

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Revisión del uso de coagulantes naturales para remoción de turbidez de agua

Por:

Gabi Jasmin Canaza Chicasaca

Yasel Mamani Condori

Asesor:

MSc. Jael Calla Calla

Juliaca, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo Jael Calla Calla, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: "REVISIÓN DEL USO DE COAGULANTES NATURALES PARA REMOCIÓN DE TURBIDEZ DE AGUA" constituye la memoria que presentan los estudiantes Gabi Jasmin Canaza Chicasaca y Yasel Mamani Condori para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 04 días del mes de septiembre del año 2020.



MSc. Jael Calla Calla
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 06 día(s) del mes de agosto del año 2020, siendotas 15:30 horas,

se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, bajo la dirección del Jefe de la

presidencia(a): Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

secretario(a): Ing. Verónica Maydee Pari Mamani y los demás miembros:

Ing. Rony Daniel Diaz Aguilar

y el(ia) asesor(a) Msc. Jael Lalla Lalla

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado: *Revisión del uso de coagulantes naturales para remoción de turbidez de agua*

de los (las) egresados (as): a) Gabi Tasmín Lanaza Lhicasaca

b) Yasel Mamani Londeri

conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en

Ingeniería Ambiental
(Determinación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando a los candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por los candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a) Gabi Tasmín Lanaza Lhicasaca

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Buena	Muy Buena

Candidato/a (b) Yasel Mamani Londeri

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Buena	Muy Buena

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó a los candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Revisión del uso de coagulantes naturales para remoción de turbidez de agua

Canaza Chicasaca Gabi Jasmin ^{a*}, Mamani Condori Yasel ^a, Calla Calla Jael ^a

^aFacultad de Ingeniería y Arquitectura EP. Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión

Resumen

La escasez de agua potable en países de desarrollo representa un problema cada día más grande, por lo que es necesario buscar nuevas y eficientes alternativas de desarrollo y tecnologías sustentables, principalmente para la remoción de la turbidez del agua, en el proceso de coagulación, que brinden la posibilidad de mejorar la calidad del agua que sea de fácil acceso, inocuas para la salud humana y amigable con el medio ambiente. El objetivo del presente trabajo de investigación es identificar los coagulantes naturales y su eficiencia en la remoción de turbidez del agua, por medio de la revisión de investigaciones realizadas. Los resultados de los estudios encontrados demuestran que existen coagulantes naturales capaces de remover la turbiedad con buena eficiencia. Se concluye que se encontraron seis coagulantes naturales clasificados en extractos vegetales (*Opuntia ficus-indica*, *Moringa oleifera*, *Aloe vera*, *Tamarindus indica* y *Caesalpinia spinosa*), y el otro agente de origen animal (*chitosano*). En cuanto a la eficiencia, se concluye que el coagulante natural de *Moringa oleifera* fue el más eficiente en comparación con los otros coagulantes identificados en esta revisión, debido a que contienen aminoácidos polares con carga positiva y negativa, que interactúan con las partículas coloidales responsables de la turbidez y el color durante el proceso de clarificación de las aguas, contribuyendo así a su eliminación.

Palabras clave: Coagulantes naturales; turbiedad; clarificación de aguas; coagulación; floculación.

Abstract

The shortage of drinking water in developing countries represents a problem every day greater, so it is necessary to look for new and efficient alternatives for development and sustainable technologies, mainly to remove turbidity from the water for human consumption, in the coagulation process, which provide the possibility of improving the quality of water that is easily accessible, harmless to human health and friendly to the environment. The objective of this research work is to identify natural coagulants and their efficiency in removing turbidity from water, by reviewing the research carried out. The results of the studies show that there are natural coagulants capable of removing turbidity with good efficiency. It is concluded that six natural coagulants classified in plant extracts were found (*Opuntia ficus-indica*, *Moringa oleifera*, *Aloe vera*, *Tamarindus indica* and *Caesalpinia spinosa*), and the other agent of animal origin (chitosan). Regarding efficiency, it is concluded that the natural coagulant of *Moringa oleifera* was the most efficient in comparison with the other coagulants identified in this review, due to the fact that they contain polar amino acids with positive and negative charges, which interact with the colloidal particles responsible for turbidity and color during the water clarification process, thus contributing to its elimination.

Key words: Natural coagulants; turbidity; water clarification; coagulation; flocculation.

1. Introducción

La reciente preocupación por la contaminación ambiental y la importancia de preservar el agua, ha dado como resultado el aumento en la investigación y el desarrollo de tecnologías sustentables, principalmente para la remoción de la turbidez, en el proceso de coagulación/floculación. La turbidez del agua es uno de los parámetros más relevantes en el control de la calidad del agua para consumo humano, es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia, debido a la presencia de partículas en suspensión. Los parámetros que influyen en la turbidez del agua son microorganismos, algas, sedimentos procedentes de la erosión, descarga de efluentes, escorrentía urbana, etc. (Gonzales, 2011).

Singh (1989), describe que el 80% del deterioro de la calidad del agua, se debe a sedimentos suspendidos, en su mayoría provenientes de la erosión de suelos como producto de presencia de urbanizaciones, deforestación, actividades agrícolas y ganaderas, siendo este tipo de actividades las que mayor impacto causan la turbidez del agua.

El proceso de clarificación del agua cruda contempla un tratamiento fisicoquímico, conocido como coagulación y floculación. La coagulación, se define como la adición de sustancias químicas y la provisión de mezcla, para que las partículas y algunos contaminantes disueltos se aglutinen en partículas más grandes que se puedan retirar mediante procesos de remoción de sólidos (Dempsey, 2006). Su aplicación incluye la remoción de especies químicas disueltas y la turbiedad del agua por adición de coagulantes químicos convencionales; además, la coagulación/floculación es un paso fundamental en el proceso de tratamiento del

agua, no solamente porque remueve las partículas responsables de la turbiedad producida por las partículas suspendidas y por el material coloidal, sino, porque también remueve los microorganismos que, a menudo se adhieren a las partículas (Antov, 2010); sin embargo, existen desventajas asociadas al uso de estos coagulantes, como altos costos de adquisición (Castellanos, 2017). También existe evidencias que el insumo más utilizado para este proceso es el sulfato de aluminio, este producto al ser ingerido en grandes cantidades ocasiona enfermedades como el Alzheimer en los seres humanos. Teniendo en cuenta esta situación proponemos el uso de los coagulantes naturales en el tratamiento del agua. Hay una gran variedad de estos coagulantes que han sido utilizados para clarificar el agua en los cuales fueron eficientes (Feria & Bermúdez, 2014; Sandoval & Laines, 2013). Estos polímeros han sido usados en diferentes países como: Perú, Colombia, Ecuador, Venezuela y entre otros para la remoción de turbiedad del agua (Carrasquero et al., 2017; Mendoza & Fernandez, 2000). Por otro lado, las eficacias de los coagulantes naturales reducen el costo y uso de los coagulantes químicos; así mismo, la posibilidad de reducir los riesgos sobre la salud debido al aluminio residual que contiene el agua potable.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo identificar los coagulantes naturales y su eficiencia en la remoción de turbiedad del agua, por medio de la revisión de investigaciones realizadas.

2. Fundamento teórico

2.1. Clarificación del agua

La clarificación es una etapa trascendental en la potabilización del agua cruda que incluye el proceso de coagulación-floculación en el cual las partículas presentes en el agua se aglomeran formando pequeños gránulos con un peso específico mayor, de esta forma las partículas sedimentan y ocurre la remoción de los materiales en suspensión, lo que permite que el agua alcance las características físicas y organolépticas aptas para el consumo humano según las normas y estándares de salud pública. (Rodríguez & Garcia, 2002).

2.2. Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (Andia, 2000).

2.2.1. Coagulantes químicos

Entre los principales coagulantes químicos utilizados para desestabilizar las partículas y producir los floculos son: sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, polielectrolitos (como ayudantes de floculación). Siendo los más utilizados las sales de aluminio y de hierro (Andia, 2000).

2.2.2. Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, desestabilizando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbiedad inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades (Ganjidoust, 1997).

2.3. Factores que influyen en la coagulación

2.3.1. Turbidez

La turbiedad es una medida indirecta de la cantidad de partículas coloidales en suspensión de una muestra de agua. Estas partículas pueden provenir de los procesos erosivos ocasionados por deforestación en la cuenca hidrográfica o por el arrastre de sedimentos del cauce de la corriente, así como por la presencia excesiva de microorganismos o por la influencia de vertidos domésticos, industriales o agropecuarios. El nivel de turbiedad se expresa en UNT y se mide en un equipo llamado turbidímetro (Lozano & Lozano, 2015). La norma peruana para el recurso hídrico establece que para ser aceptable para el consumo humano este parámetro debe ser menor a 5 NTU, por ello este líquido siempre que sea sometido a tratamientos de desinfección, la turbiedad debe ser baja, para que el proceso sea eficaz (Vela, 2016).

2.3.2. Color

Las coloración de las aguas se dan debido a la presencia de iones metálicos naturales (Fe y Mn), humus, materia orgánica y contaminantes domésticos e industriales (Rodier, 1989). Las unidades de medición del color son las unidades de Platino Cobalto (UPC) o, simplemente, Unidades de color (UC). Se mide usualmente con equipos llamados colorímetros o fotómetros. Si no se han removido partículas en suspensión (turbiedad) de la muestra, haciéndola pasar por un papel filtro de 0,45 micras de poro, la

medida de color será color aparente; si la turbiedad se remueve antes, la medida será color verdadero. El color no deberá sobrepasar de las 15 UPC en aguas para consumo (Lozano & Lozano, 2015).

2.3.3. *pH*

El pH es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, por medio del cálculo del número iones hidrogeno presentes. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. En el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, aprobado con DS N° 031-2010-SA. del 2010, se establece que el límite máximo permisible del pH se debe encontrar en el rango de 6.5 a 8.5 en aguas para consumo humano (MINSA, 2011).

2.3.4. *Alcalinidad*

Es un método de análisis, con el que se determina el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos de un agua natural o tratada. La alcalinidad tiene relación con el pH del agua (Andia, 2000). La unidad utilizada es milimoles de hidrogeniones por litro de agua (OMS, 2006).

2.3.5. *Temperatura*

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; las temperaturas muy elevadas desfavorecen a la coagulación ya que la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad, esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc (DIGESA, 2007).

2.3.6. *Dosis Optima*

La dosis es considerada como el volumen indicado de coagulante a una concentración determinada con la cual se logrará conseguir la formación de flóculos con mayor compactación y velocidad de sedimentación, lo que a su vez permitirá obtener un mayor porcentaje de reducción de la turbidez (Zambrano, 2008).

2.4. *Mecanismos de coagulación y floculación*

Se nombra coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos, dicho proceso, se usa para: a) remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente; b) remoción de color verdadero y aparente; c) eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación; d) destrucción de algas y plancton en general; y e) eliminación de sustancias productoras de sabor y de olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros (Arboleda, 1992). En general, la coagulación es un proceso donde el potencial repulsivo de la doble capa eléctrica del coloide es reducido, de modo que se producen micro-partículas. Estas micro-partículas chocan con otras y forman estructuras más grandes (flóculos) en el proceso de floculación (Matilainen et al., 2010).

La remoción de turbidez y de organismos en los suministros de agua incluye la eliminación de impurezas que están cargadas negativamente a niveles de pH natural y han formado una dispersión estabilizada (Bolto, 1995). Las partículas se pueden agregar y se pueden asentar en la solución, a través de cuatro mecanismos básicos: a) compresión de la doble capa; b) coagulación por barrido; c) adsorción y neutralización de carga y d) adsorción y unión interpartículas (Miller et al., 2008; Crittenden et al., 2005; Bolto & Gregory, 2007). Los coagulantes poliméricos están asociados con los mecanismos (c) y (d) con estructuras de cadena larga, incrementando el número de sitios de adsorción desocupados. Parece que estos dos mecanismos proporcionan los principios elementales del funcionamiento interno de los coagulantes vegetales (Yin, 2010).

2.5. Zonas de coagulación

Al añadirse distintas dosis de coagulante de manera ascendente, hacen que surjan diferentes zonas de coagulación (Andia, 2000).

- Zona 1: La dosis de coagulante aplicada no desestabiliza las partículas en suspensión por lo que no se produce la coagulación.
- Zona 2: Al aumentar la dosis de coagulante, se produce una rápida aglutinación de los coloides.
- Zona 3: Al añadir dosis más altas, no se produce una buena coagulación, puesto que los coloides vuelven a estabilizarse.
- Zona 4: Al aumentar aún más la dosis, hasta producir una súper saturación se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

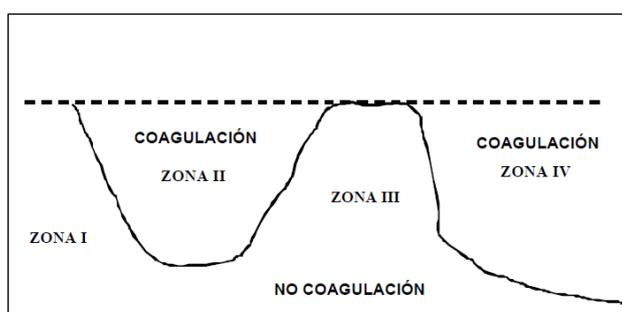


Figura 1: Diagrama de las zonas de coagulación

Fuente: (Andia, 2000)

2.6. Análisis de la investigación

2.6.1. Coagulantes de origen vegetal

2.6.1.1. *Opuntia Ficus Indica* (cactus)

El *Opuntia ficus indica* (cactus) pertenece a la Familia Cactaceae, es originaria de América del Sur, pero también se encuentra en África, Australia, sur de Europa y Asia, actualmente esta planta se encuentra en la mayor parte del mundo (Saranavakumar et al., 2015). El género *Opuntia* (familia Cactaceae), se caracteriza por la producción de un hidrocoloide, conocido como mucílago, el cual forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua. El mucílago se conforma por diferentes tipos de polisacáridos, que son parte de los elementos estructurales del sistema celular de las plantas (Parra et al., 2011). La especie contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa, y el ácido galacturónico, siendo este último su componente principal (Parra et al., 2011); (Jimenez et al., 2012). Al respecto, Miller et al., (2008) afirman que al añadir de manera independiente el ácido galacturónico a muestras de agua, fue capaz de reducir la turbidez en un porcentaje eficiente, por lo cual, señala que puede haber otros componentes adicionales que se encuentren en el mucílago y que contribuyan al proceso de coagulación, siendo necesario la ejecución de más estudios para determinar dichos componentes.

Tabla 1

Condiciones finales de las aguas estudiadas con *Opuntia ficus-indica* (cactus)

Coagulantes	pH Final	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Remoción (%)	Referencia
<i>Opuntia ficus indica</i> (cactus)	7.9	170.96	80	72	(Villabona & Martinez, 2013)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (cactus)	9	500	74.85	85.03	(Lopez, 2018)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (cactus)	6.90	276	19,46	93.25	(Olifero et al., 2013)
Sulfato de aluminio	5.99	276	1,16	99.80	(Olifero et al., 2013)

2.6.1.2. *Moringa oleífera*

La *Moringa oleífera* Lam, es conocido comúnmente como marango, pertenece a la familia Moringa Ceae; es una planta nativa de norte de la India. En Centroamérica se lo conoce como: marango, o paraíso blanco y se encuentra en zonas con temperaturas de

6 a 38 ° C, es muy resistente al frío por corto tiempo sin embargo en temperaturas menores de 14°C no florece y sólo se reproduce por reproducción vegetativa (Martín, García, & Fernández, 2013). El modo de empleo es artesanal, simplemente consiste en moler las semillas maduras y envolverlas en algún tipo de tejido que impida que se disgreguen al introducirlas en el agua a purificar (Loreto, 2016). De acuerdo con Martín, García, & Fernández (2013), a la planta de *Moringa oleifera* se le atribuyen propiedades medicinales, alimenticias y comerciales, también tiene la capacidad para purificar agua, debido a que contienen aminoácidos polares con carga positiva y negativa, que interactúan con las partículas coloidales responsables de la turbidez y el color durante el proceso de clarificación de las aguas, contribuyendo a su eliminación.

Tabla 2

Porcentaje de remoción lograda con la dosis óptima de los coagulantes ensayados

Coagulantes	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final (UNT)	Remoción (%)	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	90.0	9.3	>90	(Feria & Bermúdez, 2014)
<i>Moringa oleifera</i> en cloruro de sodio	36	2.87	92.83	(Sandoval & Laines, 2013)
<i>Moringa oleifera</i> en agua destilada	36	15.83	56.02	(Sandoval & Laines, 2013)
<i>Moringa oleifera</i> en agua de mar	36	3.34	90.72	(Sandoval & Laines, 2013)
Sulfato de aluminio	36	1.59	95.60	
<i>Moringa oleifera</i>	230	36	84.34	(Melo & Turriago, 2012)

2.6.1.3. *Sábila (Aloe vera)*

El *Aloe vera* de la familia Liliaceae o liliácea es una planta mucilaginoso, originaria de África, que ha tomado revuelo en estos tiempos por sus propiedades medicinales; se compone de una raíz, tallo, hojas y flores en época de floración (Dominguez et al, 2012). Su composición química está constituida por una mezcla de antraquinonas, vitaminas, minerales, carbohidratos, enzimas, aminoácidos, lípidos y compuestos orgánicos; se caracteriza por poseer en su interior una sustancia viscosa llamado gel o mucilago, el cual está localizado en la parte central de la hoja y representa entre el 65 – 80% de su peso, determinando que contiene más de 130 compuestos en distintas cantidades, entre ellas la manosa, glucosa, galactosa, etc. Cabe resaltar que el acemanano (β -(1-4)-manano O-acetilados) por su componente activo se considera un interesante compuesto para el tratamiento de aguas, siendo este un polisacárido mucilaginoso (Larionova et al, 2004).

Tabla 3

Porcentaje de remoción de turbidez del agua con *Aloe vera*

Coagulantes	pH final	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Remoción (%)	Referencia
<i>Aloe vera</i>	7.06	50	4.7	90.35	(Mendoza et al, 2014)
<i>Aloe vera</i>	2.75	395	272	31.13	(Lopez et al, 2016)
<i>Aloe vera</i>	-	293	33.71	88.49	(Diestra & Ramos, 2019)

2.6.1.4. *Tamarindus indica (tamarindo)*

El árbol del tamarindo alcanza a medir de 24 a 30 metros de alto, su copa es redonda con gran tamaño y puede llegar a medir 15 metros, además de poseer ramas flexibles y largas, su tronco es recto, pequeño y con fisuras a su alrededor (Bernardo et al., 2018). Las semillas de tamarindo son fuentes ricas en diferentes componentes (Ishola et al., 1990); (Ajavi et al., 2006). Está compuesta en su mayoría por carbohidratos (57,1%), proteína (13,3%) y agua (11,3%). La fracción proteica está formada mayoritariamente por ácidos glutámico y aspártico, glicina y leucina (Guardian & Coto, 2011); los dos primeros serían los responsables de la coagulación (Campos et al., 2003).

Tabla 4

Porcentaje de remoción de turbidez del agua con *Tamarindus indica*

Coagulantes	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Remoción (%)	Referencia
<i>Tamarindus indica</i>	300	0.61	99.71	(Hernandez & Mendoza, 2013)
<i>Tamarindus indica</i> (con grasa)	200	5.33	97.3	(Martinez et al., 2018)
<i>Tamarindus indica</i> (sin grasa)	200	37.83	81.5	(Martinez et al., 2018)
Sulfato de aluminio	200	1.32	99.3	(Martinez et al., 2018)
<i>Tamarindus indica</i>	310.67	5,16	74	(Salgado, 2018)

2.6.1.5. *Caesalpinia spinosa* (tara)

El nombre científico de la tara es *Caesalpinia spinosa*, cuya propiedad es un carbohidrato polimerizado con alto peso molecular, químicamente es un galactomanano formado por monómeros de manosa y galactosa en una relación. Sus principales aplicaciones son: como aditivos químicos, modificadores de propiedades tales como hidratación, viscosidad y estabilidad. La goma de tara presenta taninos en su estructura que actúan como un clarificador del agua, lo cual se da por la gran cantidad proteínica que ésta posee, asimismo contiene elementos que son empleados como decolorante y antioxidante. El peso molecular de la goma de tara es elevado ya que está compuesta en su gran mayoría por polisacáridos, es así que presenta características gelificante en bajas concentraciones. La goma de tara en polvo presenta una apariencia de coloraciones claras o cremas, que son conservadas fácilmente una vez que hayan sido secadas y pulverizadas, es inodora, insípida y muy estable a temperatura ambiente, además es de fácil su obtención (Aguilar, 2010).

Tabla 5

Comportamiento *Caesalpinia spinosa* en la remoción de la turbidez

Coagulantes	pH	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Remoción (%)	Referencia
<i>Caesalpinia spinosa</i> (en agua de río)	7,5	52,3	1,35	97,42	(Dávila & Huamán, 2018)
<i>Caesalpinia spinosa</i> (en aguas superficial)	7,41	31	13	54,84	(Terrones, 2019)
<i>Caesalpinia spinosa</i> (en agua de río)	7	42,6	8,92	79,06	(Bravo & Gutiérrez, 2016)

2.6.2. *Coagulantes de origen animal*

2.6.2.1. *Quitosano*

El quitosano es un polisacárido natural de alto peso molecular, producido principalmente por desacetilación alcalina de la quitina (N-acetilglucosamina) presente en: crustáceos, hongos, insectos, anélidos, moluscos, celenterados etc. Los componentes activos de coagulación del quitosano son polisacáridos, formados por N-acetilglucosamina, por lo tanto, el quitosano es un polielectrolito catiónico debido a la presencia de grupos amino primarios, que es adecuado para la eliminación de los colorantes aniónicos desde la perspectiva de la atracción de cargas (Guibal, 2007). El quitosano han sido efectivo en el tratamiento de agua con altos contenidos de ácidos húmicos, también en la remoción de turbidez de suspensiones de partículas coloidales como látex y caolinita y en la remoción aceite de pescado, metales y surfactantes (Bratskaya, Schwarz, & Chervonetsky, 2004).

Tabla 6

Comportamiento del quitosano en la remoción de turbidez

Coagulantes	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Remoción (%)	pH	Referencia
Quitosano	100	2.6	97.4	6.9	(Rodriguez et al., 2015)
Sulfato de aluminio	100	3.7	96.3	6.0	(Rodriguez et al., 2015)
Quitosano	80	0.22	99.63	6.06	(Fuentes et al., 2008)

2.6.3. Eficiencia de remoción y métodos de extracción de los coagulantes naturales

La tabla 7 presenta los coagulantes naturales identificados en esta revisión, donde se observa el tipo de coagulante según su origen, su eficiencia en porcentajes de remoción de turbidez y color, la dosis óptima utilizada en la prueba de jarras y el método de extracción del coagulante natural.

Tabla 7

Remoción de turbidez con los diferentes coagulantes

Coagulante	Eficiencia de remoción (%)		Dosis óptima (mg/l)	Método de extracción
	turbidez	color		
Coagulantes de origen vegetal				
Tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>) (Villabona & Martínez, 2013).	72	54	90	Cortado, secado, molienda, tamizado, extracción de clorofila y eliminación del solvente.
<i>Opuntia ficus-indica</i> (cactus) (Olifero et al., 2013)	93.25	-	35	Eliminación de epidermis, cortado, lavado, secado, triturado, tamizado y extracción sólido – líquido con etanol e isopropanol.
<i>Opuntia ficus-indica</i> (cactus) (Lopez, 2018)	85.03	-	90	Lavado, cortado, secado, molienda, tamizado, extracción de pigmento (Soxhlet).
<i>Moringa oleifera</i> (Feria & Bermúdez, 2014).	>90	-	4,5 y 17,5	Seleccionado, descascarado, secado, molienda y tamizado en una malla de 250 µm, desengrasado usando un equipo de extracción Soxhlet.
<i>Moringa oleifera</i> (Sandoval & Laines, 2013).	92	96.18	10	Solución salina, extracción del aceite de moringa, secado, pulverizado y puesto en el extractor Soxhlet.
<i>Moringa oleifera</i> (Melo & Turriago, 2012)	84.3	-	300	Extracción y molido de la moringa, extracción de grasa, extracción de la parte coagulante activa de la semilla.
<i>Aloe vera</i> (Mendoza et al, 2014)	90.35	50	8000	Lavado, licuado y filtrado.
<i>Aloe vera</i> (Lopez et al, 2016)	31.13	-	50	Lavado, cortado, pesado, licuado y tamizado.
<i>Aloe vera</i> (Diestra & Ramos, 2019)	88.49	-	3000	Cortado, secado, molido y tamizado.
<i>Tamarindus indica</i> (Hernandez & Mendoza, 2013)	99.71 %	91,67	86.56 mg/l	Extracción de los cotiledones de la semilla, triturado y pulverizado.
<i>Tamarindus indica</i> (Martinez et al., 2018)	97.3 %	79.2 %	50	Despulpado, secado, molido, tamizado.
<i>Tamarindus indica</i> (Salgado, 2018)	74 %	60 %	40 mg/l	Despulpado, lavado, secado, molienda y tamizado.
<i>Caesalpinia spinosa</i> (Dávila & Huamán, 2018)	97.42%	-	35 mg/l	Molido, lavado para eliminar las grasas, secado, molido y tamizado.
<i>Caesalpinia spinosa</i> (Terrones, 2019)	54.84%	-	13 mg/l	Machacado, remojado, cortado, secado, molido y tamizado.
<i>Caesalpinia spinosa</i> (Bravo & Gutiérrez, 2016)	79.06	-	25 mg/l	Clasificación, separación del germen y la cascara, molienda, tamizado
Coagulantes de origen animal				
Quitosano (Rodríguez et al., 2015)	96.0 %	-	20 mg/l	Quitosano comercial disuelto en ácido acético
Quitosano (Fuentes et al., 2008)	99.63 %	-	18 mg/l	Lavado, secado, desproteinización, decoloración, desmineralización y desacetilación.

2.7. Estimación sobre la cantidad que requeriría para un tratamiento (caso particular)

La Planta de Tratamiento Alonso de Ojeda ubicada en Maracaibo, Venezuela, posee un caudal de 8000 L/seg e incurre en gastos diarios en el orden de los 2.677.248 bolívares por el uso de sulfato de aluminio como coagulante a razón de 83.000 Bs/ton, para tratar agua con valores de turbidez de 20 NTU. Considerando el alto costo que implica la potabilización y, más aún, el residual de aluminio que pudiera presentar el agua tratada, se justifica la evaluación de la efectividad de especies vegetales como coagulantes en la potabilización. Una de estas especies es la *Moringa oleifera*, que ha sido usada con éxito como coagulante en el tratamiento de aguas en otros países. Por otra parte, esta planta está ampliamente distribuida en las zonas de bosque seco tropical y se reproduce con facilidad, inclusive, en los lugares en los cuales la reproducción de otras especies es limitada. En consecuencia, se estudia como una posible alternativa de coagulación en sustitución del sulfato de aluminio (Mendoza, Fernandez, & Ettiene, 2000).

Según Mendoza, Fernandez, & Ettiene, (2000), en su estudio determinaron la dosis óptima del coagulante extraído de *Moringa oleifera* para la disminución de diferentes valores de turbidez del agua cruda, evaluando su eficiencia en el tratamiento de potabilización. Se midieron los parámetros turbidez, color, pH y alcalinidad del agua antes y después del tratamiento; el Test de Jarra se aplicó para determinar la dosis del coagulante de *Moringa oleifera* óptima para disminuir la turbidez a valores iguales o menores que el establecido por las Normas de Calidad de Agua de Venezuela (5 NTU).

2.7.1. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda (sin tratar) en la Planta Alonso de Ojeda de la Ciudad de Maracaibo

Se hizo un estudio de la base de datos de la Planta de Tratamiento Alonso de Ojeda, ubicada en la zona noroeste de la ciudad de Maracaibo y se extrajo la información de los valores de turbidez, color, alcalinidad y pH (Mendoza, Fernandez, & Ettiene, 2000).

Tabla 8

Estudio de la base de datos de la Planta de Tratamiento Alonso de Ojeda

Parámetro Fisicoquímico	Valores
Turbidez (NTU)	7, 11, 15, 20, 29, 49
Color (UC)	20, 20, 30, 30, 30, 30
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	80 - 110
pH	6,90 – 8,15

Fuente: (Mendoza, Fernandez, & Ettiene, 2000).

2.7.2. Preparación del agua cruda sintética

Se preparó el agua cruda sintética, considerando la dilución agua de la Planta de Tratamiento Alonso de Ojeda, con la finalidad de reproducir sus características fisicoquímicas y garantizar la representatividad de las muestras. Para lo cual, se realizaron quince muestreos en la Planta, captando en cada uno 100 L de agua cruda que fueron acondicionadas en el laboratorio para obtener los siguientes valores de turbidez 7, 11, 15, 20, 29 y 49 NTU, de color 20 y 30 UC, de alcalinidad 80 y 110 mg/L y de pH 6,90 y 8,15. El agua cruda de la Planta de Tratamiento presentó valores de turbidez bajos (5-7 NTU), que facilitó la preparación del agua sintética (7-49 NTU) con adición de solución de Caolín, preparada al 5% en agua. La disolución de Caolín (Baker) se preparó 24 horas antes de su uso para garantizar la hidratación de las partículas.

2.7.3. Efectividad del coagulante natural *Moringa oleifera* 1.

La efectividad de los coagulantes *Moringa oleifera* y sulfato de aluminio se comparó para turbiedades iniciales de 7, 11, 15, 20, 29, y 49 NTU, y para cada coagulante se aplicó la dosis óptima. Las dosis aplicadas de ambos coagulantes fueron similares para cada valor de turbidez inicial a excepción de la muestra con turbidez inicial de 20 NTU que requirió 35 mg/L de sulfato de aluminio y 15 mg/L de *Moringa oleifera*.

La Tabla 9, muestra una comparación de la efectividad en la remoción de turbidez de dos coagulantes, donde, la moringa puede presentar ventajas sobre el sulfato de aluminio, de acuerdo a estudios realizados se demostró que al utilizar *Moringa oleifera* no quedan residuos tóxicos en el agua tratada que pudieran afectar el organismo humano. Estos resultados confirman a la *Moringa oleifera* como una posible alternativa natural en la potabilización de las aguas, ya que garantiza no sólo lograr con éxito el proceso

de coagulación, sino también, la ausencia de residuos. Sin embargo, al hacer un análisis de costo para la coagulación de 6,912 x 10⁸ litros de agua por día no se obtuvo ventaja económica de la *Moringa oleifera* sobre el sulfato de aluminio.

Los cálculos correspondientes al caudal de agua que se potabiliza diariamente en la planta de tratamiento Alonso de Ojeda (Tabla 9) indican que los costos de tratamiento con *Moringa oleifera* son excesivamente altos en comparación con los del sulfato de aluminio; estos costos tan altos se deben al empleo de éter de petróleo y alcohol isopropílico para la eliminación de la grasa presente en las semillas. El costo que genera la utilización de papel de filtro en la etapa de extracción de la grasa resultó insignificante. Si bien es cierto que los costos de producción del constituyente activo del coagulante de *Moringa oleifera* son elevados. También es necesario destacar que la moringa, además de ser un coagulante altamente efectivo, como se ha demostrado, presenta propiedades desinfectantes, siendo capaz de eliminar efectivamente microorganismos presentes en las aguas crudas (coliformes totales y fecales), por otra parte, además, no deja residuos tóxicos del sulfato de aluminio. Todas estas consideraciones validan la potencialidad de esta especie vegetal en el tratamiento de las aguas, razones por las cuales se debe seguir investigando, especialmente en lo relacionado al establecimiento de un procedimiento de extracción de la grasa mucho más económico (Mendoza, Fernandez, & Ettiene, 2000).

Tabla 9

Comparación de la Efectividad y los Costos Generados por Tratamiento de los Coagulantes *Moringa Oleifera* y Sulfato de Aluminio

Turbidez Inicial (NTU)	Dosis Óptima de <i>Moringa Oleifera</i> (mg/L)	Porcentaje de Remoción (%)	Costo del Tratamiento (Bs/Día)	Dosis Óptima de Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Porcentaje de Remoción (%)	Costo del Tratamiento (Bs/Día)
7	20	29	6,62 x 10 ⁷	20	30	1,6 x 10 ⁶
11	15	54	4,96 x 10 ⁷	12	60	9,2 x 10 ⁵
15	15	78	4,96 x 10 ⁷	10	85	7,7 x 10 ⁵
20	15	73	4,96 x 10 ⁷	35	77	2,7 x 10 ⁶
29	10	83	3,31 x 10 ⁷	12	79	9,2 x 10 ⁵
49	10	90	3,31 x 10 ⁷	5	87	3,8 x 10 ⁵

Fuente: (Mendoza, Fernandez, & Ettiene, 2000).

3. Conclusiones

Por lo tanto, se concluye que se identificaron 6 coagulantes naturales clasificados en extractos vegetales (*Opuntia ficus-indica*, *Moringa oleifera*, *Aloe vera*, *Tamarindus indica* y *Caesalpinia spinosa*), y el otro agente de origen animal (Quitosano).

En cuanto a la eficiencia, el coagulante natural de *Moringa oleifera* fue el más eficiente en comparación con los otros coagulantes identificados en esta revisión, debido a que contienen aminoácidos polares con carga positiva y negativa, que interactúan con las partículas coloidales responsables de la turbidez y el color durante el proceso de clarificación de las aguas, contribuyendo a su eliminación. Además de su mayor porcentaje de remoción la *Moringa oleifera* utiliza una menor cantidad de dosis aplicada para desestabilizar las partículas coloidales.

Los coagulantes naturales identificados en esta revisión son una alternativa viable para el tratamiento de aguas potables ya que alcanzan porcentajes de remoción de turbidez y color semejantes al de los coagulantes químicos. Finalmente, se recomienda realizar estudios de aplicación para aguas con alta turbiedad utilizando los coagulantes naturales, esto en el proceso de clarificación de aguas.

Referencias

- Aguilar, E. (2010). Utilización de las semillas de tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante de coagulación en el tratamiento de aguas. *Universidad Nacional de Ingeniería*, 178.
- Ajavi et al., I. (2006). Oil content and fatty acid composition of some underutilized legumes from Nigeria. *Food Chemistry*, 99, 115–120.
- Andia, Y. (2000). *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de agua. Coagulación Floculación*. Lima: SEDAPAL.
- Antov, M. (2010). Protein from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. *Biores.*, 101.
- Arboleda, J. (1992). *Teoría y Práctica de la purificación del agua*. Colombia: Ed. Acodal.
- Bernardo et al., J. (2018). Cultivo de Tamarindo.
- Bolto, B. A. (1995). Soluble polymer in water purification. *Prog. Polym. Sci.*, 20:987-1041.
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Res.* 41:2301-2324.
- Bratskaya, S., Schwarz, S., & Chervonetsky, D. (2004). Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate. *Water Research* 38:2955 - 2961.
- Bravo, M., & Gutiérrez, J. (2016). *Remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas del río Pollo en Otuzco empleando semillas de Caesalpinia Spinosa (Tara)*. Perú: Biblioteca digital Dirección de Sistemas de Información y Comunicación.
- Campos et al., J. (2003). Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de *Moringa oleifera* mediante HPLC. *Boletín del Centro de Investigaciones*, 37(1), 35-43.
- Carrasquero et al., S. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum Tuberosum*) y plátano (*Musa Paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 1-10.
- Castellanos, F. (2017). Revisión del uso de coagulantes naturales en el proceso de clarificación del agua en Colombia. *Colombia*, pag.1 - 18.
- Crittenden et al., J. C. (2005). *Principios y diseño del tratamiento del agua*. Hoboken, New Jersey.: 2nd ed.; John Wiley and sons.

16. Dávila, C., & Huamán, M. (2018). Efectividad de especies naturales como ayudantes de Coagulación, para la clarificación de aguas turbias en épocas de avenidas en caseríos y centros poblados de Huaraz y Callejón de Huaylas. *Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.*, 1-12.
17. Dempsey, B. (2006). Coagulant characteristics and reactions. . *Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications*. Arthur Hubbard (Series Editor), *Interface Science and Technology*, 5.
18. Diestra, F., & Ramos, I. (2019). *Efecto de la concentración de Aloe vera (Sabila) y tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de aguas residuales municipales sector del Cerrillo, Santiago de Chuco*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
19. DIGESA. (2007). *Análisis microbiológicos de aguas residuales por técnica de los tubos múltiples de fermentación (NMP)*. Perú.
20. Domínguez et al. R. (2012). El gel de Aloe vera: estructura, composición química, procesamiento, actividad biológica e importancia en la industria farmacéutica y alimentaria. *Revista mexicana de Ingeniería química 11, (1), 1-4*.
21. Feria, J., & Bermúdez, S. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa Oleifera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. 1-14.
22. Fuentes et al., L. (2008). Uso del quitosano obtenido de Litopenaeus schmitti (Decapoda, Penaeidae) en el tratamiento de agua para consumo humano. *MULTICIENCIAS, Vol. 8, N° Extraordinario, 2008 (281 - 287)*.
23. Ganjidoost, H. (1997). Effect of sythetic and natural coagulant on ligning removal from pulp and paper waste water. *Water Science Technology*, 286-291p.
24. Gonzales, C. (2011). La turbidez. *World Water Monitoring Day*.
25. Guardian, R., & Coto, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (Tamarindus indica) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en marcha, 24(2), 18- 26*.
26. Guibal, R. (2007). Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (Chitosan).. *React. Funct. Polym. 67 (2007) 33–42*.
27. Hernandez, B., & Mendoza, I. (2013). Semillas de Tamarindo (Tamarindus indica) como coagulante en aguas con alta turbiedad. *REDIELUZ*, 91 - 96.
28. Ishola et al., J. A. (1990). A Chemical Study of Tamarindus indica (Tsamiya) Fruits Grown in Nigeria. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 51, 141-143.
29. Jimenez et al., J. (2012). Evaluación de la tuna (Opuntia cochenillifera) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología en Marcha.*, 25(4):55–62.
30. Lopez et al, M. (2016). Remoción de la turbidez en muestras sintéticas mediante coagulación- floculación y filtración utilizando materiales naturales. *3er Congreso Nacional AMICA- Villahermosa Tabasco*.
31. Lopez, M. (2018). *Evaluación del uso de la cactacea Opuntia ficus.indica como coagulante natural para el tratamiento de aguas*. Lima - Perú: Universidad Agraria la Molina.
32. Loreto, J. (2016). *La Moringa (Moringa oleifera Lam. Chile: Ediciones Antumapu*.
33. Lozano, W., & Lozano, G. (2015). *Potabilización del agua Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
34. Martín, C., García, A., & Fernández, T. (2013). Potenciales aplicaciones de Moringa oleifera. Una revisión crítica. *Pastos y forrajes.*, 137-149.
35. Martínez et al., M. (2018). Remoción de turbidez usando semillas de Tamarindus indica como coagulante en la potabilización de aguas. *Revista Bases de la Ciencia - ISSN 2588-0764*, 19 - 44.
36. Matilainen et al., A. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment. *A review. Adv. Colloid Interface Sci.*, 159:189-197.
37. Melo, G., & Turriago, F. (2012). *Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de Moringa oleifera como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales del caño Cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias*. Colombia, 51-60.: Director: Oscar Javier Olarte. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Abierta y a Distancia Villavicencio,.
38. Mendoza et al, L. (2014). Aloe barbadensis (Miller) como coagulante natural en la potabilización de aguas con baja turbidez. *I Congreso de ciencias ambientales y V jornadas del Liancol*.
39. Mendoza, I., Fernandez, N., & Ettiene, G. (2000). Uso de la Moringa Oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas. *Revista científica de lo experimental*, 8(2), 235-242.
40. Miller et al., S. M. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environ. Sci. Technol.*, 42:4274-4279.
41. Olifero et al., R. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia*, 1-9.
42. OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable primer apéndice a la tercera edición Volumen 1 Recomendaciones Organización Mundial de la Salud*. Perú.
43. Parra et al., Y. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de Opuntia Wentiana. *REDIELUZ*, 1 (1): 27-33.
44. Rodier, J. (1989). *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona.
45. Rodríguez, S., & García, O. (2002). *Una solución para la clarificación de aguas para consumo humano*. Noticias Técnica de Laboratorio.
46. Rodríguez et al., Y. (2015). Uso de un polímero natural (quitosano) como coagulante durante el tratamiento de agua para consumo. *INGENIARE, Año 11, No. 19, 25-32*.
47. Salgado, A. (2018). *Evaluación de las semillas de tamarindo (Tamarindus indica) en la remoción de turbidez de aguas superficiales*. Sincelejo: Universidad de Sucre.
48. Sandoval, M., & Laines, J. (2013). Moringa Oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 93-101.
49. Saranavakumar et al., A. (2015). Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of Opuntia ficus-indica fruit Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of Opuntia ficus-indica fruit. *Front. Life Sci.* 8, 182 e 191.
50. Singh, R. (1989). Hydrological response of coniferous forest in temperate region of Himachal Pradesh. *Indian Forester*, 310-319.
51. Terrones, A. (2019). *Dosis óptima de la goma Caesalpinia spinosa para la mejora de la calidad del agua del Río Chancay –Lambayeque*. Perú: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales.
52. Vela, C. (2016). Disminución de la turbidez utilizando coagulante natural Moringa Oleifera en aguas obtenidas del río Alto Chicama, puente Ingón, Trujillo. *Universidad César Vallejo*, 57.
53. Villabona, A., & Martínez, J. (2013). Caracterización de la Opuntia ficus-indica para su uso como coagulante natural. *Rev. Colomb Biotecnol*, 137-144.
54. Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochem.*, 45:1437-1444.
55. Zambrano, D. (2008). *Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SAESP*. Colombia.