P4_Hidrolisis.pdf

FINKEROS. (29 de junio de 2015). *ABC del finkero*. Obtenido de <http://abc.finkeros.com/moringa-cultivo-y-aprovechamiento/>

GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando., HERNÁNDEZ ÁNGEL, Marta Lucía., PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio., RODRÍGUEZ RESTREPO, Alejandra., SALAZAR PALACIO, Julián Andrés., Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocátalisis. Revista Lasallista de Investigación [en línea]. 2005, 2(1), 15-18

GASSENSCHMIDT, K.D. JANY, B. TAUSCHER, H. NIEBERGALL, J.P Isolation and characterization of a flocculating protein from Moringa oleifera Lam, Biochem. Biophys. Acta 1243 (1995) 477–481.

GRANADOS, C., YÁÑEZ, X. & ACEVEDO, D. (2013). Evaluación de la Actividad Antioxidante del Aceite Esencial Foliar de *Myrcianthes leucoxylla* de Norte de Santander (Colombia). *La Serena* 25(3). ISSN 0718-0764. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642014000300003&script=sci_arttext

GRAU CAIRO, L. (1982). Organización Dirección y Operaciones Fundamentales en el Laboratorio de Química. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba. P 619.

HENDRAWATI ET al 2016 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 31 012033

HILDEBRANDO RAMÍREZ ARCILA, J. J. (21 de Julio de 2015). AGENTES NATURALES COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA. *Facultad de ciencias básicas*, 136-156.

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

KATAYON, S.; MEGAT MOHD NOOR, M. J.; ASMA, M.; ABDUL GHANI, L. A.; THAMER, A. M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B. C. & SULEYMEN, A. M. (2006). Effects of storage conditions of Moringa oleifera seeds on its performance in coagulation. *Bioresource Technology*, 97, 1455-1460.

LÉDO, Patricia G.S, LIMA, Raquel F.S, PAULO, João B.A, & DUARTE, Marco A.C. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillas de Moringa oleifera para la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad. *Information technological*, 20(5), 3-12.

LOPERA GOMEZ, MARIA JULIANA, S. M. (2012). *Ais uniwater*. Obtenido de http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/127/COLOMBIA.pdf

LTDA, D. (03 de mayo de 2019). *Dacetex*. Obtenido de <http://www.dacetex.com/nosotros/nosotros.html>

MESA, Susana Arango, ORTEGA GONZÁLEZ Wendy Paola, ÁLVAREZ VANEGAS Alejandro, MEDINA ARROYAVE, José David - Evaluación del extracto de semillas de Moringa oleífera como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

M. PRITCHARD, T. C. (23 July 2010). A comparison between Moringa oleífera and chemical coagulants in the purification of drinking water- An alternative sustainable solution for developing countries. United Kingdom.

MILLER, S., FUGATE, E., CRAVER, V., SMITH, J. A., & ZIMMERMAN, J. B. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4274-4279. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18605544>

MINITAB, LLC (2019) "Chapter 2", Getting Started with Minitab 19, p. 16-20 – www.minitab.com

MOJICA, D. C., & MARTÍNEZ, M. A. (2018). *EVALUACIÓN DE LOS POLIFENOLES EXTRAÍDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE Coffea arabica, PARA LA PRODUCCIÓN DE UN COAGULANTE NATURAL*.

MUYIBI, S. y EIVISON, I. (1995). Floc settling characteristic of turbid water coagulated with Moringa oleífera seeds. *Intern. Journal Environ. Studies*, (56), 483–495.

NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, K. S., & TALBOT, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleífera. *Water Research*, 29(2), 703–710.

NDABIGENGESERE, A., & SUBBA NARASIAH, K. (1998). Quality of water treated by coagulation using Moringa oleífera seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791.

NIETO C, y ORELLANA V. 2011. Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante. (Trabajo de grado), Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales: Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. 1-132.

NÚÑEZ, C. E. (2008). Extracciones con Soxhlet, Buenos Aires, Argentina.

OSEIDA, M. Z. (octubre de 2018). MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE LA SEMILLA DE MORINGA (Moringa Oleífera). Universidad Rafael Landívar.

PINOTTI, A., & ZARITZKY, N. (2001). Effect of aluminum sulfate and cationic polyelectrolytes on the destabilization of emulsified wastes. *Waste Management*, 21(6), 535–542.

QUIJANDRÍA CASANOVA, Silvana. Q. (2012). La Prueba de Jarras en una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Recuperado 29 agosto, 2019, de <http://www.r-chemical.com/la-prueba-de-jarras-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua-potable/>

RODRÍGUEZ, M., ALCARAZ, L., & REAL, S. (2012). Procedimiento para la extracción de aceites esenciales en plantas aromáticas. Pág. 17.

ROMERO, J., A. (2005). Calidad del agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia

SANCHA, A.M. SCHIFINI, J.P, CAUSA, E, PINTO, C. “EXPERIENCIAS DE COAGULACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS”

SCIBAN M, KLASNJA M, ANTOV M, y SKRBIC B. 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn, Bioresource Technology, 100: 6639 – 6643.

SENA. (2018). INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA DE LOS ACEITES ESENCIALES DE PLANTAS MEDICINALES Y AROMÁTICAS. Obtenido de https://repositorio.sena.edu.co/sitios/introduccion_industria_aceites_esenciales_plantas

SOLÍS REYNA Norma Irene. (2008, Marzo 19). Diseño de experimentos en la estadística aplicada. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/disenio-de-experimentos-en-la-estadistica-aplicada/>

TETSUJI OKUDA*, A. U. (21 de mayo de 2000). ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF COAGULANT EXTRACTED FROM MORINGA OLEIFERA SEED BY SALT. Hiroshima, Japón.

TORAL, O., REINO, J., SANTANA, H., & CERESO, Y. (2013). Caracterización morfológica de ocho procedencias de Moringa oleífera (Lam.) en condiciones de vivero. Pastos y Forrajes, 36(4), 409-416.

WELCH. T. E, Moving Beyond Environmental Compliance, New York: Lewis Publishers, 1998

ANEXOS

ANEXO A

CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Figura 30. Turbidímetro Lovibond TB 300 IR



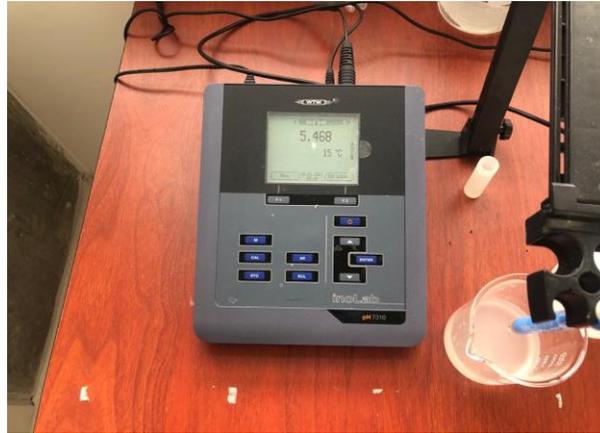
Fuente: Elaboración propia

La calibración es realizada por el usuario¹¹⁷;

1. Presionar la tecla Cal.
2. Colocar y posicionar el estándar <0.1 NTU en el compartimiento de medición y cerrar con este su tapa.
Presionar la tecla Read/Avg
La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
3. Colocar y posicionar el estándar 20 NTU en el compartimiento de medición y cerrar con este su tapa.
Presionar la tecla Read/Avg
La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
4. Colocar y posicionar el estándar 200 NTU en el compartimiento de medición y cerrar con este su tapa.
Presionar la tecla Read/Avg
La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
5. Colocar y posicionar el estándar 800 NTU en el compartimiento de medición y cerrar con este su tapa.
Presionar la tecla Read/Avg
La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
6. Para memorizar presionar la tecla \leftarrow para cancelar la calibración presionar la tecla Esc.

¹¹⁷ LOVIBOND, Manual de instrucciones Turbidímetro Lovibond TB 300 IR, 2019.

Figura 31. pH metro digital inoLab 7310



Fuente: Elaboración propia

La calibración es realizada por el usuario y de forma automática con el equipo¹¹⁸:

1. Conectar la sonda de medición del pH al instrumento.
2. Tener a disposición las soluciones tamponadas preparadas.
Al medir sin sensor térmico:
Temperar las soluciones tamponadas o bien, medir la temperatura.
3. Con <M> seleccionar en la indicación del valor medido un parámetro, pH o bien mV.
4. Con <CAL> iniciar la calibración.
Aparece el display de calibración para la primera solución amortiguadora (indicación de la tensión).
5. Enjuagar escrupulosamente la sonda de medición con agua desionizada.
6. Sumergir la sonda de medición en la solución tamponada 1.
7. Al medir sin sensor térmico:
Ingresar la temperatura de la solución amortiguadora mediante <▲><▼>.
8. Iniciar la medición con <ENTER>.
Se verifica la estabilidad del valor medido (control de estabilidad). Aparece la indicación del estado actual [AR]. Aparece una barra indicadora del progreso y la indicación del parámetro parpadea.
9. Esperar que la medición con control de estabilidad haya terminado, o bien, con <ENTER> aceptar el valor de la calibración.

¹¹⁸ WTW, Instrucciones de operación pH 7310 / pH 7310P, Weilheim 2011, WTW GmbH - Octubre, 2010.

Aparece el display de calibración para la siguiente solución amortiguadora (indicación de la tensión).

10. En caso dado, finalizar la calibración como calibración de un punto con <M>. El registro de calibración es presentado.