

COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

Opuntia Ficus y *Moringa oleifera* y sus efectos como clarificantes en aguas turbias

RAFAEL ENRIQUE OLIVERO VERBEL
LUIS MIGUEL VEGA FELIZZOLA
GLENDA PAOLA VILLEGAS DE AGUA



COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

Opuntia Ficus y Moringa oleifera, y sus efectos como clarificantes en aguas turbias

RAFAEL ENRIQUE OLIVERO VERBEL

LUIS MIGUEL VEGA FELIZZOLA

GLENDIA PAOLA VILLEGAS DE AGUA



Sello Editorial

**UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO**

Olivero Verbel, Rafael Enrique -- Vega Felizzola, Luis Miguel -- Villegas de Agua, Glenda Paola
Opuntia Ficus y Moringa Oleifera y sus efectos como clarificantes en aguas turbias / Rafael
Enrique Olivero Verbel, Luis Miguel Vega Felizzola, Glenda Paola Villegas de Agua. – 1 edición.
– Puerto Colombia, Colombia: Sello Editorial Universidad del Atlántico, 2020.

Colección Investigación y desarrollo para todos

85 páginas. 17x24 centímetros. Ilustraciones.

Incluye bibliografía

ISBN: 978-958-5131-97-2 (Tapa blanda)

1. Purificación del agua – investigaciones. 2. Moringa – investigaciones 3. Opuntia Ficus--
investigaciones. I. Autor. II. Título.

CDD: 660 O48



Sello Editorial
**UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO**

www.unitlantico.edu.co
Kilómetro 7, Antigua Vía a Puerto Colombia.
Barranquilla, Colombia.

© 2020, Sello Editorial Universidad del Atlántico.
ISBN 978-958-5131-99-6

Coordinación editorial
Sonia Ethel Durán.

Asistencia editorial
Estefanía Calderón Potes.

Diseño y diagramación
Luz Miriam Giraldo Mejía.

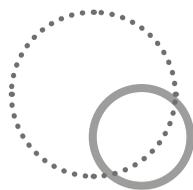
Revisión y corrección
Luis Ramos Palacín.

Impreso y hecho en Barranquilla, Colombia.
Ditar S.A. www.ditar.co
Kilómetro 7, Vía a Juan Mina.
Parque Industrial Clavería.

Printed and made in Barranquilla, Colombia.



Esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Esta licencia permite la distribución, copia y exhibición por terceros de esta obra siempre que se mencione la autoría y procedencia, se realice con fines no comerciales y se mantenga esta nota. Se autoriza también la creación de obras derivadas siempre que mantengan la misma licencia al ser divulgadas.



La presente colección es posible gracias a las siguientes autoridades académicas de la Universidad del Atlántico:

José Rodolfo Henao Gil

Rector

Leonardo Niebles Núñez

Vicerrector de Investigaciones, Extensión y Proyección Social

Danilo Hernández Rodríguez

Vicerrector de Docencia

Mariluz Stevenson

Vicerrectora Financiera

Josefa Cassiani Pérez

Secretaria General

Miguel Caro Candezano

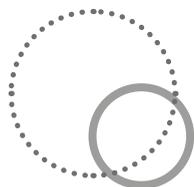
Jefe del Departamento de Investigaciones

Agradecimientos especiales

Facultad de Ingeniería

Decana Yussy Arteta Peña

2020



La colección ***Investigación y desarrollo para todos*** es una iniciativa liderada por la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico, pensada como herramienta para la divulgación de la investigación y el conocimiento que se genera en el Caribe colombiano.

Contenido

Introducción	1
1. Estado del arte	5
2. Proceso de coagulación	9
2.1. Tipos de coagulantes	11
2.1.1. <i>Coagulantes metálicos</i>	11
2.1.2. <i>Coagulantes naturales</i>	12
2.2. Prueba de jarras.....	13
2.3. Marco legal.....	14
2.4. Estudios sobre clarificantes naturales	15
2.4.1. <i>Opuntia ficus</i>	18
2.4.2. <i>Moringa oleifera</i>	20
3. Metodología.....	22
3.1. Tipo de investigación	22
3.2. Muestra.....	22
3.3. Variables del diseño experimental	24
4. Análisis de resultados	34
4.1. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio.....	34
4.1.1. <i>Eficiencia de turbidez</i>	35

4.2. Resultados de la absorbancia para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio	36
4.2.1. Eficiencia de absorbancia.	37
4.3. Resultados de turbidez para mezcla entre los coagulantes naturales y sulfato de aluminio con agua.....	39
4.3.1. Eficiencia de turbidez.....	40
4.4. Resultados de la absorbancia para mezcla entre coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio)	43
5. Conclusiones	45
6. Recomendaciones	47
7. Referencias.....	48
8. Anexos	57
Anexo A. Procesamiento de la <i>Opuntia ficus</i>	57
Anexo B. Proceso de adecuación de la <i>Moringa oleifera</i>	58
Anexo C. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> y alumbre.	58
Anexo D. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes <i>Moringa oleifera</i> y alumbre.....	60
Anexo E. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> y <i>Moringa oleifera</i>	61
Anexo F. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> y sulfato de aluminio.	62
Anexo G. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes <i>Moringa oleifera</i> y sulfato de aluminio.	63
Anexo H. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes <i>Moringa oleifera</i> y <i>Opuntia ficus</i>	64
Anexo I. Análisis de varianza para la turbidez en la mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> y sulfato de aluminio.	65
Anexo J. Análisis de varianza para el factor pH.	66

Anexo K. Análisis de varianza para la turbidez en la mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> y sulfato de aluminio con agua.	67
Anexo L. Análisis de varianza para la absorbancia en la mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> y sulfato de aluminio.	68
Anexo M. Análisis de varianza para la absorbancia en la mezcla de coagulantes <i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> y sulfato de aluminio.	69
Los autores	71

Listado de gráficos

Gráfica 1. Análisis de turbidez para mezcla de coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio).	36
Gráfica 2. Análisis de absorbancia para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio.	38
Gráfica 3. Análisis de turbidez para mezcla de coagulantes (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> , sulfato de aluminio) y agua.....	42
Gráfica 4. Análisis de absorbancia para mezcla de coagulantes (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i> , sulfato de aluminio) y agua.....	44

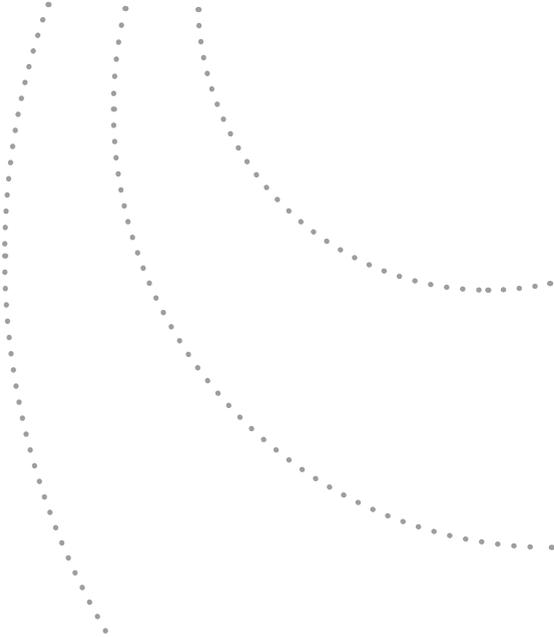
Listado de imágenes

Imagen 1. Proceso de coagulación-floculación.	11
Imagen 2. Esquema de purificación del agua.	13
Imagen 3. Fuente de recolección del agua.	23
Imagen 4. Procesamiento de la <i>Opuntia ficus</i>	26
Imagen 5. Proceso de adecuación de la <i>Moringa oleifera</i>	27

Imagen 6. Test de jarras, marca PHIPPS & BIRD, serie No. 211050307G.	30
Imagen 7. Degradación del color según la cantidad de clarificante. .	31
Imagen 8. Representación gráfica de sedimentación con coagulantes naturales <i>Opuntia ficus</i> y <i>Moringa oleifera</i>	31
Imagen 9. Uso del turbidímetro, marca PHIPPS & BIRD.....	32
Imagen 10. Uso del espectrofotómetro, marca EVOLUTION 60S.	33

Listado de tablas

Tabla 1. Colores y asignación de clases de calidad del agua.	6
Tabla 2. Características fisicoquímicas de la <i>Opuntia ficus</i>	19
Tabla 3. Características iniciales del agua del río Magdalena.	23
Tabla 4. Variables a tener en cuenta en el experimento.....	24
Tabla 5. Tratamiento de las mezclas de los coagulantes.....	28
Tabla 6. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio).....	34
Tabla 7. Eficiencia de los tratamientos 3, 10 y 12.	35
Tabla 8. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio).....	37
Tabla 9. Eficiencia de la absorbancia.	38
Tabla 10. Resultados de turbidez para mezcla entre coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio).....	39
Tabla 11. Eficiencia de los tratamientos 1, 2, 4 y 6.	41
Tabla 12. Eficiencia de los coagulantes naturales.	42
Tabla 13. Resultados de absorbancia para coagulantes naturales (<i>Opuntia ficus</i> , <i>Moringa oleifera</i>) y artificiales (sulfato de aluminio).....	43



Prólogo

En este trabajo de investigación sobre clarificantes usted podrá encontrar información actualizada sobre la innovación en procesos de clarificación de aguas; dicha innovación busca que estos sean más económicos, eficientes y amigables con el medioambiente. La clarificación es una de las etapas más importantes, ya que permite la remoción de materiales en suspensión tales como la arcilla, el limo y los lodos. Según la OMS (2016), hay un crecimiento acelerado de la población y de la actividad industrial y agrícola; esto, junto con el inminente cambio climático, convierten al agua en un recurso vulnerable. La importancia de este trabajo radica en la posibilidad de que estos tratamientos lleguen a las regiones donde las aguas superficiales son muy turbias, pues contienen muchos sedimentos y alta carga microbiana, la cual puede ser sensiblemente disminuida con el uso de clarificantes alternativos como *Opuntia ficus* en combinación con la *Moringa oleifera*.

Introducción

En Colombia existen muchas comunidades que no tienen servicio de agua potable; se trata de lugares donde las fuentes más cercanas de este preciado líquido, debido a su contaminación, no son aptas para el consumo humano. Para tratar este tipo de aguas se encuentra el uso de coagulantes naturales; estos podrían mejorar la calidad del líquido y, en un nivel industrial, podrían reducir el uso de productos sintéticos, que surten efectos adversos en la salud y contaminan el ambiente (Bravo, 2017). Recientemente, se muestra un gran interés por coagulantes naturales alternativos como el que se puede extraer de las semillas de *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus*, ya que estos productos, aparte de ser inocuos y de muy bajo costo, pueden reducir el impacto ambiental negativo dejado por compuestos como el alumbre o sulfato de aluminio (Echeverría, 2017). Su aplicación incluye la remoción de especies en suspensión mediante la adición de coagulantes químicos cuyo uso trae desventajas asociadas a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y alteración del pH del agua tratada.

Por lo expuesto anteriormente, se hace necesario la búsqueda de alternativas que incluyan la utilización de coagulantes de origen vegetal, entre otras. Este trabajo tuvo como propósito realizar una revisión bibliográfica acerca del uso de los coagulantes naturales de origen vegetal utilizados en la remoción de turbidez en procesos de tratamiento de aguas y dar a conocer otros aspectos importantes como lo son su clasificación, su eficiencia y los mecanismos de coagulación empleados por cada uno de los materiales naturales estudiados. Como resultado, se encontró que todos los extractos de origen vegetal reportados son eficientes en la remoción de la turbidez del agua, producen menor

cantidad de lodos y su principal mecanismo de coagulación utilizado es la adsorción y la neutralización de cargas. La coagulación es un proceso importante en el tratamiento convencional del agua. Los coagulantes y floculantes sintéticos, que hoy en día se usan en la potabilización del agua, presentan algunos inconvenientes puesto que son muy costosos y, según se sabe, tienen efectos adversos en la salud. Su aplicación incluye la remoción de especies en suspensión mediante la adición de coagulantes químicos cuyo uso acarrea inconvenientes asociados a altos costos de adquisición y producción y afección del pH del agua tratada (Guzmán, Villabona, Tejada y García, 2013).

Varias investigaciones están encaminadas a la utilización de coagulantes naturales de origen vegetal para el proceso de clarificación; estos tienen grandes ventajas, ya que son amigables con el ambiente y prácticamente inofensivos para la salud humana (Diestra y Esquerre, 2019). El mucílago de penca de tuna o nopal ha sido ampliamente empleado para diversas aplicaciones: salud, belleza y otras muy particulares de las regiones en las cuales abunda y donde las condiciones ambientales son favorables para su crecimiento (Almazán, Domínguez, Gutiérrez, Romero y Rajal, 2018).

Las investigaciones sobre el uso de coagulantes naturales son de gran importancia, pues ayudan a mitigar los efectos contaminantes de aguas superficiales que tienen, normalmente, una alta carga microbiana y de sólidos suspendidos. En Colombia, un país en desarrollo, es necesario tener alternativas en el uso de los clarificantes que, de forma regular, se emplean en la potabilización del agua; alternativas que mejoren la calidad del agua para el consumo humano. El uso de materias primas alternativas para coagular aguas turbias disminuye el uso de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio y el sulfato férrico, que pueden ser nocivos para la salud (Ramírez y Jaramillo, 2014).

La OMS (2016) señaló que 663 millones de personas utilizan agua de fuentes no mejoradas, es decir, agua de superficie, de pozos excavados y de manantiales no protegidos. En Colombia se estima que solo el 5% de las aguas reciben tratamiento, lo cual se evidencia en los diversos estudios realizados en todo el país: provincia del Alto Magdalena en Cundinamarca, provincia de Bagua en la región del Amazonas, río Bogotá, río Ranchería en La Guajira, fuentes de aguas superficiales de acceso a Nueva Venecia y Buena Vista en la Ciénaga Grande de Santa Marta, entre muchos otros. El río Magdalena cuenta con características organolépticas

singulares que resultan poco aceptables para el consumo humano; la Procuraduría encontró que el 27% de los municipios que se encuentran en su ribera tienen daños en sus plantas de potabilización. A pesar del riesgo que esto conlleva, siete de cada diez municipios nunca han realizado estudios para medir la relación entre la calidad del agua y la morbilidad de la población: solo el 22% de estos han podido verificar que su población se enferma por la calidad de las aguas del río (Aguirre, Piraneque y Cruz, 2018).

Es de gran importancia ajustar estas investigaciones al Plan Decenal de Salud en Colombia, que se plantea como un modelo a través del cual deben tomarse acciones encaminadas a preservar la salud en nuestro territorio colombiano (Orobio *et al.*, 2017). La innovación en procesos de clarificación de aguas busca que estos sean más económicos, eficientes y amigables con el medioambiente. Este proceso es una de las etapas más sustanciales, ya que permite la remoción de materiales en suspensión tales como arcilla, limo y lodos. Para lograr la clarificación del agua, es necesaria la utilización de algún agente coagulante que elimine un porcentaje significativo de las partículas en suspensión. Actualmente, el coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio ($Al_2 [SO_4]_3$); sin embargo, su uso genera un impacto negativo en el medioambiente y en la economía, puesto que las grandes cantidades de lodos de desecho producidos en su implementación son difíciles de tratar; los lodos remanentes infertilizan las tierras y los niveles altos de aluminio remanente en las aguas tratadas son un riesgo para la salud pública (Andía, 2000).

Recientes investigaciones han demostrado también la eficiencia de las sustancias orgánicas en cuanto a la remoción de turbidez, color y microorganismos; además, también se demostró la inocuidad de estos productos naturales en la salud humana con la producción de agua limpia y segura sin el uso del sulfato de aluminio (Ramírez y Jaramillo, 2016). La parte más sensible en el tratamiento del agua es el proceso de clarificación, mientras que la coagulación es fundamental en la potabilización del agua. Esto incluye la remoción de especies en suspensión mediante la adición de coagulantes sintéticos o naturales. Para evitar el uso de coagulantes sintéticos y sus implicaciones demostradas sobre la salud, se hace necesaria la búsqueda de alternativas que incluyan la utilización de coagulantes de origen vegetal (Guzmán, Villabona, Tejada y García, 2013).

La *Opuntia* (*Opuntia spp.*) se produce en muchas regiones de Centroamérica y Sudamérica, y, a nivel industrial, en México, desde donde se expor-

ta hacia gran parte del mundo teniendo en cuenta el color, el tamaño y la ausencia de deformaciones visualizadas por los productores al momento de la cosecha (Díaz *et al.*, 2015). El objetivo principal del trabajo presentado en este libro fue evaluar la capacidad que posee la mezcla entre la penca del *Opuntia ficus-indica* y *Moringa oleifera* para remover la turbidez y el color presente en las aguas del río Magdalena. La eficiencia de los coagulantes y las mezclas se calcularon comparando la turbidez y el color iniciales con los valores finales obtenidos después de un tratamiento a las muestras. Se usó un equipo de prueba de jarras para simular las condiciones de los procesos de coagulación-floculación que se utilizan en los sistemas de tratamiento de aguas. El alcance de este trabajo es determinar la dosis de coagulantes naturales y sulfato de aluminio a las que se logra la mayor remoción de turbidez y color, tanto para los coagulantes al ser utilizados por separado como para las mezclas. Se detalla el proceso de obtención del coagulante en su forma granulada, el procedimiento de jarras y la obtención de color por medio de la absorbancia. Se espera que la información recopilada sirva como base para investigaciones futuras que permitan establecer si es viable utilizar estos coagulantes naturales a escala industrial en los procesos de potabilización de aguas.

1. Estado del arte

Agua cruda: El agua cruda es aquella que se encuentra en las fuentes, en su estado natural, sin tratamiento. Se pueden identificar como fuentes de agua cruda los cursos superficiales o subterráneos, entre ellos los ríos, arroyos, lagos, lagunas y acuíferos, que el hombre usa como materia prima para abastecerse. Se le dice agua cruda porque esta recoge las impurezas provenientes del suelo, el polvo y la descarga de aguas residuales, ya sean domésticas o industriales (Guzmán, Tarón y Núñez, 2007).

Agua potable: Es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas de las condiciones señaladas en el Decreto 1575 de 2007, es apta para consumo humano. Esto se debe a que ha tenido un proceso de purificación. Se puede utilizar en bebidas de forma directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal.

Turbidez del agua: En muchas zonas urbanas en Colombia el agua cruda proviene de fuentes superficiales con gran cantidad de partículas coloidales que generan turbidez por sedimentos y nutrientes; esta agua requiere ser tratada para disminuir los sólidos y la carga microbiana, que hacen que su consumo sea peligroso para la población infantil (Joshi y Sahu, 2014). La turbidez se define como la dificultad del agua para transmitir luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales (Rigola, 1989). La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. En los lagos la turbiedad es debida a dispersiones extremadamente finas y coloidales; en los ríos se debe a dispersiones normales. En términos matemáticos, la turbidez se define como el logaritmo natural de la dismi-

nución de la intensidad luminosa al pasar un rayo de luz a través de un medio de espesor l , así:

$$\tau = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

La turbidez se puede eliminar mediante procesos de decantación, coagulación y filtración (Arboleda, 1992).

Color: Es el resultado de la presencia de materiales de origen vegetal tales como ácidos húmicos, turba, plancton y de ciertos metales como hierro, manganeso, cobre y cromo, disueltos o en suspensión. Constituye un aspecto importante en términos de consideraciones estéticas. Los efectos del color en la vida acuática se centran, principalmente, en aquellos derivados de la disminución de la transparencia; es decir que, además de entorpecer la visión de los peces, provoca un efecto barrera a la luz solar, traducido en la reducción de los procesos fotosintéticos en el fitoplancton, así como en una restricción de la zona de crecimiento de las plantas acuáticas (Rodier 1989). Según el origen del color, los principales tratamientos de eliminación pueden ser la coagulación, la filtración, la cloración o la adsorción en carbón activado (Rigola, 1989).

Tabla 1. Colores y asignación de clases de calidad del agua.

Código del color	Interpretación de la calidad
Azul	Sin contaminación
Verde	Contaminación incipiente
Amarillo	Contaminación moderada
Anaranjado	Contaminación severa
Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: MINAE & MINSA, 2007.

Espectrofotómetro: Es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto en una disolución; el color de las sustancias se debe a que estas absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que

incide sobre ellas y solo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbidas (Fersht, 1980).

Transmitancia (T): Es la cantidad de luz transmitida a través de una solución; matemáticamente, cuando un haz de luz de intensidad I incide sobre una cubeta cuadrada que contiene una solución coloreada que absorbe luz a una determinada longitud de onda, se produce en la solución un proceso de absorción, y el haz de luz que sale después de atravesar la cubeta tiene una intensidad menor, I_0 , como muestra las siguientes ecuaciones (Aguirre *et al.*, 2018):

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Absorbancia (A): Es la cantidad de luz absorbida por una solución; esta es directamente proporcional a su concentración; también depende de la distancia que recorre la luz por la solución (Vidal y Hernández, 2014).

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

Coloides: En general, son diminutas partículas sólidas que no sedimentan por la simple acción de la gravedad, pero pueden removerse del agua mediante técnicas como coagulación, filtración o acción biológica. Todas las partículas coloidales en una determinada dispersión acuosa poseen la misma carga eléctrica neta, ya sea positiva o negativa. Debido a esto, existe entre ellas una repulsión electrostática que las mantiene separadas, lo cual dificulta su remoción (Díaz, 2014).

Forma de los coloides: Tiene relación directa con sus propiedades; sin embargo, no existe una clasificación adecuada de las formas coloidales. Algunos las clasifican en isométricas y anisométricas. Las primeras son aquellas que tienen dimensiones uniformes en todas las direcciones (esferas, poliedros); las segundas son las que se extienden en una o dos dimensiones y pueden ser cilindros, láminas, cintas (Díaz, 2014).

Propiedades de los coloides: Presentan un movimiento browniano, es decir, se mueven de manera constante e irregular; adicionalmente, poseen una gran área superficial específica gracias a la cual las partículas coloidales desafían la gravedad, comportamiento que evita que puedan ser removidas por una sedimentación simple. Esto se debe a que, mediante su inmensa área superficial, los coloides adsorben iones en cantidades desiguales, originando la formación de una carga eléctrica que contribuye a su estabilidad. El grado de estabilidad está determinado por

el potencial Z , que se relaciona con la carga y la distancia a través de la cual esta carga es efectiva (Díaz, 2014).

Teoría de la doble capa: Las partículas coloidales se caracterizan por estar rodeadas por dos capas eléctricas, que son la base de su gran estabilidad. La capa interna consiste tanto en cationes como en aniones, pero por lo general su carga neta es negativa. La capa externa posee cationes intercambiables como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} (Díaz, 2014).

Potencial zeta: Es la medida, en milivoltios, del potencial eléctrico generado entre las dos capas que rodean al coloide. Este parámetro se usa para controlar el comportamiento del coloide puesto que tiene una relación directa con las fuerzas de repulsión, las cuales impiden la unión entre los coloides. La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. En este caso, se requiere energía adicional para sobrepasar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas (Rodríguez, 2008).

Fuerzas de Van der Waals: Constituyen una fuerza de atracción intermolecular causada por la interacción de dipolos, ya sean permanentes o inducidos. Es decir, son el resultado de la atracción entre las moléculas individuales de cada coloide; este efecto es aditivo. Por otro lado, la estabilidad del coloide depende de la carga neta resultante de la suma de las fuerzas de repulsión y atracción.

Aplicación del potencial zeta en la coagulación del agua: Permite la optimización de la dosificación de coagulante. Debido a su diminuto tamaño y a su complejo comportamiento, las partículas coloidales no pueden ser removidas por métodos de sedimentación y filtración convencionales; es por ello que hoy en día estos se eliminan mediante la disminución del potencial zeta con coagulantes tales como el alumbre, cloruro férrico y/ o polímeros catiónicos. Una vez reducida o eliminada la carga, no existirán fuerzas repulsivas que impidan la formación de macropartículas (Restrepo, 2009).

2. Proceso de coagulación

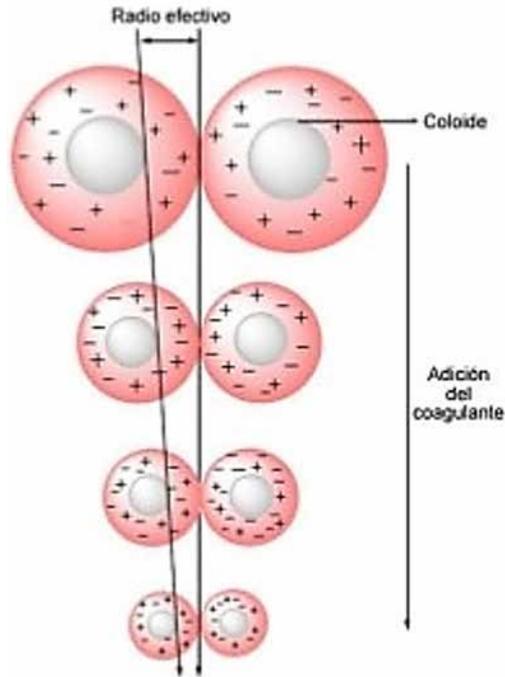
Los procesos de coagulación y sedimentación de particulado en el agua hacen parte del tratamiento primario avanzado, que es el más utilizado para la remoción de partículas contaminantes presentes en aguas con altos niveles de turbiedad (Barreto, Vargas, Ruiz y Gómez, 2019). En zonas rurales de Colombia, el agua superficial es de gran importancia como fuente de consumo; sin embargo, no siempre estas aguas son aptas, ya que pueden tener una alta carga bacteriana y sólidos en suspensión, lo que torna necesario su tratamiento mediante la combinación de procesos físicos y químicos que requieren el uso de coagulantes como el sulfato de aluminio, sustancia que, pese a cumplir eficientemente con su función, es bioacumulada por los humanos y afecta su salud (Fuentes, Molina y Ariza, 2016).

Es fundamental revisar los mecanismos de coagulación y de floculación; este último, por definición, es un proceso en el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, que se denominan flóculos. Con este proceso se consigue la remoción de turbiedad, se remueven sustancias que imparten color verdadero y aparente y se eliminan bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación; asimismo, se separan las algas y el plancton, y se remueven sustancias que imparten sabor y olor (Arboleda, 1992). El mecanismo de coagulación se da cuando hay un potencial repulsivo de la doble capa eléctrica del coloide y este es reducido, produciendo micropartículas que colisionan y forman aglomeraciones más grandes llamados flóculos (Matilainen, Vepsäläinen y Sillanpää, 2010). El proceso de coagulación se define como la adición de sustancias químicas para que las partículas y contaminantes disueltos se junten en partículas más grandes y puedan retirarse mediante procesos de remoción de sólidos (Dempsey, 2006). Es un fenómeno fisicoquímico que logra que las partí-

culas coloidales se desestabilicen y algunos sólidos suspendidos precipiten, lo que facilita la remoción de partículas coloidales y suspendidas del agua; de esta forma se reducen la turbidez, el color y, en menor medida, las bacterias (García, 2005). La coagulación es el proceso más importante en el tratamiento del agua: incluye la remoción de partículas en suspensión mediante la adición de coagulantes sintéticos y naturales (Choqueo, Choqueo, Solano y Pacheco, 2018).

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Martel, 2004). La coagulación se lleva a cabo, generalmente, con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos. El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla. El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. La coagulación está fundamentalmente en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como pH, alcalinidad, color verdadero, turbiedad, temperatura, movilidad electroforética, fuerza iónica, sólidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaños de las partículas en estado coloidal y en suspensión (Martel, 2004).

Imagen 1. Proceso de coagulación-floculación.



Fuente: Yuan *et al.*, 2012.

2.1 Tipos de coagulantes

2.1.1 Coagulantes metálicos.

En el tratamiento de del agua cruda, los coagulantes metálicos han sido ampliamente utilizados; estos actúan como coagulantes y floculantes y forman compuestos complejos hidratados. Entre los más usados se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato férrico, el sulfato ferroso, el cloruro férrico y el aluminato de sodio (Romero, 2000). Los componentes son productos químicos que, al adicionarles al agua, son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con su alcalinidad, para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el *floc* son:

- a) Sulfato de aluminio.
- b) Aluminato de sodio.
- c) Cloruro de aluminio.
- d) Cloruro férrico.
- e) Sulfato férrico.
- f) Sulfato ferroso.
- g) Polielectrolitos (como ayudantes de floculación).

Los coagulantes más utilizados son las sales de aluminio y de hierro, que producen una serie de reacciones muy complejas en las que los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua (actúa mejor con un pH del agua entre 6 y 8) y producen los hidróxidos de aluminio o hierro, que son insolubles y forman los precipitados (Cárdenas, 2000).

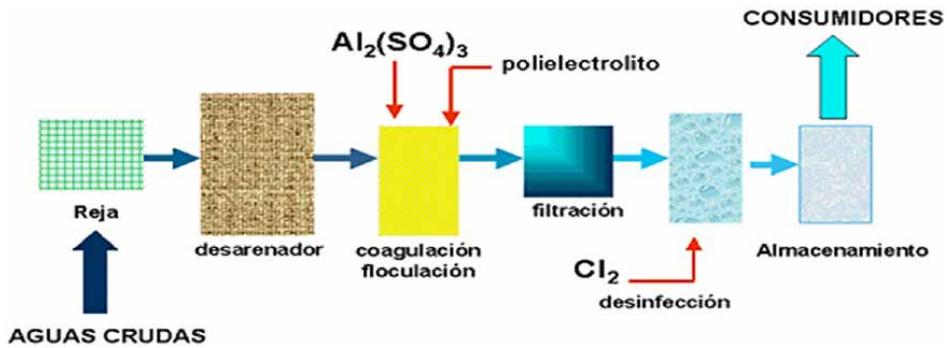
2.1.2 Coagulantes naturales.

Los coagulantes naturales, generalmente, se derivan de extractos naturales compuestos por semillas, hojas, cortezas o savia; también de raíces y de frutas obtenidos de árboles y de plantas (Pritchard, Mkandawire, Edmondson, O'Neill y Kululanga, 2009). Los polímeros orgánicos naturales se han usado por muchos años y son ancestralmente reconocidos en India, África y China, donde en algunos casos son utilizados como coagulantes de aguas turbias que se usan de manera doméstica en zonas rurales (Asrafuzzaman, Fakhuruddin y Hossain, 2011). Actualmente, se siguen usando plantas nativas, como las semillas del árbol de Nirrali (*Strychnos potatorum*), granos tostados de maíz (*Zea mays*) o savia del cactus *Opuntia ficus-indica* (Šćiban, Klašnja y Stojimirovic, 2005). Estos coagulantes naturales se pueden usar solos o como substitutos de coagulantes químicos, es decir, como alternativos en su reemplazo o disminución de su uso (Özacar y Sengil, 2000); su aplicación está destinada a reducir la turbidez y el recuento de microorganismos en las aguas de consumo doméstico (Ghebremichael, Gunaratna, Henriksson, Brumer y Dalhammar, 2005). Asimismo, investigaciones han mostrado sus buenos resultados en el ablandamiento de aguas, gracias al retiro de sustancias carbonadas (Muyubi y Evinson, 1995); también hay trabajos sobre su uso en el acondicionamiento de lodos (Özacar y Sengil, 2000).

Son una fuente alternativa con un gran potencial que aún no se ha explotado. Por lo general, presentan una mínima o nula toxicidad y, en mu-

chos casos, son productos alimenticios con alto contenido de carbohidratos y proteínas. Entre el grupo de sustancias conocidas que poseen estas propiedades aglomerantes se encuentran algunos compuestos orgánicos de origen vegetal, los cuales pueden obtenerse del tallo o las semillas de una enorme variedad plantas como la *Moringa oleifera*, la tuna, el frijol, el maíz, entre otros. Tienen alta efectividad para aguas con una baja turbidez y presentan buena eficiencia en aguas industriales. Los polímeros naturales se producen de manera espontánea debido a reacciones bioquímicas que ocurren en animales y plantas; algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son utilizados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia, con muy buenos resultados (Vásquez, 1994).

Imagen 2. Esquema de purificación del agua.



Fuente: Seguridad industrial, 2011.

2.2. Prueba de jarras

La prueba o test de jarras es la técnica o procedimiento más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y evaluar el comportamiento a pequeña escala; en ella se trata de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio (Ramos y Smit, 2019; Ceron, 2016). Las pruebas de jarra implican preparación previa, ya que se evaluarán las características técnicas del producto y su comportamiento para poder predecir el rendimiento en el proceso. Las jarras simulan lo más cercanamente posible a la realidad, en condiciones de laboratorio, los procesos químicos y mecánicos que tienen lugar en el equipo de clari-

ficación (Cogollo, 2011). La estandarización de la prueba de jarras inició en 1980. Su finalidad es evaluar a escala de laboratorio la reducción de sólidos disueltos, suspendidos, coloides y otras partículas no sedimentables por gravedad, mediante un proceso de coagulación-floculación y posterior sedimentación. Con esta serie de ensayos, también se busca determinar la cantidad óptima de reactivos químicos requeridos para tratar una determinada agua cruda y las condiciones óptimas para conseguir mejores resultados.

Los factores que pueden dificultar la determinación de las condiciones óptimas son:

- a) Cambios en la temperatura del agua durante la prueba, lo cual podría provocar corrientes de convección y afectar, así, la sedimentación normal de los flóculos.
- b) Intercambio gaseoso, es decir, formación de burbujas debido a agitación mecánica, cambios de temperatura o a reacciones químicas, lo que generaría la flotación de los flóculos.
- c) Período transcurrido entre la toma de muestras y el ensayo, pues tanto la actividad biológica desarrollada en el agua como otras reacciones físicoquímicas podrían afectar la coagulación-floculación y posterior sedimentación del agua, así como la oxidación de las sustancias presentes en ella (Díaz, 2014).

2.3. Marco legal

La calidad del agua potable en Colombia se rige principalmente por el Decreto 1575 de 2007 y las Resoluciones 2115 de 2007, 811 de 2008 y 82 de 2009, de obligatorio cumplimiento. Entre ellos, priman sobre todo el Decreto 1575, la Resolución 2115 de 2007 y la reciente Resolución 330 de 2017, mediante la cual se adopta el el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico del RAS 2017.

Según esta legislación, el agua cruda debe ser caracterizada y sometida a procesos de tratamiento para su uso agroindustrial y para consumo humano, entre otros. Además, es de suma importancia realizar la remoción de los sólidos suspendidos mediante la aplicación de las fases de coagulación y floculación, donde se establece el requerimiento de prácticamente ausencia de color y de turbiedad en el agua a utilizar con propósitos alimentarios por el ser humano, aparte de realizar ensayos de

dosificación de coagulantes, gradientes de velocidad, tiempos de mezcla, sedimentación, filtración y desinfección antes del tratamiento (Art. 108 del RAS-2017 y Decreto 1575 de 2007). La clarificación es un proceso preliminar del tratamiento de potabilización de agua a través del cual se remueven partículas suspendidas del agua turbia para hacerla clara. Al adicionar sustancias químicas o naturales al agua turbia, se logra que algunas partículas suspendidas se precipiten al fondo del recipiente, dejando una capa de agua más clara arriba y una capa de sedimentos (lodo) en el fondo. Estos sedimentos deberán desecharse (Flórez, 2011).

2.4. Estudios sobre clarificantes naturales

La clarificación es una etapa muy sensible en la purificación del agua. Este proceso consiste en el efecto que producen la coagulación, la floculación y la sedimentación; principalmente, se desean eliminar el color, los materiales suspendidos y la turbidez; también se remueven metales como aluminio, hierro, manganeso y algunos carbonatos (Brandt, Johnson, Elphinston y Ratnayaka, 2018). Para el proceso de coagulación-floculación es necesaria la adición de sustancias químicas o naturales (Kim, Moon y Lee, 2001). Trabajos de varios investigadores indican que es posible aprovechar los polímeros orgánicos obtenidos a partir de extractos de plantas o sus semillas para reducir la turbidez, sin efectos en la toxicidad y bajo o nulo impacto en el ambiente, ya que son biodegradables. Por este motivo, este tipo de extractos son comúnmente llamados coagulantes naturales (Abebe, Chen y Sobsey, 2016).

En los últimos años, se han venido adelantando muchas investigaciones para la búsqueda de nuevas tecnologías cuyo propósito es la obtención de aguas mucho más aptas para el consumo humano, lo cual ha hecho que investigadores se centren en la idea de encontrar coagulantes a partir de fuentes naturales. En este sentido, investigaciones con la penca de tuna o nopal —en las que se realizaron ensayos donde se utilizó el test de jarra y se determinó para cada caso la dosis óptima— encontraron que la remoción de turbidez fue, en todos los casos, mayor a 96% (el más eficiente fue el mucílago de penca de tuna licuado) y que el desempeño de los clarificantes naturales fue mejor que el del sulfato de aluminio (Almazán et al., 2018). Queda claro que las aguas pueden ser tratadas mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación para la remoción de material en suspensión o coloidal para alcanzar alta efectividad. Este proceso conlleva al uso de sustancias químicas que pueden ser contaminantes

(Kakoi, Kaluli, Ndiba y Thiong'o , 2016). En la actualidad, es frecuente la búsqueda de otros coagulantes alternativos para la clarificación del agua de origen natural como las cáscaras de naranja (Kebaili, Djellali, Radjai, Drouiche y Lounici, 2018), las del banano (Kakoi *et al.*, 2016), semillas de habas (Kukić, Šćiban, Prodanović, Tepić y Vasić, 2015), almidones (Choy, Prasad, Wu, Raghunandan y Ramanan, 2016), castañas y bellotas (Šćiban, Klašnja, Antov y Škrbić, 2009), las legumbres (M. B. Šćiban, Klašnja y Stojimirović, 2005). No obstante, gran parte de los trabajos acerca del uso de clarificantes naturales se centran en la semilla de la *Moringa Oleifera*, la semilla de Nirmali, los taninos y el cactus *Opuntia ficus-indica*, empleados para el tratamiento de agua bruta y residual (Yin, 2010).

En un trabajo, se evaluó el poder coagulante de diferentes mezclas de almidón de yuca y semillas de *Moringa oleifera* para clarificar agua turbia; se hizo el respectivo test de jarras y se estableció, para esta prueba, una agitación rápida a 120 rpm durante 1 minuto, agitación lenta a 30 rpm durante 20 minutos y sedimentación durante 15 minutos. Para las cinco combinaciones naturales, se estableció una relación 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 y 50-50 almidón de yuca-semillas de *Moringa oleifera*. Finalizado el proceso, se comparó con una muestra control la turbidez del agua y se determinó que esta se redujo en 89.7%, 93.0 y 93.4% en tres de las mezclas (Riaños, Meza y Mercado, 2019). El tratamiento primario para la remoción de partículas en aguas turbias incluye la coagulación-floculación y la sedimentación. Tratando de buscar alternativas en el reemplazo de coagulantes químicos tradicionales como el sulfato de aluminio, se han realizado pruebas con semillas de aguacate y el mucílago del café para tratar las aguas de una quebrada. A fin de probar la eficiencia de los coagulantes, se realizaron ensayos de jarras y se determinó la reducción de color y turbiedad. La semilla de aguacate presentó una remoción del 44.3% en la turbiedad; en el caso del mucílago del café y la solución buffer de fosfato, su efectividad en la remoción fue del 64, 3% y 52,2 % de turbiedad y 52,2% de color. Estos coagulantes podrían funcionar como auxiliares en el proceso de tratamiento primario de aguas con alta turbidez (Barreto *et al.*, 2019).

En un estudio muy reconocido sobre la utilización de coagulantes naturales se evaluó la capacidad de estos en el tratamiento de las aguas del río Magdalena (que son consumidas por comunidades muy vulnerables en diferentes zonas de su cauce) usando *Moringa*, cactus, neem y maíz. En las pruebas de jarras se establecieron la dosis óptima de coagulante, el tiempo y la velocidad de floculación. Inicialmente, se fijó la dosis ópti-

ma para el sulfato de aluminio de 0.02 g/L y se tomó como control. Para *Moringa*, determinaron 2.0 g/L como dosis, que pudo reducir la turbidez en 96.8% y el color en 97.8%, mientras que el control logró 95.7% y 96.5%, respectivamente. Para el neem, el estudio mostró que una dosis de 0.8 g/L disminuyó 99.4% de los coliformes totales y 99.2% de los coliformes fecales. El maíz, por su parte, con 2.5 g/L, redujo 94.4% de los coliformes totales, tras lo cual se concluyó que estas sustancias naturales son una alternativa posible y sostenible de potabilización del agua del río Magdalena (Aguirre et al., 2018). Investigaciones de Antov, Sibán, Adamovis y Klasnja (2007) y Guzmán et al. (2013) plantean que coagulantes de origen natural como la *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*, *Hibiscus sabdariffa*, *Prunus pérsica*, *Vicia faba*, *Phaseolus vulgaris*, *Opuntia ficus* y los hongos *Pleurotus tuberregium* y *Sclerotium sp.* son utilizados en el tratamiento del agua. El efecto coagulante junto con el efecto de cationización de taninos naturales de la semilla y la corteza de los árboles de *Acacia mearnsii*, *Schinopsis Quercus ilex*, *Q. suber*, *Q. robur*, *Castanea* y *Pinus* es un método que podría ofrecer resultados promisorios para purificar el agua de consumo (Beltrán, Sánchez y Dávila, 2011).

Un proyecto internacional llamado AQUAPOT, que ha instado a la búsqueda de nuevas alternativas para posibilitarles el acceso a agua potable a países en vía de desarrollo como Mozambique, en el año 2006 realizó investigaciones sobre los recursos naturales de este país para su aprovechamiento, destacando la *Moringa oleifera* como clarificante (Arnal et al., 2006). El principal resultado de la investigación fue un protocolo sencillo y de bajo coste y la valorización de los residuos obtenidos en cada etapa del proceso de potabilización como productos de valor añadido. Choqueo et al. (2018) evaluaron la capacidad floculante de tres variedades de cactáceas *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* en el tratamiento de agua residual artificial en Perú. Se aplicaron dosis del 1 al 3% de coagulante de las tres variedades de cactáceas extraídas con los tres solventes al agua residual artificial y se observó un incremento significativo para la capacidad clarificante y el porcentaje de remoción con la variedad *Echinopsis pachanoi* (Ramírez y Jaramillo, 2016).

En Argentina, Almazán et al. (2018) evaluaron el poder clarificante del mucílago de penca de tuna agregándolo a matrices acuosas turbias de diversas formas y, haciendo uso del test de jarras, se determinó para cada caso la dosis óptima. En otra investigación, la remoción de turbidez fue mayor a 96%, con un desempeño destacable en comparación con el sulfato de aluminio (Ramírez y Jaramillo, 2016). Recientemente, se han

desarrollado otros trabajos con clarificantes menos comunes como es la sábila. Morales (2018) presentó un estudio en el que determinó un alto poder coagulante de la sábila en la remoción de turbidez intermedia en el proceso de tratamiento de agua destinada al consumo humano; de igual forma, Ramos y Smit (2019) estudiaron el efecto de la concentración de aloe vera y el tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de agua residuales municipales en Santiago de Chuco, Perú.

2.4.1 *Opuntia ficus*.

La *Opuntia*, de la familia *cataceae*, produce un hidocoloide, que es un mucílago; este forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua (Saag, Sanderson, Moyna y Ramos, 1975). Estos mucílagos son sustancias poliméricas muy complejas: se trata de carbohidratos con una estructura altamente ramificada (Medina, Brito, Torrestiana y Katthain, 2000; Goycoolea y Cárdenas, 2004; Matsuhira, Lillo, Sáenz, Urzúa y Zárate, 2006). Estos polímeros contienen L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y también ácido galacturónico en diferentes proporciones (Trachtenberg y Mayer, 1981). Son fracciones distintas solubles en agua; por un lado, la pectina, con propiedades gelificantes; por el otro, un mucílago sin propiedades gelificantes (Goycoolea y Cárdenas, 2004). Se trata de plantas rastreras con forma simple o de matorrales y pueden llegar a medir hasta 5 m de alto. Sus partes oblongas, llamadas pencas, alcanzan los 30 a 50 cm de ancho y 2 cm de espesor; su color es verde opaco. Algunas tienen espinas, que son cortas, poseen flores y frutos ovalados y de color rojo, naranja o amarillo. La planta del nopal se distribuye en América; México, por ser el país con mayor abundancia de especies, se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie.

En Colombia, por otro lado, es una planta silvestre utilizada ocasionalmente para ornamentación. A lo largo de la geografía americana recibe distintos nombres: nopal, tunera, cardón, higo mexicano, penco, entre otros. Tiene, asimismo, una gran variedad de aplicaciones, sobre todo en el norte de México, donde es consumida como vegetal y es usada por la industria farmacéutica para tratar la obesidad, hiperglicemia, el colesterol, entre otros (Rivas, 1998). A nivel industrial, la penca de tuna (*Opuntia ficus*) ha tenido una gran auge en la comunidad científica, ya que se produce un gran volumen del mucílago y se usa potencialmente como fuente de pectina para las industrias farmacéutica y alimentaria (Miller, Fugate, Craver, Smith y Zimmerman, 2008; Smida *et al.*, 2017; Bakour *et al.*, 2017).

El mucílago es un carbohidrato complejo. Entre los monómeros contenidos en la cadena se encuentran la L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y el ácido galacturónico, que es el ingrediente activo de la coagulación de la *Opuntia ficus* y que contribuye, por lo menos, con el 50% de la remoción de turbidez. La *Opuntia ficus* opera mediante un mecanismo de formación de puentes interpartículas en el que los coloides no están directamente en contacto unos con otros, sino que están unidos al material polimérico presente en las especies de cactus (Aponte y Cardona, 2009).

Tabla 2. Características fisicoquímicas de la *Opuntia ficus*.

Análisis	Característica
Humedad	90-95% El agua es el principal componente del nopal y su contenido varía según la especie, la humedad del suelo, la disponibilidad del agua en este y la edad de la planta.
Compuestos Nitrogenados	7.33- 13.63% Este elemento se encuentra en compuestos como las proteínas; en las pencas varía de 5.2-23% en base seca.
Lípidos	1.22% El contenido de lípidos es bajo. Posee proporciones variables de triglicéridos, ceras, resinas, látex, flavonoides, taninos, pigmentos clorofiloides y carotenoides.
Carbohidratos	8.49% Los principales carbohidratos son: glucosa, fructosa, arabinosa, xilosa, galactosa y ácido galacturónico.
Vitaminas	Presencia de ácido ascórbico, caroteno, tiamina, riboflavina y niacina.
Otros compuestos orgánicos	Se encuentran en menor proporción: almidones, aceites, celulosa, sustancias pépticas, ceras, aceites esenciales, pigmentos y alcaloides.
Gomas	Está formada por ácido galacturónico, L-arabinosa, D-xilosa y D-galactosa.

Fuente: Aguilar, Martínez, Barrientos, Aguilar y Gallego, 2007.

Las propiedades de la *Moringa oleifera* fueron descubiertas y utilizadas por vez primera en China por mujeres de escasos recursos, quienes, al buscar agua para beber, descubrieron que las semillas de cierto árbol que

crecía cerca de sus casas tenían el don de arrastrar la suciedad del agua hasta el fondo de la vasija donde la almacenaban y que aquel lodo no volvía a la superficie, dejando el agua limpia y clara. Desde ese momento, aquella planta y sus propiedades se han dispersado no solamente en Asia, sino en otras regiones, adaptándose muy bien a los trópicos (Apon-te y Cardona, 2009).

2.4.2 *Moringa oleifera*.

La *Moringa oleifera* es un árbol originario del sur del Himalaya. Se encuentra diseminado en gran parte del planeta y se puede reproducir por estacas o semillas; contienen de 12 a 25 semillas por fruto y cada árbol puede producir de 15000 a 25000 semillas por año. El árbol de Marango (*Moringa oleifera*) posee un alto contenido de proteínas en sus hojas, ramas y tallos. Sus frutos y flores contienen vitaminas A, B y C y proteínas. Las semillas tienen entre 30 y 42% de aceite y su torta contiene un 60% de proteína (Foidl, 2000).

En el tratamiento primario para la potabilización de agua se utilizaron semillas de *Moringa oleifera* como floculante y como reemplazante del sulfato de aluminio, que es el clarificante más usado industrialmente. En este trabajo se determinaron los parámetros físicoquímicos y microbiológicos, evaluando la efectividad de la *Moringa* como floculante natural. Se determinó este parámetro usando el ensayo de jarras con diferentes tiempos y comprándolos con el sulfato de aluminio. Las concentraciones a trabajar variaron en un rango entre 3,5 mg/L y 170mg/L, con porcentajes de remoción bastante eficientes, llegando a ser superiores al 90% en algunos casos (Acevedo, 2019).

La *Moringa oleifera* contiene 17 aminoácidos: ácido aspártico (Asp), ácido glutámico (Glu), serina (Ser), glicina (Gli), histidina (His), arginina (Arg), treonina (Tre), alanina (Ala), prolina (Pro), tirosina (Tir), valina (Val), metionina (Met), cistina (Cis), isoleucina (Ile), leucina (Leu), fenilalanina (Fen) y lisina (Lis). Este último aminoácido podría participar en la desestabilización de las partículas coloidales responsables de la turbidez del agua y de su subsiguiente coagulación. Los aminoácidos polares hidrofílicos presentes en la *Moringa oleifera* son: Glu, Asp, Arg, His y Lis, los cuales se presentan en el agente coagulante activo de las semillas del Marango. de tal manera que este coagulante puede estar formado, principalmente, de una o varias proteínas o cadenas polipeptídicas solubles en agua, permitiendo mayor contacto con las partículas coloidales presentes en agua turbias, lo cual mejora la función coagulante de las semi-

llas (Gómez, 2010). La purificación y la caracterización del componente activo de la *Moringa oleifera* han sido de alto interés para determinar los mecanismos de coagulación y compararlo con el sulfato de aluminio. Así, se ha comprobado que la *Moringa oleifera* puede ser utilizada para el tratamiento de agua, con concha o sin concha. La absorción y neutralización de cargas son los principales mecanismos de coagulación presentes en este tratamiento. En comparación con otras investigaciones sobre los mecanismos de acción del sulfato de aluminio, la adsorción-neutralización predomina en pH bajos, mientras que en un pH mayor, como 7.0, la acción en la coagulación es de barradura. Las semillas de *Moringa* tienen una remoción del particulado un poco menor que la del sulfato de aluminio; esto puede ser justificado desde el punto de vista ambiental y de salud humana (Lédo *et al.*, 2009).

En investigaciones para el tratamiento de agua residual con *Moringa* se encontraron eficiencias en la remoción de turbidez muy parecidas a las del sulfato de aluminio. Se sabe que los costos del sulfato de aluminio son hasta 40 veces menor que los de la *Moringa*; sin embargo, hay regiones donde esta es lo suficientemente abundante y compensa su uso. Otro factor influyente es que los sólidos suspendidos y otras variables importantes como la turbidez y las demandas química y bioquímica de oxígeno alcanzaron valores que se ajustan dentro del marco legal; por lo tanto, la coagulación con *Moringa oleifera* permite que el agua residual cumpla con algunos parámetros establecidos en la resolución 0631 del 2015 (Bonilla y Perea, 2019).

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Esta investigación se realizó en el laboratorio de análisis físicoquímico del agua de la Universidad del Atlántico (LAFA) por medio de una investigación cuantitativa de tipo experimental. Se analizó el efecto que generaba el uso de coagulantes naturales mezclados con coagulantes artificiales como el alumbre; en el análisis se tuvieron en cuenta variables como la velocidad de agitación, pH, tiempo y temperatura en relación con la turbiedad y el color de las muestras de agua.

3.2. Muestra

El agua utilizada durante las diferentes pruebas fue recolectada en el municipio de Puerto Colombia, con coordenadas geográficas $10^{\circ} 59' 2''$ de latitud Norte y $74^{\circ} 57' 2''$ de longitud Oeste. El día 27 de julio de 2015, el agua se recogió en una pimpina de 20 litros y se transportó al laboratorio (LAFA) para hacer los respectivos análisis iniciales.

Imagen 3. Fuente de recolección del agua.



Fuente: Autoría propia.

Se le realizaron análisis iniciales al agua en cada uno de los días correspondientes, se compararon con los valores establecidos en la Resolución 2115 del 2007 y se indicó el método usado en el laboratorio de aguas de la Universidad del Atlántico.

Tabla 3. Características iniciales del agua del río Magdalena.

Parámetro	Resultado			Resolución 2115 DE 2007	Método usado
	Turb. 1	Turb. 2	Turb. 3		
Turbidez, UNT	489	164	433	2	Turbidímetro
Color, Absorbancia	0,266	0,198	0,259	NA	Espectrofotómetro
pH	6,89	8,2	7,3	6,5 a 9	Potenciómetro

Temperatura, °C	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	NA	Termómetro
	30,4	26,7	28,9		

Fuente: Autoría propia.

Como se aprecia en la Tabla 3, los parámetros iniciales de turbidez del agua están elevados en comparación con la resolución y el pH tampoco es el indicado para que el agua sea potable. Si bien la temperatura no influye, se tomó en cuenta y arrojó resultados entre 25 y 30°C.

3.3. Variables del diseño experimental

Mezclando coagulantes naturales como el *Opuntia ficus* y la *Moringa oleifera* con el sulfato de alumbre para clarificar aguas del río Magdalena, se quiere verificar los cambios en las variables de turbidez y color con respecto a los valores iniciales. En la Tabla 4 se pueden apreciar otros parámetros, que también se tendrán en cuenta para la comprobación de los resultados del experimento.

Tabla 4. Variables a tener en cuenta en el experimento.

Tipo de variable	Variable	Definición
Dependientes	Turbidez	Es la disminución de la transparencia de un líquido a la luz, originada por la presencia de partículas sólidas o de coloides en suspensión.
	Color	Está asociado a sustancias que se encuentran disueltas o suspendidas en el agua.
	pH	Es la medida de acidez o alcalinidad de una sustancia.

Independientes	Concentración	Es la cantidad específica de coagulante que se agrega al agua para su tratamiento.
	Velocidad de agitación	Velocidad con que rotaron los agitadores durante la parte final de la prueba.
	Porcentaje de coagulante usado en la mezcla	Es la cantidad relativa de coagulante natural en una mezcla con coagulante químico.
	Tiempo	Magnitud física que mide la duración o separación de un suceso sujeto a cambio.

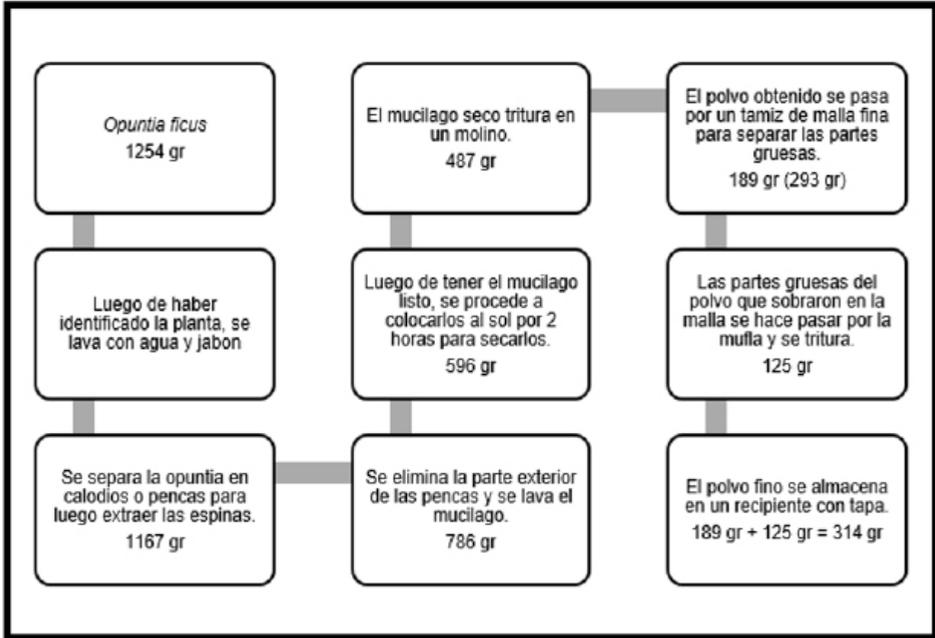
Fuente: Autoría propia.

a. FASE I. Recolección y selección de materia prima

Procesamiento de la materia prima: cladodios de *Opuntia ficus* y *Moringa oleifera*

Extracción del mucílago de la *Opuntia ficus*: Se recolectó la muestra de *Opuntia ficus-indica*, se lavó y se procedió a cortar varios cladodios o pen-cas. Luego, se secó el mucílago gelatinoso (secado solar), el cual se dejó por dos horas en el sol; más tarde, con un molino, se trituro el mucílago, se secó, se pasó por un tamiz de aproximadamente 6 cm y se repitió el proceso de tamizado una vez más para separar de manera correcta las partes gruesas del polvo, como se aprecia en la Imagen 4.

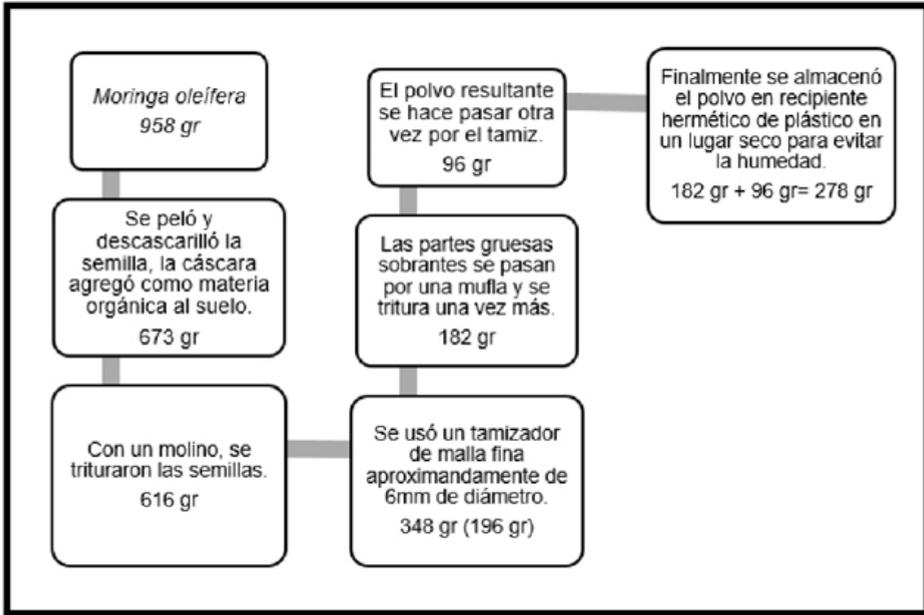
Imagen 4. Procesamiento de la *Opuntia ficus*.



Fuente: Autoría propia.

Extracción del polvo de la semilla *Moringa oleifera*: Para la extracción del particulado de la semilla de la *Moringa oleifera* se siguieron los siguientes pasos, según lo proponen Martín, García, Fernández, Hernández y Jürgen (2013): se le quitó la cáscara a la *Moringa oleifera*, las semillas se pasaron por un molino y, cuando se obtuvo el polvo, se usó un tamiz de aproximadamente 6 cm de diámetro para separar las partes gruesas y se practicó el proceso de tamizado dos veces. El proceso puede observarse en la Imagen 5.

Imagen 5. Proceso de adecuación de la *Moringa oleifera*.



Fuente: Autoría propia.

Diseño experimental: Se analizaron las muestras con aguas del río Magdalena, dependiendo del diseño factorial, que es $8 \times 3 \times 2$ (8 tratamientos, 3 coagulantes y 2 parámetros), donde las variables escogidas son la dosis de coagulante y el pH. El objetivo de la prueba es saber la efectividad de coagulantes naturales como el *Opuntia ficus* y la *Moringa oleifera*.

Tabla 5. Tratamiento de las mezclas de los coagulantes.

Evaluación de los coagulantes. Cada ensayo de jarra por triplicado.											
Tipo de coagulante						Dosis mg/L			pH		
<i>Opuntia ficus</i>						35	40	45	7	8	
<i>Moringa Oleifera</i>						35	40	45	7	8	
Alumbre						35	40	45	7	8	
Mezcla <i>Opuntia</i>-alumbre	%Opuntia			%Alumbre			35	40	45	7	8
	10	20	30	90	80	70					
Mezcla <i>Moringa</i>-alumbre	%Moringa			%Alumbre			35	40	45	7	8
	10	20	30	90	80	70					
Mezcla <i>Moringa</i>-<i>Opuntia</i>	%Opuntia			%Moringa			35	40	45	7	8
	40	60	60	40							

Fuente: Autoría propia.

Luego de tener la materia prima adecuada y el agua lista, se analizaron las muestras de acuerdo con el diseño experimental. Debido a la cantidad de análisis, se dividieron los laboratorios en tres días. Se realizaron las mezclas de *Opuntia* y alumbre con sus respectivas dosis y pH, se pesó la *Opuntia* según las ppm y los porcentajes respectivos; para esto, se realizó una ecuación de proporción directa:

Opuntia: 10% } pH: 7
 Alumbre: 90% } 35 ppm

$$\frac{35 \text{ mg}}{\text{L}} \text{ mezcla} * 0,5 \text{ L} = 17,5 \text{ mg mezcla}$$

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,10 = 1,75 \text{ mg Opuntia}$$

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,90 = 15,75 \text{ mg Alumbre}$$

Opuntia: 20% } pH: 7
 Alumbre: 80% } 35 ppm

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,20 = 3,5 \text{ mg Opuntia}$$

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,80 = 14 \text{ mg Alumbre}$$

Opuntia: 30% } pH: 7
 Alumbre: 70% } 35 ppm

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,30 = 5,25 \text{ mg Opuntia}$$

$$17,5 \text{ mg mezcla} * 0,70 = 12,25 \text{ mg Alumbre}$$

(4)

De esta manera, se realizó sucesivamente para las concentraciones de 40 y 45 ppm y con pH 8.

Ajuste de pH

Para estabilizar el pH, se agregó una solución de ácido sulfúrico al 2% y una solución de hidróxido de sodio al 5%, ambas preparadas previamente en el laboratorio. Con un potenciómetro se leyó el pH del agua y, dependiendo de la lectura, se fue agregando ácido o base con una jeringa hasta ajustar el pH al valor deseado.

Prueba de jarras con agua del río Magdalena

Bajo condiciones estandarizadas de las diferentes combinaciones de dosis de los clarificantes, se hicieron los ensayos de jarra (Imagen 6), se agregó al mismo tiempo la mezcla de clarificantes naturales y sulfato de aluminio a la prueba de jarra y se sometió a una mezcla rápida de 300

rpm por 30 segundos. Las altas velocidades de agitación favorecieron que los coagulantes se unieran con las impurezas, que quedaron suspendidas en todo el recipiente; la velocidad de agitación lenta fue de 60 rpm por 2 minutos, las cuales generaron flóculos más grandes y compactos e hicieron que precipitaran al fondo del recipiente; después de terminar el tiempo de la floculación, las paletas se sacaron de las jarras y se dejaron sedimentar las muestras por 15 minutos, de acuerdo con la norma ASTM No. D2035-80 (ASTM, 2003).

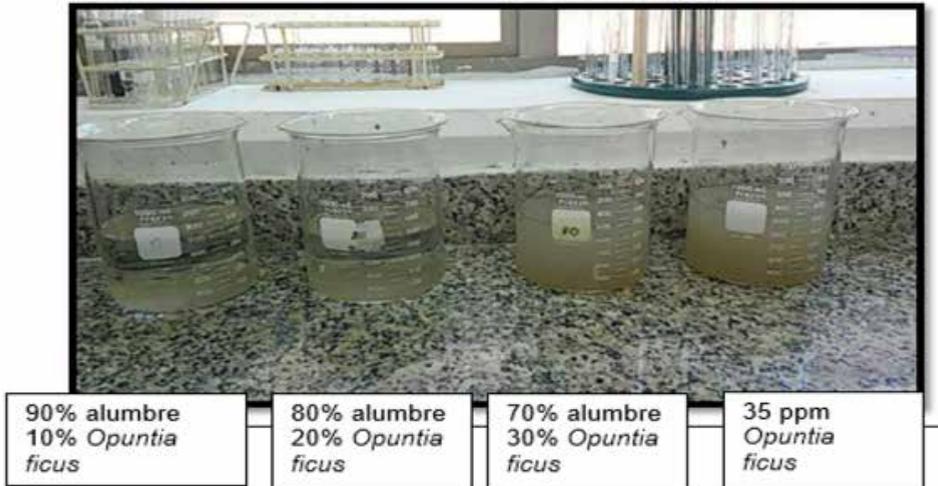
Imagen 6. Test de jarras, marca PHIPPS & BIRD, serie No. 211050307G.



Fuente: Autoría propia.

Después de pasados los 15 minutos de sedimentación, se observó la degradación de color de las muestras, se tomó con una pipeta 40 cc de agua y se almacenó en una probeta para luego pasarlas por el turbidímetro y el espectrofotómetro.

Imagen 7. Degradación del color según la cantidad de clarificante.



Fuente: Autoría propia.

Imagen 8. Representación gráfica de sedimentación con coagulantes naturales *Opuntia ficus* y *Moringa oleifera*.



Fuente: Autoría propia.

b. FASE II. Evaluación de tratamientos

Esta fase consistió en realizar por triplicado el análisis de los resultados de las muestras clarificadas. Se usó el turbidímetro para hallar la turbidez del agua y, con el espectrofotómetro, se halló el color en términos de absorbancia y se compararon los resultados obtenidos para así encontrar la eficiencia de los coagulantes. Después de que las muestras se dejaran en reposo en la probeta, se tomaron 40 cc de agua de cada tratamiento y se aplicaron en la celda con una pipeta, se insertó la celda en el turbidímetro y se repitió el procedimiento dos veces más.

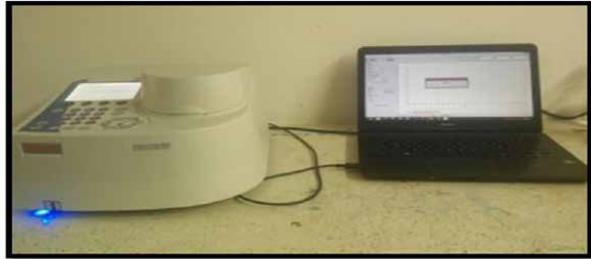
Imagen 9. Uso del turbidímetro, marca PHIPPS & BIRD.



Fuente: Autoría propia.

Al momento de hallar la absorbancia, se tomaron 2 cc de muestra de la probeta y se insertaron en las celdas del espectrofotómetro, se colocaron las indicaciones en el computador, se realizaron las primeras pruebas para hallar la longitud de onda a la cual se trabajaría; después de dos intentos, la longitud de onda en la que no había interferencia era entre 660 y 800 nm.

Imagen 10. Uso del espectrofotómetro, marca EVOLUTION 60S.



Fuente: Autoría propia.

4. Análisis de resultados

4.1. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio

La Tabla 6 muestra los resultados de las mezclas de los coagulantes naturales con el sulfato de aluminio con dos niveles de pH (7 - 8) y a diferentes concentraciones (35 ppm, 40 ppm, 45 ppm), las cuales reflejan que los tratamientos con turbidez más baja fueron *Opuntia ficus* y sulfato de aluminio con pH 7 a una concentración de 40 ppm, *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio con pH 8 a 40 ppm y, a su vez, las combinaciones de *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio con pH 8 a 45 ppm. Los resultados arrojados por el turbidímetro se pueden ver en el Anexo C.

Tabla 6. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio).

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Turbidez
1	<i>Opuntia f.-alumbre</i>	35	7	75,1
2	<i>Opuntia f.-alumbre</i>	35	8	29,3
3	<i>Opuntia f.-alumbre</i>	40	7	5,4
4	<i>Opuntia f.-alumbre</i>	40	8	26,3
5	<i>Opuntia f.-alumbre</i>	45	7	5,1

6	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	45	8	11,5
7	<i>Moringa o.</i> -alumbre	35	7	7,04
8	<i>Moringa o.</i> -alumbre	35	8	4,8
9	<i>Moringa o.</i> -alumbre	40	7	5,96
10	<i>Moringa o.</i>-alumbre	40	8	2,5
11	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	7	15,8
12	<i>Moringa o.</i>-alumbre	45	8	1,7

Fuente: Autoría propia.

4.1.1 Eficiencia de turbidez.

Para los resultados de la turbidez de los tratamientos 3, 10 y 12 (ver Tabla 6), se procedió a verificar su eficiencia, las cuales se pueden observar en la Tabla 7.

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = \frac{\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} * 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ de remoción} = 98$$

$$\% \text{ de remoción} = 93,3$$

$$\% \text{ de remoción} = 95,5$$

Tabla 7. Eficiencia de los tratamientos 3, 10 y 12.

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Turbidez (UNT)	Eficiencia (%)
3	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	40	7	5,42	98
10	<i>Moringa o.</i> -alumbre	40	8	2,52	99.3
12	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	8	1,79	99.5

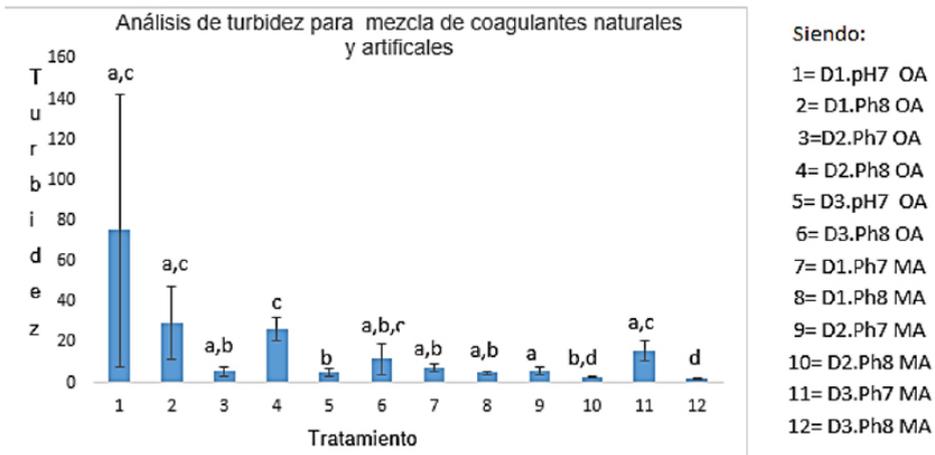
Fuente: Autoría propia.

En general, los resultados de la eficiencia fueron mayores a 95%; la combinación que presentó una mayor remoción de partículas suspendidas en el agua fue la mezcla de coagulantes *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio y pH 8, encontrándose dentro de los límites establecidos por la Resolución 2115 de 2007 (turbidez 2 UNT y pH 6,5 - 9).

Folkard y Sutherland (1996), en las pruebas que realizaron en la planta piloto en Malawi, observaron que, a pesar de que la *Moringa oleifera* dependía de la turbidez inicial del agua y que el alumbre se desempeñaba bien como coagulante solo en un ámbito restringido de pH, la *Moringa oleifera* se desempeñaba bien independientemente del pH del agua, confirmando sus hallazgos en esta parte de la investigación.

El análisis de varianza se determinó por una prueba T para las muestras independientes; este análisis, de manera general, reflejó diferencia significativa ($P < 0,05$) (Anexo I) entre las mezclas de coagulantes naturales y el sulfato de aluminio. Como lo determina la Gráfica 1, entre los tratamientos 10 y 12 no existen diferencias significativas y el nivel de remoción de partículas en estas muestras es representativo con respecto a los demás.

Gráfica 1. Análisis de turbidez para mezcla de coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio).



Fuente: Autoría propia.

4.2. Resultados de la absorbancia para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio

Los tratamientos mostrados en la Tabla 11 ratifican que los mejores resultados de absorbancia son las combinaciones de coagulantes 3, 10, 11 y 12;

los cuales presentan una relación directa con la disminución de turbidez (ver Tabla 6).

Tabla 8. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio).

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Absorbancia
1	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	35	7	0,092
2	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	35	8	0,072
3	<i>Opuntia f.</i>-alumbre	40	7	0,0026
4	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	40	8	0,115
5	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	45	7	0,056
6	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	45	8	0,0072
7	<i>Moringa o.</i> -alumbre	35	7	0,018
8	<i>Moringa o.</i> -alumbre	35	8	0,0316
9	<i>Moringa o.</i> -alumbre	40	7	0,018
10	<i>Moringa o.</i>-alumbre	40	8	0,0051
11	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	7	0,0054
12	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	8	0,0021

Fuente: Autoría propia.

4.2.1. Eficiencia de absorbancia.

Los resultados de la eficiencia arrojados por las absorbancias de los tratamientos 3, 10, 11 y 12 se observan en la Tabla 12. El cálculo se hizo en base a las condiciones iniciales del agua.

$$\% \text{ eficiencia de la absorbancia} = \frac{\text{absorbancia inicial} - \text{absorbancia final}}{\text{absorbancia inicial}} * 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ Eficiencia de absorbancia} = 98,9$$

$$\% \text{ Eficiencia de absorbancia} = 97,9$$

$$\% \text{ Eficiencia de absorbancia} = 97,8$$

$$\% \text{ Eficiencia de absorbancia} = 99$$

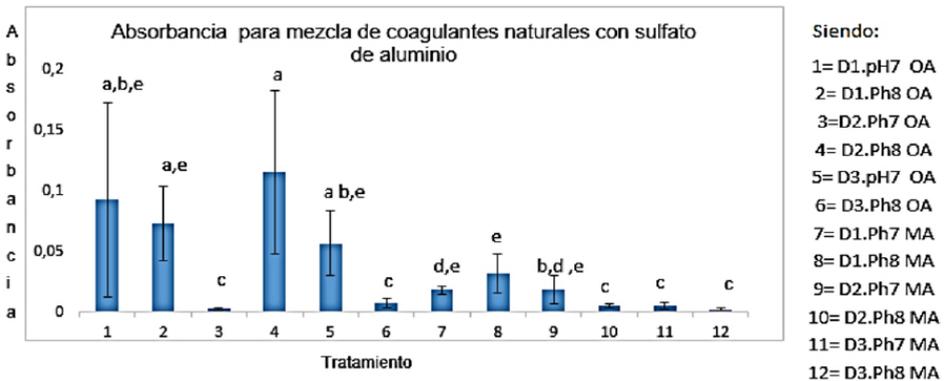
Tabla 9. Eficiencia de la absorbancia.

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Absorbancia	Eficiencia (%)
3	<i>Opuntia f.</i> -alumbre	40	7	0,0026	98,9
10	<i>Moringa o.</i> -alumbre	40	8	0,0051	97,9
11	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	7	0,0054	97,8
12	<i>Moringa o.</i> -alumbre	45	8	0,0021	99

Fuente: Autoría propia.

La eficiencia de las absorbancias es mayor a 95% en los cuatro tratamientos, pero la combinación de *Moringa oleifera* y alumbre con dosis de 40 ppm y pH 8 es la que tiene una eficiencia de 99%, concordando con los resultados de la turbidez encontrados en la Tabla 6. Esto quiere decir que, a medida que disminuye la turbidez en el agua, la absorbancia también disminuirá: son directamente proporcionales.

De acuerdo con el análisis de varianza para la absorbancia entre las mezclas de coagulantes naturales con sulfato de aluminio, de manera general se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) (Anexo L): los tratamientos con niveles de absorbancias más bajos (tratamientos 3, 10, 11, 12) tienen un comportamiento estadísticamente similar, como se observa en la Gráfica 2.

Gráfica 2. Análisis de absorbancia para mezcla de coagulantes naturales con sulfato de aluminio.

Fuente: Autoría propia.

En este caso, el tratamiento con concentración 45 ppm de la mezcla *Moringa oleifera* y alumbre con pH 8 (tratamiento 12) presentó un color más transparente, con gran cantidad de precipitado en el fondo del recipiente, lo cual se debe a que el sulfato de aluminio puede producir una reacción con los componentes químicos del agua, en especial con su alcalinidad, para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando, mientras que la absorción y neutralización de cargas son los principales mecanismos de coagulación presentes en el tratamiento de la *Moringa oleifera* en otras investigaciones.

4.3. Resultados de turbidez para mezcla entre los coagulantes naturales y sulfato de aluminio con agua.

Al verificar los resultados de los coagulantes de manera individual y observar la combinación entre *Opuntia ficus* y *Moringa oleifera*, se tiene que los resultados que más se acercan a los límites que exige la resolución 2115 de 2007 se encuentran en la Tabla 8. Los tratamientos más satisfactorios son los 1, 2, 4 y 6.

Tabla 10. Resultados de turbidez para mezcla entre coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio).

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Turbidez
1	<i>Alumbre-agua</i>	35	7	3,45
2	<i>Alumbre-agua</i>	35	8	2,62
3	<i>Alumbre-agua</i>	40	7	5,71
4	<i>Alumbre-agua</i>	40	8	1,02
5	<i>Alumbre-agua</i>	45	7	3,77
6	<i>Alumbre-agua</i>	45	8	3,35
7	<i>Moringa o.-agua</i>	35	7	58,41
8	<i>Moringa o.-agua</i>	35	8	92,3
9	<i>Moringa o.-agua</i>	40	7	39,65
10	<i>Moringa o.-agua</i>	40	8	71,06

11	<i>Moringa o.</i> -agua	45	7	125,86
12	<i>Moringa o.</i> -agua	45	8	127,75
13	<i>Opuntia f.</i> -agua	35	7	330,73
14	<i>Opuntia f.</i> -agua	35	8	382,15
15	<i>Opuntia f.</i> -agua	40	7	324,55
16	<i>Opuntia f.</i> -agua	40	8	335,85
17	<i>Opuntia f.</i> -agua	45	7	345,35
18	<i>Opuntia f.</i> -agua	45	8	345,65
19	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	35	7	66,62
20	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	35	8	132,25
21	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	40	7	77,67
22	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	40	8	103,38
23	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	45	7	60,17
24	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	45	8	130,21

Fuente: Autoría propia.

4.3.1 Eficiencia de turbidez.

Para los resultados de la turbidez de los tratamientos 1, 2, 4 y 6 (ver Tabla 8) se procedió a verificar su eficiencia los cuales se pueden observar en la Tabla 9.

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = \frac{\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} * 100 \quad (6)$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 99$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 99,2$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 99,7$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 99$$

El sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado a nivel mundial, lo cual se verifica en la Tabla 9. El tratamiento con resultados más cercanos a los límites en la resolución 2115 de 2007 fue el alumbre a 40 ppm y pH 8. Una de las problemáticas que causa el sulfato de aluminio es que es contaminante para el ambiente y produce repercusiones negativas en la salud humana; por esto, la base de nuestra investigación es buscar

mejores fuentes de clarificantes y verificar cuál es su eficiencia frente a los coagulantes artificiales, en comparación con investigaciones sobre la capacidad de los floclante de tres variedades de cactáceas — *Echinopsis pachanoi*, *Neoraimondia arequipensis* y *Opuntia ficus* — para tratar agua residual creada artificialmente. Las dosis aplicadas fueron 1%, 2% y 3% de coagulante de las tres variedades, respectivamente; los parámetros fisicoquímicos del agua tratada, como el pH, aumentaron ligeramente, de 6.61 del agua sin tratar a 7.58, mientras que la dureza y la alcalinidad no mostraron diferencia significativa. Entretanto, la DBO del agua con coagulante se incrementó con el porcentaje de aplicación (Choqueo et al., 2018).

Tabla 11. Eficiencia de los tratamientos 1, 2, 4 y 6.

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Turbidez (UNT)	Eficiencia (%)
1	Alumbre-agua	35	7	3,45	99
2	Alumbre-agua	35	8	2,62	99,2
4	Alumbre-agua	40	8	1,02	99,7
6	Alumbre-agua	45	8	3,35	99

Autoría propia.

Dentro de los resultados expuestos anteriormente, cabe destacar que los coagulantes naturales (específicamente en los tratamientos 7, 9, 19 y 23, como muestra la Tabla 10) ofrecen resultados de turbidez interesantes al compararlos con la turbidez inicial del agua (362 UNT), ya que se aprecia una disminución notoria en la remoción de partículas.

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = \frac{\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} * 100 \tag{7}$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 83,9$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 89$$

$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 81,6$$

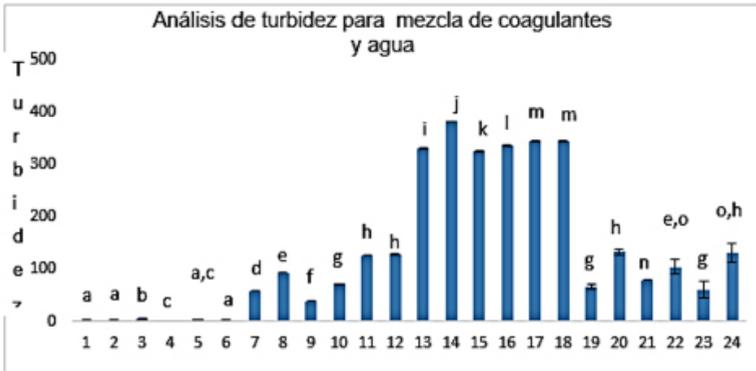
$$\% \text{ de remoción de turbidez} = 83,4$$

Tabla 12. Eficiencia de los coagulantes naturales.

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Turbidez	Eficiencia (%)
7	<i>Moringa o.</i> -agua	35	7	58,41	83,9
9	<i>Moringa o.</i> -agua	40	7	39,65	89
19	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	35	7	66,62	81,6
23	<i>Opuntia f.</i> - <i>Moringa o.</i>	45	7	60,17	83,4

Fuente: Autoría propia.

A pesar de que ninguno de estos tratamientos cumple con la norma colombiana, los coagulantes naturales mantienen un porcentaje de remoción de partículas constante entre 80 y 90%. El resultado con mayor eficiencia fue el uso de *Moringa oleifera* con dosis de 40 ppm y pH 7.

Gráfica 3. Análisis de turbidez para mezcla de coagulantes (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*, sulfato de aluminio) y agua.

1:D1.pH7 AA
 2:D1.pH8 AA
 3:D2.pH7 AA
 4:D2.pH8 AA
 5:D3.pH7 AA
 6:D3.pH8 AA
 7:D1.pH7 MA
 8:D1.pH8 MA
 9:D2.pH7 MA
 10:D2.pH8 MA
 11:D3.pH7 MA
 12:D3.pH8 MA
 13:D1.pH7 OA
 14:D1.pH8 OA
 15:D2.pH7 OA
 16:D2.pH8 OA
 17:D3.pH7 OA
 18:D3.pH8 OA
 19:D1.pH7 OM
 20:D1.pH8 OM
 21:D2.pH7 OM
 22:D2.pH8 OM
 23:D3.pH7 OM
 24:D3.pH8 OM

Fuente: Autoría propia.

4.4. Resultados de la absorbancia para mezcla entre coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio)

La Tabla 13 nos indica los resultados arrojados por el espectrofotómetro para el análisis de coagulantes de manera individual. Entre los más bajos, en cuanto a sulfato de aluminio, se encuentra el tratamiento 4, el cual tiene una absorbancia de 0,003 (98.7% de eficiencia); teniendo en cuenta los valores de los coagulantes naturales, la *Moringa oleifera* tuvo una absorbancia de 0,027 (88.7% de eficiencia), que es notablemente baja con respecto a los otros.

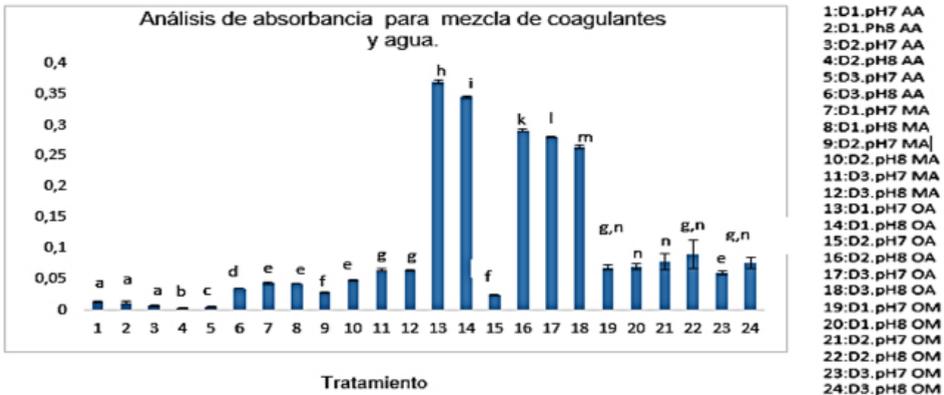
Tabla 13. Resultados de absorbancia para coagulantes naturales (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*) y artificiales (sulfato de aluminio).

No.	Tratamiento	Dosis (ppm)	pH	Absorbancia
1	<i>Alumbre-agua</i>	35	7	0,013
2	<i>Alumbre-agua</i>	35	8	0,012
3	<i>Alumbre-agua</i>	40	7	0,0081
4	<i>Alumbre-agua</i>	40	8	0,003
5	<i>Alumbre-agua</i>	45	7	0,0063
6	<i>Alumbre-agua</i>	45	8	0,0345
7	<i>Moringa o.-agua</i>	35	7	0,0428
8	<i>Moringa o.-agua</i>	35	8	0,0425
9	<i>Moringa o.-agua</i>	40	7	0,027
10	<i>Moringa o.-agua</i>	40	8	0,046
11	<i>Moringa o.-agua</i>	45	7	0,064
12	<i>Moringa o.-agua</i>	45	8	0,064
13	<i>Opuntia f.-agua</i>	35	7	0,36
14	<i>Opuntia f.-agua</i>	35	8	0,345
15	<i>Opuntia f.-agua</i>	40	7	0,023
16	<i>Opuntia f.-agua</i>	40	8	0,291
17	<i>Opuntia f.-agua</i>	45	7	0,281
18	<i>Opuntia f.-agua</i>	45	8	0,265
19	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	35	7	0,068

20	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	35	8	0,069
21	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	40	7	0,077
22	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	40	8	0,089
23	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	45	7	0,059
24	<i>Opuntia f.-Moringa o.</i>	45	8	0,075

Fuente: Autoría propia.

Gráfica 4. Análisis de absorbancia para mezcla de coagulantes (*Opuntia ficus*, *Moringa oleifera*, sulfato de aluminio) y agua.



Fuente: Autoría propia.

De acuerdo con el análisis estadístico, para las variables turbidez y absorbancia entre las mezclas de coagulantes y agua se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) (Anexo J y Anexo K, respectivamente). Según la Gráfica 2 y Gráfica 3, los tratamientos con niveles de turbidez y absorbancia más bajos corresponden al sulfato de aluminio. Cabe destacar que el tratamiento 9, que corresponde a la *Moringa oleifera* con una concentración de 40 ppm y un pH 7, en comparación con los otros tratamientos reflejó un nivel de remoción de turbidez mayor y se obtuvo un color más claro. Esto se debe, según Kwaambwa, Hellsing y Rennie (2010), a que el ingrediente activo de las semillas es una proteína que representa el 30-40% de su peso; de estas, hay al menos dos proteínas que podrían estar relacionadas. La proteína se absorbe sobre las partículas contaminantes, que entonces se agrupan y pueden ser así separadas y extraídas.

5. Conclusiones

- El análisis de los resultados obtenidos permitió establecer que, en las condiciones manejadas durante las pruebas de jarra, la mezcla de coagulantes *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio a 45 ppm y pH 8 alcanzó una eficiencia satisfactoria de 99.5% en cuanto a la variable de turbidez, y un 99.0 % en absorbancia.
- Usar una velocidad de 300 rpm favorece que el principio activo de los coagulantes esté en mayor contacto con las partículas suspendidas en el agua, mientras que a 60 rpm generaron flóculos más grandes y compactos, por lo cual precipitaron al fondo del recipiente.
- En cuanto a los resultados de los coagulantes de manera individual, el resultado de 1.2 NTU lo arroja el sulfato de aluminio a 40 ppm y pH 8, con una eficiencia de 99.7%, mientras que el resultado de la *Moringa oleifera* a 40 ppm y pH 7 fue de 39.65 NTU, con 89 % de eficiencia. La diferencia de eficiencias entre ambas mezclas es de 10%; la combinación entre los coagulantes químicos con la *Moringa oleifera* aumenta la eficiencia de los coagulantes en comparación a cuando son usados por separado, es decir, se observa un efecto sinérgico, ya que la combinación de ambos tiene en cuenta mecanismos de remoción complementarios.
- Al mezclar la *Moringa oleifera* con sulfato de aluminio a 45 ppm y pH 8, se obtuvo el mejor valor de los ensayos en cuanto a coagulantes naturales, con una turbidez de 1.7 NTU, que está por debajo de los límites en la resolución 2115 de 2007.

- Los coagulantes naturales no le confirieron ningún sabor, olor ni color extraños al agua; estos se mantuvieron herméticamente almacenados a temperatura ambiente durante quince días, lo que indica que el producto tiene una vida útil duradera.
- La obtención del coagulante en polvo a partir de la tuna se logró utilizando operaciones unitarias como secado, triturado, tamizado, las cuales no representaron un alto costo ni revistieron gran complejidad.

6. Recomendaciones

- Evaluar el efecto del pH en la remoción de turbidez y color, ya que este factor es muy importante en la práctica de la coagulación.
- Analizar las características fisicoquímicas de los coagulantes antes de iniciar el proceso de remoción de turbidez.
- Buscar procesos que permitan la extracción del principio activo de los coagulantes naturales con el fin de aumentar la eficiencia.
- Tomar agua de varias zonas del río Magdalena con el fin de garantizar un mejor muestreo para las pruebas.
- Realizar análisis al agua –considerando el color, sólidos totales, sólidos disueltos, dureza y conductividad– para saber con mayor precisión la eficiencia de los coagulantes naturales.
- Probar el desempeño de los coagulantes en la clarificación de aguas residuales, y en conjunto con los coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio.
- Después de realizar la coagulación, continuar los procesos de filtración y desinfección para así disminuir aún más la turbidez del agua y llegar al punto de aceptación por la Resolución 2115 de 2007.
- Aprovechar la eficiencia de los coagulantes naturales para su uso a gran escala en la industria de potabilización de aguas.

7. Referencias

- Acevedo, J. (2019). *Uso de semillas de moringa (Moringa oleífera) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de Río Negro, Río de Oro y Quebrada Floridablanca, Santander* (Trabajo de investigación). Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Abebe, L. S., Chen, X. y Sobsey, M. D. (2016). Chitosan Coagulation to Improve Microbial and Turbidity Removal by Ceramic Water Filtration for Household Drinking Water Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3), 269.
- Aguilar, L., Martínez, M., Barrientos, A. y Aguilar, N. (2007) Potencial de oscurecimiento enzimático de variedades de nopalitas. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 122-135.
- Aguirre, S., Piraneque, N. y Cruz, R. (2018). Sustancias naturales: Alternativa para el tratamiento de agua del río Magdalena en Palermo, Colombia. *Información tecnológica*, 29(3), 59-70.
- Almazán, J. E., Domínguez, R. M., Gutiérrez, D., Romero, E. M. y Rajal, V. B. (2018). Diferentes maneras de uso de un clarificante natural en procesos de potabilización de aguas turbias. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5(2), 33-37.
- Andía, Y. (2000) Tratamiento de agua. Coagulación y Floculación. (SEDA-PA, Ed.). Recuperado de <http://www1.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>

- Antov, M. G., Sibán, M. B., Adamovis, S. R. y Klasnja, M. T. (2007) Investigation of Isolation Conditions and Ion-Exchange. Purification of Protein Coagulation Components from Common Bean Seed. *APTEFT*, 38, 1-190.
- Aponte, L. y Cardona, C. (2009). *Educación ambiental y evaluación de la densidad poblacional para la conservación de los cóndores reintroducidos en el Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona amortiguadora* (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Arboleda, J. (1992) *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá, Colombia: Editorial Acodal.
- Arnal, J., García B., Fayos M., Fernández, J., García, G. Martín y García, A. (2006). AQUAPOT: Descripción del Centro de Investigación de Náquera (CIN). Apoyo en la aplicación de instalaciones de potabilización mediante tecnología de membranas. *X Congreso Internacional de Ingeniería*, 1430-1440.
- Asrafuzzaman, M. D., Fakhuruddin, A.N. y Hossain, M. D. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *International Scholarly Research. Network*, 1-6.
- ASTM (2003). "Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Tester of Water" (D2035-80). Recuperado en <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2035-80R03.htm>
- Bakour, M., Al-Waili, N., El-Haskoury, R., El-Menyiy, N., Al-Waili, T., Al-Waili, A. y Lyoussi, B. (2017) Comparison of Hypotensive, Diuretic and Renal Effects Between Cladodes of *Opuntia Ficus-Indica* and Furosemide. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(9), 900-906.
- Barreto, J. S., Vargas, D. K., Ruiz, L. E. y Gómez, S. L. (2019). Evaluación de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(1), 105-116.
- Beltrán, H. J., Sánchez, M. J, y Dávila, M. A. (2011). Optimization of the Synthesis of a New Coagulant from a Tannin Extract. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1704-1712 (2011).
- Bonilla, B. y Perea, H. (2019). *Evaluación del efecto de la harina de semilla de moringa como coadyudante en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de pelambre de una curtiembre en Bogotá*. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1132

- Brandt, M., Johnson, K., Elphinston, A. y Ratnayaka, D. (2018). *Twort's Water Supply: Seventh Edition. Chemistry, Microbiology and Biology of Water*. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books/tworts-watersupply/brandt/978-0-08-100025-0>
- Bravo, M. (2017). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales* (Trabajo de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Cárdenas Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. SEDPAL, 6-34
- Ceron, V. (2016). *Estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa Empoobando E.Sp.* (Trabajo de grado). Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
- Choqueo, C., Choqueo, Y., Solano R. y Pacheco. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298-309.
- Choy, S. Y., Prasad, K. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E. y Ramanan, R. N. (2016). Performance of Conventional Starches as Natural Coagulants for Turbidity Removal. *Ecological Engineering*, 94, 352-364.
- Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclorigenato de aluminio. *DYNA*, 78(165), 18-27.
- Decreto 1575 de 2007 [Ministerio de Salud y Protección Social]. Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano.
- Dempsey, B. (2006). Coagulant Characteristics and Reactions. En Newcombe, G.; Dixon, D. (eds.) *Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications* (pp. 5-8). Melbourne, Australia: Academic Press.
- Díaz, J. (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas* (Tesis de Maestría). Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, Pedro Sula Cortés, Honduras.

- Díaz, M., Peña, C., García, R., Arévalo, M., Calderón, G, y Anaya, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1) 31-51.
- Diestra, F. y Esquerre, P. (2019). *Efecto de la concentración de Aloe vera (sábila) y tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de aguas residuales municipales sector Cerrillo, Santiago de Chucó*. (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Echeverría, J. (2017). Empleo de semillas de *Moringa oleifera* en el tratamiento de residuales líquidos. *Revista de ingeniería hidráulica y ambiental*, 38(2), 87-101.
- Flórez, C. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio. *DYNA*, 78(165), 18-27.
- Folkard, G. y Sutherland, J. (1996). *Moringa oleifera*, un árbol con enormes potencialidades. *Agroforestería en las Américas*, 8(3), 5-8.
- Fuentes, N., Molina, E. J. y Ariza, C. P. (2016). Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Producción + Limpia*, 11(2), 41-54.
- García, S. A. (2005). Estudio de la eficiencia de la eliminación de radionúclidos naturales en procesos compatibles con el de potabilización de aguas (Trabajo de grado). Universidad de Extremadura, Extremadura, España.
- Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H. y Dalhammar, G. A. 2005. A Simple Purification and Activity Assay of the Coagulant Protein From *Moringa Oleifera* Seed. *Water Research*, 39, 2338-2344.
- Gómez, K. (2010). *Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa oleifera en el tratamiento de agua con baja turbidez* (Proyecto de investigación). Universidad Zamorano, Zamorano, Honduras.
- Goycoolea, F. y Cárdenas, A. (2004). Pectins from *Opuntia* spp.: A Short Review. *J. Profess. Assoc. Cactus Develop*, (5), 17-29.
- Guzmán, L., Tarón, A. y Núñez, A. (2007). *Utilización del polvo de semilla de cañafistula (Cassia fistula) como agente coagulante natural en el tratamiento de agua potable* (Trabajo de grado). Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.

- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C. y García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253-262.
- Joshi, J. y Sahju, O. (2014). Azadirachta Indica Leaves as Antibacterial Treatment on Drinking Water. *International Journal of Clinical Nutrition*, 2(2), 36-40.
- Kakoi, B., Kaluli, J. W., Ndiba, P. y Thiong'o, G. (2016). Banana Pith as a Natural Coagulant for Polluted River Water. *Ecological Engineering*, 95, 699-705.
- Kebaili, M., Djellali, S., Radjai, M., Drouiche, N. y Lounici, H. (2018). Valorization of Orange Industry Residues to Form a Natural Coagulant and Adsorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 64, 292-299.
- Kim, S., Moon, B. y Lee, H. (2001). Effects of pH and Dosage on Pollutant Removal and Floc Structure During Coagulation. *Microchemical Journal*, 68, 197-203.
- Kukić, D. V., Šćiban, M. B., Prodanović, J. M., Tepić, A. N. y Vasić, M. A. (2015). Extracts of Fava Bean (*Vicia faba* L.) Seeds as Natural Coagulants. *Ecological Engineering*, 84, 229-232.
- Kwaambwa, H., Hellsing, M. y Rennie, A. (2010). Adsorption of a Water Treatment Protein from *Moringa oleifera* Seeds to a Silicon Oxide Surface Studied by Neutron Reflection. *Langmuir*, 26(6), 3902-3910.
- Lédo, P., Lima, R., Paulo, J. y Duarte, M. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillas de *Moringa oleifera* para la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad. *Información tecnológica*, 20(5), 3-12.
- Martel, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. En Cánepa, L. (ed.). *Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría - Tomo I. Coagulación* (pp. 152-223). Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- Martín, C., García, G., Fernández, A., Hernández, T. y Jürgen, P. (2013). Potenciales aplicaciones de *Moringa oleifera*. Una revisión crítica. *Pastos y Forrajes*, 36(2), 174-178; 196-198.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. y Sillanpää, M. (2010). Natural Organic Matter Removal by Coagulation During Drinking Water Treatment: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 159, 189-197.

- Matsuhiro, B., Lillo, L., Sáenz, C., Urzúa, C. y Zárata, O. (2006). Chemical Characterization of the Mucilage from Fruits of *Opuntia Ficus-Indica*. *Carbohydrate Polymer*, 63, 263-267.
- Medina, L., Brito, E.; Torrestiana, B. y Katthain, R. (2000). Rheological Properties of the Mucilage Gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocoll*, 14, 417-424.
- Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A. y 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.
- MINAE y MINSa (2007). *Reglamento para la Evaluación y Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales de Costa Rica*. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos74387.pdf>
- Morales J. (2018). *Determinación del poder coagulante de la sábila para la remoción de turbidez en el proceso de tratamiento de agua para consumo humano - Oxapampa* (Trabajo de grado). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú.
- Muyubi, S. A. y Evinson, L. M. (1995). Optimizing Physical Parameters Affecting Coagulation of Turbid Water with *Moringa oleifera* seeds. *Wat. Res.*, 29(12), 2689- 2695.
- OMS (2016) Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/
- Orobio, A., Osorio, V., Rodríguez, N., Ramírez, N., León, L., Hernández, N. y Hurtado, L. (2017). Problemas y desafíos que afronta Colombia respecto a la salud ambiental, un enfoque basado en el plan decenal de Salud. *Biociencias*, 1(1).
- Özacar, M. y Sengil, I. A. (2000). Effectiveness of Tannins from *Valonia* as a Coagulant Aid for Dewatering of Sludge. *Wat. Res.* 34(4), 1407-1412.
- Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. G. y Kululanga, G. (2009). Potential of Using Plant Extracts for Purification of Shallow Well Water in Malawi. *Phys. Chem. Earth*, 34, 799-805.
- Ramírez, A, H. y Jaramillo P. (2016). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153.

- Ramírez, A. H. y Jaramillo, J. (2014) Uso potencial de agentes clarificantes y desinfectantes de origen natural para el tratamiento integral del agua caracterizado por pisos térmicos. *Revista ingeniería solidaria*, 10(17), 139-151.
- Ramos, D. y Smit, F. (2019). *Efecto de la concentración de Aloe vera (sábila) y tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de aguas residuales municipales sector el Cerrillo, Santiago de Chuco* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Peru.
- Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales Decreto N° 33903 del 9 de marzo 2007.
- Resoluciones 2115 de 2007. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
- Resolución 811 de 2008. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución.
- Resolución 82 de 2009. [Ministerio de la Protección Social]. Por medio de la cual se adoptan unos formularios para la práctica de visitas de inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano. D. O. No. 47.262.
- Resolución 330 de 2017 [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.
- Riaños, K., Meza, M. y Mercado, I. (2019). Clarificación del agua de un humedal usando una mezcla de coagulantes naturales. *DYNA*, 86(209), 73-78.
- Rigola, M. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.
- Rivas, M. (1998). *Cactáceas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: EUNED.

- Rodier, J. (1989) *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona, España: Omega.
- Romero, J. (2000). Calidad del agua. *Escuela Colombiana de Ingeniería*, 452-468.
- Saag, L. Sanderson, G., Moyna, P. y Ramos, G. (1975). Cactasea Mucilage Composition. *J. Sci. Food Agr.*, 26, 993-1000.
- Šćiban, M. B., Klačnja, M. T. y Stojimirović, J. L. (2005). Investigation of Coagulation Activity of Natural Coagulants from Seeds of Different Leguminose Species. *Apteff*, 36, 81-87.
- Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M. y Škrbić, B. (2009). Removal of Water Turbidity by Natural Coagulants Obtained from Chestnut and Acorn. *Bioresour-ce Technology*, 100(24), 6639-6643.
- Šćiban, M., Klačnja, M. y Stojimirovic, J. (2005). Investigation of Coagulation Activity of Natural Coagulants from Seeds of Different Leguminose Species. *Acta Periodica Technol*, 36, 81-87.
- Seguridad industrial (2011). "Esquema de purificación del agua". Recuperado de <http://espseguridadindustrial.blogspot.com/2011/11/esquema-de-purificacion-del-agua.html>
- Smida, A., Ncibi, S., Taleb, J., Ben Saad, A., Ncib, S. y Zourgui, L. (2017) Immunoprotective Activity and Antioxidant Properties of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Extract Against Chlorpyrifos Toxicity in Rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 88, 844-851.
- Trachtenberg, S. H. y Mayer, A. (1981). Calcium Oxalate Crystals in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: Development and Relation to Mucilage Cells. A Stereological Analysis. *Protoplasma*, 109, 271-283.
- Vásquez, O. (1994). *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Vidal, L. y Hernández, V. (2014) Medición de la absorbancia óptica de soluciones acuosas mediante la instrumentación virtual y el control. *Scientia et Technica*, 19(1), 49-53.
- Yin, C. Y. (2010). Emerging Usage of Plant-Based Coagulants for Water and Wastewater Treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437-1444.

Yuan, B., Huang, X., Zhou, J., Cai, J., Yang, H., Li, A., Cheng, R. (2012). Evaluation of the Flocculation Performance of Carboxymethyl Chitosan-Graft-Polyacrylamide, a Novel Amphoteric Chemically Bonded Composite Flocculant. *Yang Water Research*, 46(1), 107-114.

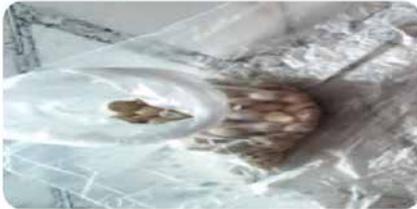
8. Anexos

Anexo A. Procesamiento de la *Opuntia ficus*.



Fuente: Autoría propia.

Anexo B. Proceso de adecuación de la *Moringa oleifera*.



Fuente: Autoría propia.

Anexo C. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes *Opuntia ficus* y alumbre.

DÍA 1					
Tratamiento	Dosis	pH	Turbidez 1	Turbidez 2	Turbidez 3
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	35	7	1,7	1,73	1,72
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	35	7	11,7	11,67	11,7
<i>Opuntia f.</i> - alumbre (30-70)	35	7	212	212,1	212,2
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	40	7	1,6	1,3	1,6
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	40	7	5,43	5,39	5,4
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	40	7	9,47	9,48	9,45
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	45	7	1,46	1,45	1,45
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	45	7	6,23	6,26	6,26
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	45	7	7,64	7,64	7,64

<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	35	8	10,1	10,3	10,3
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	35	8	65,9	65,86	65,84
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	35	8	11,9	11,92	11,93
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	40	8	17,2	17,23	17,22
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	40	8	24,74	24,75	24,74
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	40	8	37,11	37,14	37,14
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	45	8	3,36	3,39	3,38
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	45	8	3,61	3,63	3,62
alumbre (30-70)	45	8	27,6	27,59	27,6

Fuente: Autoría propia.

Anexo D. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes *Moringa oleifera* y alumbre.

DÍA 2					
Tratamiento	Dosis	pH	Turbidez 1	Turbidez 2	Turbidez 3
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	35	7	4,95	4,94	4,93
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	35	7	5,52	5,51	5,51
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	35	7	10,9	10,92	10,92
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	40	7	9,8	9,82	9,81
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	40	7	2,96	2,95	2,95
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	40	7	5,13	5,16	5,14
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	45	7	25,8	25,82	25,81
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	45	7	11,8	11,83	11,82
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	45	7	10,4	10,4	10,1
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	35	8	6,21	6,23	6,22
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	35	8	3,53	3,51	3,52
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	35	8	4,82	4,80	4,80
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	40	8	3,07	3,03	3,06
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	40	8	3,12	3,11	3,11
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	40	8	1,42	1,42	1,43
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	45	8	2,11	2,10	2,11
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	45	8	1,78	1,76	1,77
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	45	8	1,54	1,53	1,53
Alumbre-agua	35	7	3,45	3,46	3,45
Alumbre-agua	40	7	5,70	5,71	5,72
Alumbre-agua	45	7	3,77	3,77	3,76
Alumbre-agua	35	8	2,67	2,61	2,65
Alumbre-agua	40	8	1,00	1,02	1,01
Alumbre-agua	45	8	3,34	3,35	3,33
<i>Opuntia f.</i> -agua	35	7	330	330,3	330,5
<i>Opuntia f.</i> -agua	40	7	324	324	324

Fuente: Autoría propia.

Anexo E. Resultados de turbidez para mezcla de coagulantes *Opuntia ficus* y *Moringa oleifera*.

DÍA 3					
Tratamiento	Dosis	pH	Turbidez 1	Turbidez 2	Turbidez 3
<i>Opuntia f.-Moringa o.</i> (40-60)	35	7	70,7	70,3	70,3
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	35	7	62,9	62,2	62,3
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	40	7	77,6	77,9	99,5
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	40	7	77,7	77,5	77,3
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	45	7	43,6	43,7	43,7
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	45	7	76,6	76,9	76,6
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	35	8	139	139,5	139,4
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	35	8	125	125,6	125,3
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	40	8	86,6	86,6	86,2
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	40	8	120	120,3	120,2
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	45	8	150	150,2	150,1
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	45	8	110	110,7	110,3
<i>Moringa o.-agua</i>	35	7	58,2	58,3	58,3
<i>Moringa o.-agua</i>	40	7	39,8	39,5	39,4
<i>Moringa o.-agua</i>	45	7	125	125,4	125
<i>Moringa o.-agua</i>	35	8	92,4	92,1	92
<i>Moringa o.-agua</i>	40	8	70,9	70,6	70,3
<i>Moringa o.-agua</i>	45	8	128	128,1	128,2
<i>Opuntia f.-agua</i>	45	7	344	344,8	344,4
<i>Opuntia f.-agua</i>	35	8	382	382,1	382,1
<i>Opuntia f.-agua</i>	40	8	336	336,9	336,6
<i>Opuntia f.-agua</i>	45	8	345	345,6	345,2

Fuente: Autoría propia.

Anexo F. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes *Opuntia ficus* y sulfato de aluminio.

DÍA 1					
Tratamiento	Dosis	pH	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	35	7	0,005	0,004	0,005
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	35	7	0,019	0,017	0,018
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	35	7	0,253	0,255	0,256
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	40	7	0,002	0,001	0
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	40	7	0,005	0,003	0,004
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	40	7	0,002	0,004	0,003
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	45	7	0,002	0,01	0,01
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	45	7	0,011	0,003	0,005
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	45	7	0,006	0,017	0,02
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	35	8	0,018	0,073	0,072
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	35	8	0,075	0,127	0,125
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	35	8	0,128	0,248	0,245
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	40	8	0,247	0,082	0,082
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	40	8	0,084	0,018	0,015
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (10-90)	45	8	0,003	0,002	0,005
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (20-80)	45	8	0,001	0	0,001
<i>Opuntia f.</i> -alumbre (30-70)	45	8	0,002	0,002	0,003

Fuente: Autoría propia.

Anexo G. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio.

DÍA 2					
Tratamiento	Dosis	pH	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	35	7	0,021	0,02	0,022
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	35	7	0,021	0,022	0,021
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	35	7	0,012	0,01	0,013
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	40	7	0,002	0,001	0
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	40	7	0,005	0,003	0,004
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	40	7	0,002	0,004	0,003
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	45	7	0,001	0,002	0,001
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	45	7	0,01	0,01	0,011
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	45	7	0,003	0,005	0,006
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	35	8	0,017	0,013	0,015
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	35	8	0,018	0,01	0,017
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	35	8	0,067	0,065	0,063
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	40	8	0,007	0,005	0,003
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	40	8	0,003	0,005	0,002
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	40	8	0,007	0,009	0,005
<i>Moringa o.</i> -alumbre (10-90)	45	8	0,003	0,002	0,004
<i>Moringa o.</i> -alumbre (20-80)	45	8	0,016	0,015	0,014
<i>Moringa o.</i> -alumbre (30-70)	45	8	0,004	0,005	0,002

Fuente: Autoría propia

Anexo H. Resultados de absorbancia para mezcla de coagulantes *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus*.

DÍA 3					
Tratamiento	Dosis	pH	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	35	7	0,063	0,065	0,066
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	35	7	0,074	0,073	0,071
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	40	7	0,093	0,09	0,095
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	40	7	0,061	0,063	0,064
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	45	7	0,06	0,064	0,062
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	45	7	0,058	0,056	0,059
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	35	8	0,076	0,074	0,075
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	35	8	0,066	0,063	0,065
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	40	8	0,063	0,062	0,064
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	40	8	0,114	0,115	0,118
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (40-60)	45	8	0,084	0,086	0,087
<i>Opuntia f.- Moringa o.</i> (60-40)	45	8	0,067	0,065	0,066

Fuente: Autoría propia.

Anexo I. Análisis de varianza para la turbidez en la mezcla de coagulantes *Opuntia ficus*, *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio.

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
D1.pH7 OA	9	676,55	75,17222222	10570,13877
D1.pH8 OA	9	263,86	29,31777778	752,3840194
D2.pH7 OA	9	48,85	5,42777778	12,18804444
D2.pH8 OA	9	237,26	26,36222222	75,78874444
D3.pH7 OA	9	46	5,111111111	7,874536111
D3.pH8 OA	9	103,8	11,53333333	145,213425
D1.pH7 MA	9	63,38	7,042222222	7,521719444
D1.pH8 MA	9	43,66	4,851111111	1,367761111
D2.pH7 MA	9	53,68	5,964444444	9,235102778
D2.pH8 MA	9	22,73	2,525555556	0,688802778
D3.pH7 MA	9	142,65	15,85	53,91735
D3.pH8 MA	9	16,18	1,797777778	0,064469444

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	42523,5	11	3865,769081	3,986567819	8,6523E-05	1,889800449
Dentro de los grupos	93091,1	96	969,698562			
Total	135615	107				

Fuente: Autoría propia.

Anexo J. Análisis de varianza para el factor pH.

ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR				
RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
D1.pH7 AA	6	20,74	3,456666667	0,00010667
D1.pH8 AA	6	15,72	2,62	0,00064
D2.pH7 AA	6	34,27	5,711666667	0,00013667
D2.pH8 AA	6	6,13	1,021666667	0,00029667
D3.pH7 AA	6	22,622	3,770333333	0,00011427
D3.pH8 AA	6	20,15	3,358333333	0,00033667
D1.pH7 MA	6	350,51	58,41833333	0,08409667
D1.pH8 MA	6	553,8	92,3	0,012
D2.pH7 MA	6	237,9	39,65	0,019
D2.pH8 MA	6	426,4	71,06666667	0,50666667
D3.pH7 MA	6	755,2	125,8666667	0,53466667
D3.pH8 MA	6	766,5	127,75	0,627
D1.pH7 OA	6	1984,4	330,7333333	0,69866667
D1.pH8 OA	6	2292,9	382,15	1,955
D2.pH7 OA	6	1947,3	324,55	1,455
D2.pH8 OA	6	2015,1	335,85	2,227
D3.pH7 OA	6	2072,1	345,35	1,631
D3.pH8 OA	6	2073,9	345,65	2,719
D1.pH7OM	6	399,74	66,62333333	18,8127067
D1.pH8 OM	6	793,5	132,25	58,583
D2.pH7 OM	6	466,04	77,67333333	0,01850667
D2.pH8 OM	6	620,32	103,3866667	337,891467
D3.pH7 OM	6	361,04	60,17333333	328,033707
D3.pH8 OM	6	781,3	130,2166667	476,065667

Fuente: Autoría propia.

Anexo K. Análisis de varianza para la turbidez en la mezcla de coagulantes *Opuntia ficus*, *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio con agua.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2422301,077	23	105317,4381	2051,84529	1,7723E-144	1,61965543
Dentro de los grupos	6159,378905	120	51,32815754			
Total	2428460,456	143				

Fuente: Autoría propia.

Anexo L. Análisis de varianza para la absorbancia en la mezcla de coagulantes *Opuntia ficus*, *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio.

ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
D1.pH7 OA	9	0,832	0,092444444	0,014837028		
D1.pH8 OA	9	0,655	0,072777778	0,002202444		
D2.pH7 OA	9	0,024	0,002666667	0,0000025		
D2.pH8 OA	9	1,038	0,115333333	0,0105205		
D3.pH7 OA	9	0,508	0,056444444	0,001647778		
D3.pH8 OA	9	0,065	0,007222222	3,51944E-05		
D1.pH7 MA	9	0,162	0,018	2,35E-05		
D1.pH8 MA	9	0,285	0,031666667	0,00063175		
D2.pH7 MA	9	0,166	0,018444444	0,000322528		
D2.pH8 MA	9	0,046	0,005111111	5,11111E-06		
D3.pH7 MA	9	0,049	0,005444444	1,62778E-05		
D3.pH8 MA	9	0,019	0,002111111	2,11111E-06		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	<i>Probabilidad</i>	Valor crítico para F
Entre grupos	0,151877139	11	0,013807013	5,477755583	1,00835E-06	1,889800449
Dentro de los grupos	0,241973778	96	0,00252056			
Total	0,393850917	107				

Fuente: Autoría propia.

Anexo M. Análisis de varianza para la absorbancia en la mezcla de coagulantes *Opuntia ficus*, *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio.

ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
D1.pH7 AA	6	0,08	0,013333333	3,86667E-06		
D1.pH8 AA	6	0,074	0,012333333	5,46667E-06		
D2.pH7 AA	6	0,049	0,008166667	2,16667E-06		
D2.pH8 AA	6	0,018	0,003	0,0000028		
D3.pH7 AA	6	0,038	0,006333333	1,46667E-06		
D3.pH8 AA	6	0,207	0,0345	7E-07		
D1.pH7 MA	6	0,257	0,042833333	4,16667E-06		
D1.pH8 MA	6	0,255	0,0425	1,1E-06		
D2.pH7 MA	6	0,162	0,027	0,000002		
D2.pH8 MA	6	0,281	0,046833333	2,16667E-06		
D3.pH7 MA	6	0,384	0,064	6,8E-06		
D3.pH8 MA	6	0,385	0,064166667	1,36667E-06		
D1.pH7 OA	6	2,217	0,3695	8,3E-06		
D1.pH8 OA	6	2,071	0,345166667	6,56667E-06		
D2.pH7 OA	6	0,142	0,023666667	4,26667E-06		
D2.pH8 OA	6	1,751	0,291833333	5,36667E-06		
D3.pH7 OA	6	1,686	0,281	4,8E-06		
D3.pH8 OA	6	1,59	0,265	9,2E-06		
D1.pH7 OM	6	0,412	0,068666667	2,10667E-05		
D1.pH8 OM	6	0,419	0,069833333	3,33667E-05		
D2.pH7 OM	6	0,466	0,077666667	0,000273467		
D2.pH8 OM	6	0,536	0,089333333	0,000834267		
D3.pH7 OM	6	0,359	0,059833333	8,16667E-06		
D3.pH8 OM	6	0,455	0,075833333	0,000117367		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor critico para F
Entre grupos	1,820706639	23	0,079161158	1396,687755	1,7176E-134	1,61965543
Dentro de los grupos	0,006801333	120	5,66778E-05			
Total	1,827507972	143				

Fuente: Autoría propia.

Los autores

Rafael Enrique Olivero Verbel. Es ingeniero de alimentos de la Universidad de Cartagena, magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos y candidato a doctor en Ciencias. Sus principales áreas de investigación son la Ciencia y Tecnología de Alimentos y la Gestión de Calidad. Actualmente se desempeña como docente investigador del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad del Atlántico, donde ha trabajado en varias investigaciones sobre clarificantes naturales.

Glenda Paola Villegas de Agua. Profesional en Ingeniería Agroindustrial con conocimientos en Sistemas de Gestión de Calidad, experiencia como supervisora SGI en Servicios de Alimentación, conocimiento en industrias manufactureras y de grandes superficies, como centros de distribución fruver en un reconocido supermercado de Colombia. Cuenta con experiencia en enfoque de calidad directamente al producto, indicadores de merma, devoluciones, recuperaciones e investigación de mercados.

Luis Miguel Vega Felizzola. Profesional egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico, específicamente del programa de Ingeniería Agroindustrial. Se ha desempeñado como supervisor SGI para Vianda S. A., en donde adquirió experiencias profesionales significativas en procesos, manejo de personalidad y calidad. Posteriormente, se desempeñó como jefe de producción para la planta de aprovechamiento 970 en un supermercado de gran superficie, en el cual adquirió profundos conocimientos sobre procesos agroindustriales y desarrollo de productos, lo que lo llevó a ocupar el cargo de administrador del Área de Perecederos.

