

**Estudio Sobre la Combinación de Mezclas Naturales y Químicas para el Proceso de  
Coagulación/Floculación en la Remoción de la Turbidez del Agua desde una Perspectiva  
Química en el Tratamiento del Agua**

William Garzón Muñoz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías -ECBTI

Química

2021

**Estudio Sobre la Combinación de Mezclas Naturales y Químicas para el Proceso de  
Coagulación/Floculación en la Remoción de la Turbidez del Agua desde una Perspectiva  
Química en el Tratamiento del Agua**

William Garzón Muñoz

Trabajo para optar al título de Químico

Director:

PhD. Mara Isabel Orozco

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingenierías -ECBTI

Química

2021

## Resumen

En el estudio de esta monografía de tipo documental se pretende analizar la efectividad de la mezcla de polímeros y sustancias químicas en la eliminación de la turbiedad del agua a través del proceso de coagulación-floculación; también establecer parámetros que dan lugar a un desempeño óptimo del proceso; estudiar los diferentes tratamientos electroquímicos que existen para las aguas residuales a través de la consulta de varias patentes, internet, libros, revistas, etc.; y comparar los resultados obtenidos de diferentes investigaciones en el uso del almidón en los procesos de coagulación-floculación, aplicados al tratamiento de las aguas naturales y servidas, dando un parámetro de efectividad y reducción de costos.

Entre los polímeros naturales estudiados con mayor efectividad en la remoción de Turbidez, se encuentra la Moringa Olifeira con un porcentaje de remoción del 92 al 98%, cumpliendo además con propiedades antifúngicas (Bravo Gallardo, 2017), del 95 % y 98.2%(Gassenschmi et al,2005), 99.29% (Martínez et al., 2017). Extractos tomados de la Ipomea Incarnata obtuvieron una remoción del 99.29% de remoción de la turbidez, que fueron muy cercanos a los resultados obtenidos con los sulfatos ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  (Martínez et al., 2017), también se pueden destacar la eficiencia superior al 90% de las siguientes especies vegetales: Goma Guar, Opuntia Spp, Moringa Olifeira, Schinopsis balansae (Quebracho), Cactaceos Opuntia, aunque también se deben de tener en cuenta las otras especies porque sirven para tratamientos de aguas que no sean de consumo humano. (Guzmán et al., 2013), la Opuntia Indica presenta según estudios remociones del 82.25 % al 94.84% (Montes et al., 2013)

Entre los resultados obtenidos por medio de otros procesos se destacan la combinación del almidón con Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), obteniendo una remoción de turbidez del 87.4%,

Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) + pectina 89.2%, Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) + Tamarindo en agua del 98% (Sandoval et al., 2019). Almidón de plátano con ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) obteniendo 97.4%.

**Palabras Claves**

Turbiedad, Aguas Residuales, Tratamiento primario.

### Abstract

In the study of this documentary-type monograph, the aim is to analyze the effectiveness of the mixture of polymers and chemical substances in the elimination of turbidity from water through the coagulation-flocculation process; also establish parameters that lead to optimal performance of the process; study the different electrochemical treatments that exist for wastewater through the consultation of various patents, internet, books, magazines, etc.; and compare the results obtained from different investigations on the use of starch in coagulation-flocculation processes, applied to the treatment of natural and waste water, giving a parameter of effectiveness and cost reduction.

Among the natural polymers studied with greater effectiveness in the removal of Turbidity, is the Moringa Olifeira with a removal percentage of 92 to 98%, also fulfilling antifungal properties (Bravo Gallardo, 2017), of 95% and 98.2% (Gassenschmi et al, 2005), 99.29% (Martínez et al., 2017). Extracts taken from Ipomea Incarnata obtained a 99.29% removal of turbidity, which were very close to the results obtained with sulfates ( $Al_2(SO_4)_3$ ,  $CuSO_4$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  (Martínez et al., 2017 ), the efficiency of more than 90% of the following plant species can also be highlighted: Guar Gum, Opuntia Spp, Moringa Olifeira, Schinopsis balansae (Quebracho), Opuntia Cactaceuos, although the other species must also be taken into account because they serve to water treatments that are not for human consumption (Guzmán et al., 2013), Opuntia Indica presents, according to studies, removals of 82.25% to 94.84% (Montes et al., 2013) Among the results obtained through other processes, the combination of starch with Aluminum Sulfate ( $Al_2(SO_4)_3$ ) stands out, obtaining a turbidity removal of 87.4%, Aluminum Sulfate

(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + pectin 89.2%, Sulfate of Aluminum (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + Tamarind in water of 98% (Sandoval et al., 2019). Banana starch with (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> obtaining 97.4%.

**Key Words**

Turbidity, Wastewater, Primary treatment.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	14
Planteamiento del Problema .....	15
Justificación .....	17
Objetivos .....	19
3.1 Objetivo General .....	19
3.2 Objetivos Específicos.....	19
Marco Conceptual.....	20
Marco Teórico.....	23
El Agua .....	23
Propiedades Físico Químicas del Agua. ....	25
Aguas Residuales.....	25
Partículas Suspendidas en el Agua Residual. ....	28
Los Coloides. ....	30
Turbiedad .....	33
Conductividad.....	33
Color .....	34
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	34
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....	35
Proceso de Coagulación – Floculación.....	35
Coagulación .....	35
Tipos de Coagulación .....	37
Floculación.....	42

Sedimentación.....	43
Factores que Afectan el Proceso de Coagulación Floculación .....	44
El pH .....	44
Temperatura .....	45
Mezclado.....	45
Cantidad de Coagulante .....	46
Turbiedad .....	46
Sales Disueltas .....	46
Sustancias Químicas Empleadas en el Proceso de Coagulación – Floculación.....	47
Sales de Aluminio .....	47
Sales De Hierro .....	47
Sales de Calcio .....	48
Peróxidos.....	49
Polímeros Naturales Empleados en el Proceso de Coagulación –Floculación.....	50
Polímeros .....	50
Clasificación de los Polímeros.....	51
Mecanismos de Coagulación y Floculación con Polímeros .....	55
Polímeros Utilizados en la Coagulación.....	56
EL Almidón .....	57
Quitosano .....	59
Galactamosas .....	59
Derivados de la Celulosa .....	60

	9
Alginato de Sodio .....	60
Marco Legal .....	62
Antecedentes .....	66
Aspectos Metodológicos .....	69
Enfoques de Investigación .....	69
Tipo de Investigación.....	70
Técnicas de Investigación.....	70
Criterios de Búsqueda.....	72
Resultados de Efectividad en la Mezcla de Polímeros y Sustancias Químicas en la Eliminación de la Turbiedad del Agua a través del Proceso de Coagulación-Floculación. ....	73
Resultado de Parámetros de Desempeño Óptimo en el Proceso de Coagulación Floculación.....	80
pH.....	80
Mezclado y tiempo.....	82
Temperatura .....	84
Influencia de la Dosis del Coagulante .....	84
Resultados de Tratamientos Electroquímicos Usados en las Aguas Residuales. ....	87
Resultados Obtenidos en el Uso de Polímeros Naturales en los Procesos de Coagulación- Floculación, Aplicados al Tratamiento de las Aguas Naturales y Servidas. ....	96
Opuntia Ficus Indica .....	96
Cactus Lefaria .....	98
Almidón .....	100

	10
Quitosano .....	101
Moringa Oleifera.....	101
Jatropha Curcas.....	104
Cassia Obtusifolia.....	104
Phaseolus Vulgaris.....	105
Tamarindus Indica (Semilla de Tamarindo) .....	106
Ipomoea Incarnata.....	107
Resumen Polímeros Naturales Utilizados en el Proceso de Coagulación Floculación. .....	108
Conclusiones .....	115
Bibliografía .....	120

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Propiedades del agua.....	25
<b>Tabla 2</b> Características y Procedencia de las Aguas Residuales.....	27
<b>Tabla 3</b> Partículas presentes en las aguas residuales.....	29
<b>Tabla 4</b> Clases de Coagulación .....	42
<b>Tabla 5</b> Polímeros Naturales con Propiedades Coagulantes - Floculantes. ....	57
<b>Tabla 6</b> Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y cenizas. ....	57
<b>Tabla 7</b> Valores Máximos permisibles en los Vertimientos de Aguas Industriales.....	62
<b>Tabla 8</b> Características Fisicoquímicas del Agua para Consumo Humano .....	64
<b>Tabla 9</b> Antecedentes de uso de Polímeros Naturales en el proceso de Coagulación - Floculación en el tratamiento de aguas. ....	66
<b>Tabla 10</b> Resultados de la Búsqueda de Información. ....	72
<b>Tabla 11</b> Resultados promedio de coagulación con adición de extracto de hojas de Fique .....	75
<b>Tabla 12</b> Resultados del tratamiento de agua con Sulfato de Aluminio y PAM .....	76
<b>Tabla 13</b> Resultados tratamiento de agua con Sulfato de Aluminio y Almidón de Yuca .....	77
<b>Tabla 14</b> pH mínimo de Solubilidad sustancias Químicas .....	81
<b>Tabla 15</b> pH óptimo de Polímeros Naturales .....	81
<b>Tabla 16</b> Modificadores de pH.....	82
<b>Tabla 17</b> Tiempo y rpm según el tipo de mezclado .....	83
<b>Tabla 18</b> Porcentaje de Color Removido usando Tuna.....	84
<b>Tabla 19</b> Característica de la muestra de agua. ....	89
<b>Tabla 20</b> Comparación de Resultados del Proceso de Electrocoagulación .....	90

	12
<b>Tabla 21</b> Resumen de Resultados .....	92
<b>Tabla 22</b> . Resultados de Color, turbiedad, DQO, Conductividad y pH.....	94
<b>Tabla 23</b> Comparación entre los valores de turbidez y color.....	96
<b>Tabla 24</b> Resultados registrados del uso de la Opuntia Indica .....	97
<b>Tabla 25</b> Resultados Opuntia vs Alumbre. ....	98
<b>Tabla 26</b> Actividad de Coagulación Cactus Lefaria en diferentes solventes .....	99
<b>Tabla 27</b> Resultados de Remoción de la Prueba Test de Jarras .....	103
<b>Tabla 28</b> Resultados de Remoción de Turbidez con diferentes Coagulantes. ....	107
<b>Tabla 29</b> Resumen de la actividad Coagulante y floculante de diferentes especies. ....	108
<b>Tabla 30</b> Productos Naturales Evaluados y Probados para Reducir la Turbidez.....	110

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Estructura Molecular del Agua.....	24
<b>Figura 2</b> Fuerza de Atracción de Van de Waals .....	30
<b>Figura 3</b> Fuerzas de Repulsión.....	31
<b>Figura 4</b> Doble Capa de los Coloides .....	32
<b>Figura 5</b> Conductividad del Agua.....	33
<b>Figura 6</b> Estabilidad de los coloides. ....	36
<b>Figura 7</b> Coagulación y Floculación de una suspensión coloidal. ....	37
<b>Figura 8</b> Formación de Floc por Coagulación por puente químico. ....	38
<b>Figura 9</b> Reactor Electrolítico.....	40
<b>Figura 10</b> Representación de la disociación del poli(Ácido acrílico). ....	52
<b>Figura 11</b> Representación esquemática de un polielectrolito que de una forma de ovillo .....	53
<b>Figura 12</b> Polielectrólitos catiónicos.....	53
<b>Figura 13</b> polieléctricos no iónicos.....	54
<b>Figura 14</b> Estructura de la glucosa.....	58
<b>Figura 15</b> Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilosa. ....	58
<b>Figura 16</b> Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilopectina ...	59
<b>Figura 17</b> Estructura de la celulosa.....	60
<b>Figura 18</b> Estructura del alginato de sodio. ....	61

## **Introducción**

Nuestro planeta tierra es conformado por un 75% de agua y ésta no se encuentra en estado puro en nuestro medio circundante, sino que por ser considerada el disolvente universal ella siempre va a estar mezclada con minerales, nutrientes y en otras ocasiones con parámetros que alteran su color, sabor y olor. A lo largo de todos los tiempos el agua ha sido empleada en procesos industriales, agrícolas, hogares, servicios, entre otros, ocasionando que se agreguen a este efluente sustancias contaminantes que pueden acabar con la calidad del agua y a su vez con el lugar de vida de muchos seres acuáticos.

En este orden de ideas, el hombre se ha interesado por el estudio del proceso de eliminación de la contaminación y parámetros que le restan color y transparencia el agua y entre ellos es el proceso de coagulación – floculación que elimina desde el color, la turbiedad e incluso algunos coliformes y sólidos.

La presente monografía es un estudio documental que trata del estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua, brindando al lector alternativas naturales que ayuden a dicho proceso sin alterar las propiedades del agua y sin ocasionar contaminantes al ser humano por trazas de aluminio.

### **Planteamiento del Problema**

El agua es un recurso necesario en todas las reacciones metabólicas del ser humano y uno de los compuestos más importantes de nuestro planeta tierra, a pesar de que el 75% de nuestro planeta es agua, ella no se encuentra en estado puro por ser un disolvente universal y arrastra con todas las partículas que se encuentra en su camino, siendo este uno de los motivos por los que no siempre es apta para el consumo humano.(Mancipe & Jaramillo, 2016)

En los diferentes procesos donde el agua es utilizada, el agua resultante es una sustancia que ha perdido sus propiedades fisicoquímicas y por lo tanto al ser vertidas nuevamente en los ríos afectan el hábitat de muchas especies e inclusive afecta también a los seres humanos que se abastecen de este servicio, en este sentido se hace necesario de investigaciones que den a conocer la efectividad de productos naturales utilizados en la eliminación de la turbiedad del agua en los procesos de tratamiento de la misma para volver a ser utilizada o simplemente para ser vertida en un afluente natural.

En las plantas potabilizadoras de agua para el consumo humano para eliminar la turbidez ocasionada por virus, bacterias, materia orgánica y compuestos coloidales utilizan el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), un compuesto químico que al entrar en contacto con el agua se generan pequeñas trazas de Aluminio, que no son removibles y que son consideradas según estudios como un agente de enfermedades del sistema nervioso cuando los límites de éste sobrepasan los 0,1 mg/L, ocasionando enfermedades como el Alzheimer y el Parkinson. (Moreno & Aldo, 2011)

Para las empresas el eliminar la turbidez de las aguas con el sulfato de aluminio, genera mayores gastos económicos y además procesos en los cuales la cantidad de lodo se ve aumentada, recientes estudios han demostrado que los polímeros naturales pueden ser una gran

alternativa para la coagulación floculación de estas partículas sin ocasionar daños al ser humano, utilizando extractos de plantas como la Moringa Oleifera con porcentajes de Remoción del 99.29% y de Ipomoea Incarnata (99.18%) (Martínez et al., 2017); en estudios de Patel & Vashi (2012) demuestran entre sus resultados remociones del 98.0% para la Surjana,. 94.5% del chitosan y 89.4% para la semilla de maíz, siendo muy efectivos en el proceso de coagulación.

Pero, ¿Cuál es la efectividad reportada de acuerdo a los referentes bibliográficos de los polímeros naturales y las mezclas con productos químicos ( $Al_2(SO_4)_3$ ) en el proceso de coagulación/ floculación de la remoción de partículas coloidales en el tratamiento primario de potabilización o de aguas residuales en empresas que utilicen el agua como recurso (PTAR, Tratamiento de aguas potables, empresas e industrias)?

### **Justificación**

El agua es un recurso importante para la vida en la tierra, se usa en la agricultura, la industria, en las actividades domésticas y tiene una gran importancia en los ecosistemas y habita de muchas especies, además de su importancia en las reacciones químicas del metabolismo. Pero, del 75% del agua que hay en el planeta, solo el 2,53% se puede utilizar y de este porcentaje el agua está siendo afectada por el aumento de la contaminación en las actividades del hombre. (Díaz Claros, 2014)

En este orden de ideas, se hace necesario estudiar y evaluar mecanismos que ayuden a potabilizar el agua, a eliminar las sustancias suspendidas causantes del color, olor y de la perturbación de las propiedades químicas del agua. Pero, también es de vital importancia estudiar las cantidades de coagulantes necesarias para eliminar las partículas, ya que la producción de un floc muy pequeño o ligero produce una decantación insuficiente ocasionando que estas partículas taponen los filtros, dando lugar a los lavados frecuentes. Además, cuando el floc es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida. (Cárdenas, 2000)

El objetivo de esta monografía es estudiar otras alternativas en el manejo de la potabilización del agua como lo son los polímeros naturales, los cuales pueden presentar una alta efectividad y así eliminar los compuestos químicos que pueden causar daños a los seres vivos. Dicha importancia de estudio permite conocer los parámetros necesarios de pH, temperatura, sales, tipo de mezclado y la cantidad misma del coagulante porque no todos los coagulantes se pueden utilizar en cualquier tipo de agua sin tener en cuenta los parámetros antes descritos y así obtener la máxima efectividad del proceso. (Cárdenas, 2000)

De acuerdo con lo planteado, el estudio de esta monografía se hace importante porque:

Permite conocer alternativas eficientes en el manejo de la eliminación de la turbiedad del agua porque no conocer las diferentes alternativas puede conllevar a errores y grandes pérdidas económicas y procesos ineficientes.

El método de coagulación floculación es muy importante en empresas que utilicen en su proceso el agua, la cual deba de ser tratada antes y después de dicho proceso para garantizar las óptimas condiciones en su uso industrial y también al ser vertidas nuevamente en los afluentes.

Brinda información de procesos con coagulantes naturales como el almidón, Moringa Oleifera, Cactus, entre otros, para reducir costos o simplemente para evitar contaminaciones con trazas de aluminio en las aguas tratadas.

El estudio sobre el tratamiento de aguas residuales es muy importante porque este recurso es utilizado en la vida cotidiana, en el contexto industrial y con el calentamiento global este recurso está tendiendo a desaparecer, los contaminantes a causas antrópicas pueden deteriorar ecosistemas y hábitats acuáticos y esta es la razón que hace interesante el estudio de esta monografía, el conocer los diferentes métodos y mezclas que se pueden utilizar en dicho proceso para la clarificación del agua, ya sea para el consumo para verter a los ríos nuevamente, siendo respetuosos con nuestro medio ambiente y así el lector conocerá la efectividad de dichos compuestos y utilizará los que considere importantes y efectivos en sus procesos.

## **Objetivos**

**Objetivo General** Realizar una revisión bibliográfica sobre la efectividad de las mezclas naturales y químicas en el proceso de coagulación/floculación que permitan obtener una buena efectividad sin causar contaminación con trazas de compuestos químicos a los ecosistemas y seres vivos.

### **Objetivos Específicos**

Compilar información para analizar la efectividad de la mezcla de polímeros y sustancias químicas en la eliminación de la turbiedad del agua a través del proceso de coagulación-floculación de revistas científicas, trabajos de grado, tesis, entre otros que contengan viabilidad del tema.

Establecer parámetros que dan lugar a un desempeño óptimo del proceso de Coagulación Floculación, describiendo los márgenes adecuados para su óptimo desempeño.

Estudiar los diferentes tratamientos electroquímicos que existen para las aguas residuales a través de la consulta de varias patentes, internet, libros, revistas, etc; para profundizar nuestro estudio de los tratamientos primarios y los métodos alternos para la eliminación de metales en el agua residual.

Comparar resultados obtenidos de diferentes investigaciones en el uso del almidón en los procesos de coagulación-floculación, aplicados al tratamiento de las aguas naturales y servidas, dando un parámetro de efectividad y reducción de costos.

## Marco Conceptual

El agua: De acuerdo con la definición de la RAE (2020) es un líquido transparente, incoloro, inodoro e insípido en estado puro, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y que constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos. (Fórm. H<sub>2</sub>O).

Aguas Residuales: Se conocen como aguas residuales a todas las aguas que proceden de la actividad humana, ya sea en el contexto doméstico e industrial, afectando las propiedades físicoquímicas. (Mancipe & Jaramillo, 2016)

Coagulación / Floculación: Se le llama al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con pesos específicos superior al del agua llamadas floc. La coagulación empieza en el momento en que se agregan los coagulantes al agua y consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: el de adsorción-desestabilización basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua. (Valencia, 2000, p.13-14)

Coloides: De acuerdo con la definición citada por Cárdenas, (2000),

“son suspensiones estables, por lo que es imposible sus sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua. Los sistemas coloidales

presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida, por ejemplo 1 cubo de 1 cm<sup>3</sup>, tiene una superficie total de 6 cm<sup>2</sup> ; si está dividido en pequeños cubos elementales, la superficie total de todos aquellos es mucho más grande”.

(p.7)

Turbiedad: Capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a la procedencia de arcillas de la erosión del suelo, algas o crecimientos bacterianos. (Valencia, 2000)

Prueba de Jarras: Es un método de simulación de los procesos de coagulación floculación, realizado a nivel de laboratorio el cual permite determinarlas variables físicas 12 y químicas del proceso de coagulación, floculación y sedimentación. (Gómez Puentes, 2005)

Sedimentación: es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando un tiempo de retención adecuado. (Flórez, 2011)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO): es un parámetro para medir la cantidad de oxígeno que se necesita en el agua para oxidar la materia orgánica a través de un agente químico oxidante fuerte como lo es el dicromato de potasio en ebullición con ácido sulfúrico, los cuales se someten a reflujo durante horas y posteriormente se titula con sulfato ferroso. Es de aclarar que la cantidad de dicromato reducida es una medida de la materia orgánica oxidada. (Muñoz, 2008)

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): es una medida del oxígeno que necesitan los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable y sirve para

determinar la concentración de la materia presente en el agua, bajo condiciones aerobias y por 5 días a una temperatura de 20°C. (Muñoz, 2008)

Polímeros: “Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeras, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica.” (Valencia, 2000, p.35)

Color del agua:

“Material vegetal en descomposición y algunos minerales de hierro y magnesio se encuentran entre las principales sustancias causantes de color en el agua natural.

Cualquiera sea su origen, los compuestos responsables de este color, se conocen como sustancias húmicas, aunque no se tienen mayores detalles de su estructura molecular, se sabe que, en general contienen carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno en porcentajes variables. La presencia de color en agua genera una mayor demanda de cloro, a la vez sirve como nutriente para agentes patógenos y afecta la eficiencia de los procesos industriales”. (Martínez et al., 2017, p.29)

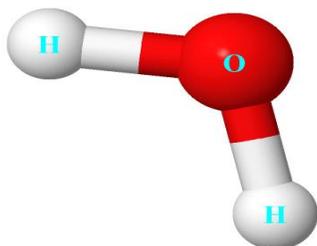
### **Marco Teórico**

El AguaEl agua constituye el 80% del cuerpo de la mayoría de los organismos e interviene en todos los procesos metabólicos que en ellos se realizan, como por ejemplo: interviene en el proceso de fotosíntesis de las plantas, en el transporte de sustancias y es el habitat de muchas especies. Es por ello que se dice que “es un bien de primera necesidad para los seres vivos y un elemento natural imprescindible en la configuración de los sistemas medioambientales (Paredes Díaz J. 2013 (Romero, 2016)

El agua es una molécula que está compuesta por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrogeno (ver ilustración 1), los cuales le confieren una propiedades físicas y químicas específicas (Valencia, 2000); aunque la carga total de una molécula de agua es neutra (igual número de protones y electrones) presenta una distribución asimétrica de sus electrones, debido a que el oxígeno al ser más electronegativo atrae con más fuerza la nube electrónica de los hidrógenos, generando así un desplazamiento de la carga negativa hacia el mismo e induciendo una carga positiva hacia los átomos de hidrógeno, debido a que éstos quedan parcialmente deficientes de sus electrones, formándose así un “momento bipolar” en la molécula, donde al haber una diferencia de electronegatividades en la misma se forman dos polos de signo contrario, por lo que la molécula de agua presenta una forma angular con un ángulo de 104.5 aproximadamente entre ellos.

**Figura 1**

*Estructura Molecular del Agua.*



**Nota.** Fuente: *Elaborada en línea en la página biomodel.com*

La polaridad del agua la convierte en un excelente solvente. Su carácter bipolar hace que las moléculas que se disuelven en ella se ionicen parcial o totalmente debido a que la carga negativa de la molécula de agua atrae la parte positiva de la molécula de soluto y la parte positiva del agua atrae la parte negativa del soluto, generándose así un fraccionamiento de la molécula de soluto en iones positivos (cationes) y negativos (aniones), cada ión formado tiene un campo eléctrico, el cual les permite atraer y formar enlaces con otras moléculas de agua, generando así iones solvatados o hidratados (específicamente para el agua) (Valencia, 2000)

***Propiedades Físico Químicas del Agua.***

**Tabla 1**

*Propiedades del agua*

<b>Propiedad</b>	<b>Agua</b>
<b>Estado</b>	Sólido Líquido Gaseoso
<b>Color</b>	Incoloro
<b>Olor</b>	Inoloro
<b>Densidad</b>	1 g/cm <sup>3</sup> (20°C)
<b>Peso molecular</b>	18,02 g/mol
<b>Punto de fusión</b>	0° C
<b>Punto de Ebullición</b>	100 °C

*Nota. Fuente: (Eustaquio Rojas, 2019, p. 18-19)*

De acuerdo con la información de la tabla 1, el agua es un compuesto que puede presentarse en los tres estados en la naturaleza debido a sus bajos puntos de fusión y ebullición. Aunque también es difícil encontrarla en estado puro por su poder disolvente.

***Aguas Residuales.***

Se conocen como aguas residuales a todas las aguas que proceden de la actividad humana, ya sea en el contexto doméstico e industrial, afectando las propiedades físicoquímicas. Entre los residuos domésticos se pueden agrupar: los que provienen de todas las actividades ejercidas en los hogares como: los residuos de jabones, lavaplatos, detergentes sintéticos con espumantes, celulosa, almidón, glucosa, insecticidas, y en general cualquier residuo producido en las viviendas (Mancipe & Jaramillo, 2016)

Entre los residuos Industriales se puede agrupar: aquellas deposiciones provocadas por la industria, como químicos, residuos orgánicos e inorgánicos, productos de aseo, entre otros.

(Mancipe & Jaramillo, 2016) de acuerdo con el Ministerio de medio Ambiente, las aguas residuales industriales son aquellas diferentes a las que constituyen aguas residuales domésticas. (*Vertimientos y reuso de aguas residuales / Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 2010)

Es por ello, que los recursos hídricos son sometidos a varios factores de contaminación: física, química y biológica. Por las actividades que requieren de este recurso (ganadería, agricultura, industrialización, etc), además del crecimiento de las ciudades y las faltas de medida en la descontaminación de este afluente. (C & Marina, 2005)

Al optimizar los recursos hídricos, también se está garantizando la reducción de las enfermedades transmitidas por los vectores, entre ellas las producidas por mosquitos y el tratamiento del agua para la recreación. (Arcila & Peralta, 2015)

En la tabla número 2 se destacan las características, los compuestos químicos y biológicos que se pueden encontrar en las aguas residuales y su procedencia:

**Tabla 2***Características y Procedencia de las Aguas Residuales.*

	<b>Características</b>		<b>Procedencia</b>
<b>Propiedades Físicas</b>	Color		Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica.
	Olor		Agua residual en descomposición, residuos industriales.
	Sólidos		Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
	Temperatura		Aguas residuales domésticas e industriales.
<b>Constituyentes Químicos</b>	Orgánicos	Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.
		Grasas, aceites	Aguas residuales domésticas e industriales.
		Pesticidas	Residuos Agrícolas.
		Fenoles	Vertidos industriales.
		Proteínas	Aguas residuales domésticas e industriales.
		Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas e industriales.
		Tensoactivos	Aguas residuales domésticas e industriales.
		Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas e industriales.
		Otros	Degradación natural de materia orgánica.
	Inorgánicos	Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
		Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
		Metales pesados	Vertidos industriales.

<b>Características</b>		<b>Procedencia</b>	
Inorgánicos	Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas.	
	pH	Aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.	
	Fósforo	Aguas residuales domésticas, comerciales, industriales y agua de escorrentía.	
	Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.	
	Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.	
	Gases	Sulfato de Hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos.
		Metano	Descomposición de residuos domésticos.
		Oxígeno	Agua de suministro, infiltración de agua superficial.
	<b>Constituyentes Biológicos</b>	Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
		Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Protistas		Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.	
Virus		Aguas residuales domésticas.	

**Nota.** Fuente : (Gómez Puentes, 2005, p.16)

### ***Partículas Suspensas en el Agua Residual.***

El agua en su estado natural no existe en forma pura porque siempre va a estar en contacto con sustancias a las cuales va a disolver. Por ejemplo, al entrar en contacto con el suelo va a arrastrar minerales y sustancias coloidales que afectarán sus características, al entrar en contacto con el aire se unirá con los gases allí presentes. (Vargas-Camareno & Romero-Esquivel, 2006)

Dentro de las sustancias presentes en el agua, se encuentran tres grandes grupos:

1. sólidos suspendidos: los cuales son mayores a  $10^{-6}$  m y son los responsables de la turbidez en el agua. Entre ellos se destacan la arena, arcillas, productos de descomposición, bacterias, plancton y virus.

2. partículas coloidales: miden entre  $10^{-6}$  y  $10^{-9}$  m, también son responsables de la turbidez del agua y presentan una sedimentación muy lenta.

3. sustancias disueltas: son sustancias con medidas menores a  $10^{-9}$  m y son por lo general sustancias inorgánicas como los iones y cationes, también sustancias disueltas como lo son los ácidos, alcoholes, aldehídos, entre otros. (Vargas-Camareno & Romero-Esquivel, 2006)

En la tabla 3, se resumen los principales cationes, aniones, compuestos orgánicos que se encuentran en las aguas residuales:

**Tabla 3**

*Partículas presentes en las aguas residuales*

<b>Cationes</b>	<b>Aniones</b>	<b>Pigmentos</b>	<b>Compuestos Orgánicos</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	Cl <sup>-</sup>	Urocromo	Urea [CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ]
<b>K<sup>+</sup></b>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Urubilina	Acido hipúrico
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Uroportirina	Creatinina
<b>Ca<sup>2+</sup></b>			Ácido úrico

**Nota.** Fuente: (Mancipe & Jaramillo, 2016, p.20):

Además de los compuestos nombrados en la tabla 3, también se pueden destacar los materiales coloidales, polvo, óxido de metales insolubles, hidróxidos, bacterias, virus, algas, células de levadura, cloruros y carbonatos. (Arcila & Peralta, 2015)

### ***Los Coloides.***

Los coloides son sustancias que pueden ser hidrofílicos con afinidad por el agua o hidrofóbicos con poca afinidad con el agua, con un diámetro comprendido entre  $10^{-9}$  y  $10^{-5}$  m y que presentan las siguientes fuerzas (Díaz Claros, 2014):

Fuerzas de Atracción de Van de Waals: Son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas, en la ilustración 2 se muestra un ejemplo de las cargas que pueden tener los coloides y las atracciones que se dan entre ellas por atracción, cuando su movimiento lo permite.

### **Figura 2**

*Fuerza de Atracción de Van de Waals*

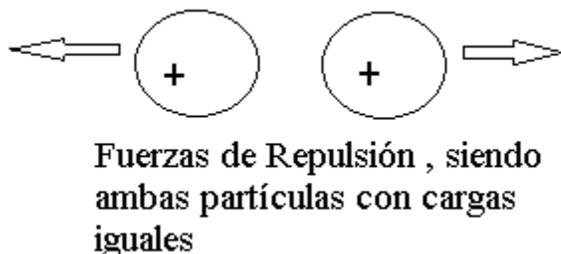


**Nota.** Fuente: Propia del Autor

Fuerzas de Repulsión electrostáticas: son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras. (iguales repelan, diferentes se atraen). (p.27), en la ilustración 3 se muestra la fuerza de repulsión cuando las dos partículas presentan las mismas cargas.

**Figura 3**

*Fuerzas de Repulsión.*

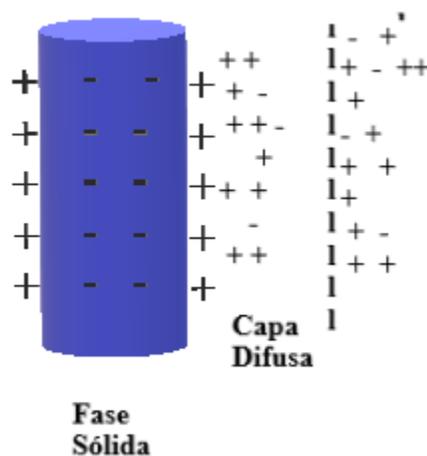


*Nota-Fuente: propia del Autor.*

Doble capa: Como la superficie de las partículas coloidales es negativa atrae un cumulo de iones positivos en la región interfaz (sólido- líquido), que junto con la carga negativa forman la “doble capa”. La repulsión eléctrica de las partículas coloidales disminuye si se incrementan los iones de carga opuesta en la solución; al introducir un electrolito que no reacciona en el agua, aumenta la densidad de las cargas y disminuye la esfera de influencia de las partículas con lo cual se logra la coagulación por compresión de la doble capa, es decir que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente ocurre cuando los iones de igual carga son repelidos y los de carga opuesta son atraídos por los coloides”. (Fúquene & Yate, 2018)

### Figura 4

#### *Doble Capa de los Coloides*



**Nota.** Fuente: Modificado de (Valencia, 2000, p.14)

De acuerdo con la figura 4, se conoce como doble capa por presentar dos regiones diferenciadas: la capa rígida que es la que está firme al coluido y de poco espesor, la segunda capa es formada por los movimientos iónico, recibiendo el nombre de capa difusa, la cual puede comprimirse por el aumento de los electrolitos y dar proceso a la coagulación, floculación y sedimentación (Domínguez et al., 2010). Es decir que las fuerzas de interacción que existen en las partículas rodean la doble capa que está interactuado con la fase acuosa y con las mismas cargas del agua, la cual se llama capa difusa que a su vez están unidas a la fase sólida o propias de la molécula, lo que permite que otras micelas se unan y se forme el floculo permitiendo su sedimentación.

### ***Turbiedad***

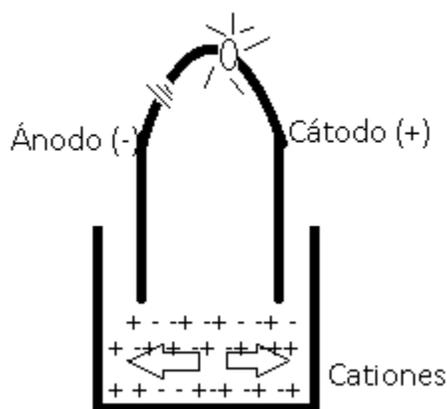
La turbidez del agua es la reducción de su transparencia, ocasionada por el material particulado en suspensión. Este material puede consistir en arcillas, limos, plancton o material orgánico finamente dividido, que se mantiene en suspensión por su naturaleza coloidal o por la turbulencia que genera el movimiento. (Carmona, 2012)

### ***Conductividad***

“La conductividad del agua se produce por los electrolitos que lleva disueltos. Los iones mayoritarios que forman las sales disociadas suelen ser  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ”. (Alvarado, 2011, p.118)

### **Figura 5**

*Conductividad del Agua.*



**Nota.** Fuente: Propia del autor.

En la ilustración 5, se resume lo que sucede con el agua cuando presenta iones cargados negativamente (Aniones) y cargados positivamente (Cationes), los cuales conducen la corriente eléctrica por su movimiento a las placas de los ánodos y cátodos de acuerdo con su carga.

### ***Color***

La aparición del color en el agua puede deberse a:

- a) la extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas
- b) la solución de productos de descomposición de las maderas
- c) la solución de materia orgánica del suelo
- d) una combinación de estos procesos

Cualquiera que sea su origen, los conjuntos de compuestos responsables de color, recibe el nombre de sustancias húmicas. Si bien la estructura molecular de dichas sustancias no es bien conocida, se sabe que básicamente contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en porcentajes variables, y que muestran propiedades ácidas con pesos moleculares que van desde 200 hasta más de 50.000. Se clasifican en cuatro fracciones: ácido fúlvico, ácido húmico, ácido himatomelánico, y carbón húmico.(Valencia, 2000)

Siguiendo con el estudio de Valencia (2000), el color también sirve de indicador del PH, se ha estudiado que al aumentar el pH del agua, aumenta proporcionalmente su color, pero en la potabilización del agua es importante eliminar esta característica ya sea por estética o porque forman clorohalometanos que se sospechan son cancerígenos, dificulta los análisis colorimétricos del agua, complica el proceso de coagulación y estabiliza el hierro y el manganeso en solución.

### ***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***

La DQO es un parámetro para medir la cantidad de oxígeno que se necesita en el agua para oxidar la materia orgánica a través de un agente químico oxidante fuerte como lo es el dicromato de potasio en ebullición con ácido sulfúrico, los cuales se someten a reflujo durante

horas y posteriormente se titula con sulfato ferroso. Es de aclarar que la cantidad de dicromato reducida es una medida de la materia orgánica oxidada. (Muñoz, 2008)

### ***Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)***

La DBO es una medida del oxígeno que necesitan los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable y sirve para determinar la concentración de la materia presente en el agua, bajo condiciones aerobias y por 5 días a una temperatura de 20°C. (Muñoz, 2008)

### **Proceso de Coagulación – Floculación**

#### ***Coagulación.***

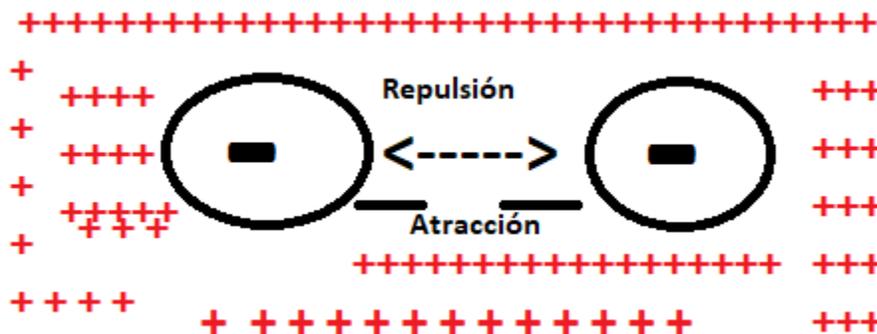
El Agua contiene partículas disueltas en ellas que pueden ser orgánicas o inorgánicas, algunas de ellas sedimentan con gran facilidad, mientras que otras como los coloides son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial, que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y la formación de una partícula más pesada para poder así sedimentar. (Lorenzo-Acosta, 2006)

De acuerdo con Lorenzo (2006) los coloides presentan cargas negativas, por lo que en agua son estables debido a la repulsión electrostática entre estas partículas invisibles y por lo tanto no precipitan (ver ilustración 6). Pero, es con el proceso de coagulación que se anulan estas cargas electronegativas y se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales

dispersas en el agua o también se utilizan polímeros naturales que se hablarán más adelante en esta monografía.

### Figura 6

*Estabilidad de los coloides.*



**Nota.** Fuente: Adaptada de (Lorenzo-Acosta, 2006, p.4).

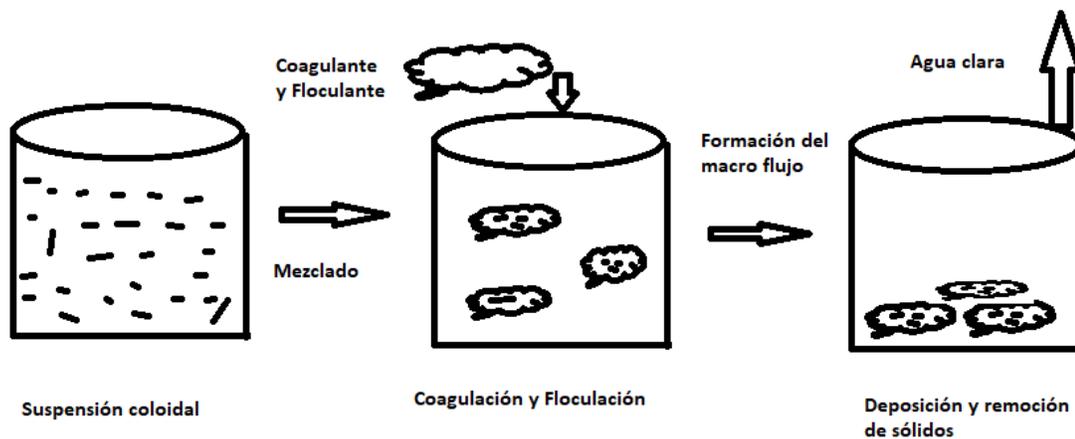
De acuerdo con la investigación de Arcila & Peralta (2015), la coagulación se realiza en una serie de procesos y entre ellos encontramos:

1. mezclado rápido: Tiene como objetivo dispersar los químicos en el agua, ayudando a reducir las fuerzas repulsivas de las partículas y así permitir la coagulación.
2. mezclado lento: tiene como principal objetivo que las sustancias presentes en el agua se estén mezclando y así se logre la floculación.
3. sedimentación: se suspende el mezclado y se espera que los flóculos formados empiecen su sedimentación, para lograrlo se utilizan dos clases de materiales: los coagulantes inorgánicos y los orgánicos.

En la figura 7 se muestra el proceso de Coagulación y Floculación:

**Figura 7**

*Coagulación y Floculación de una suspensión coloidal.*



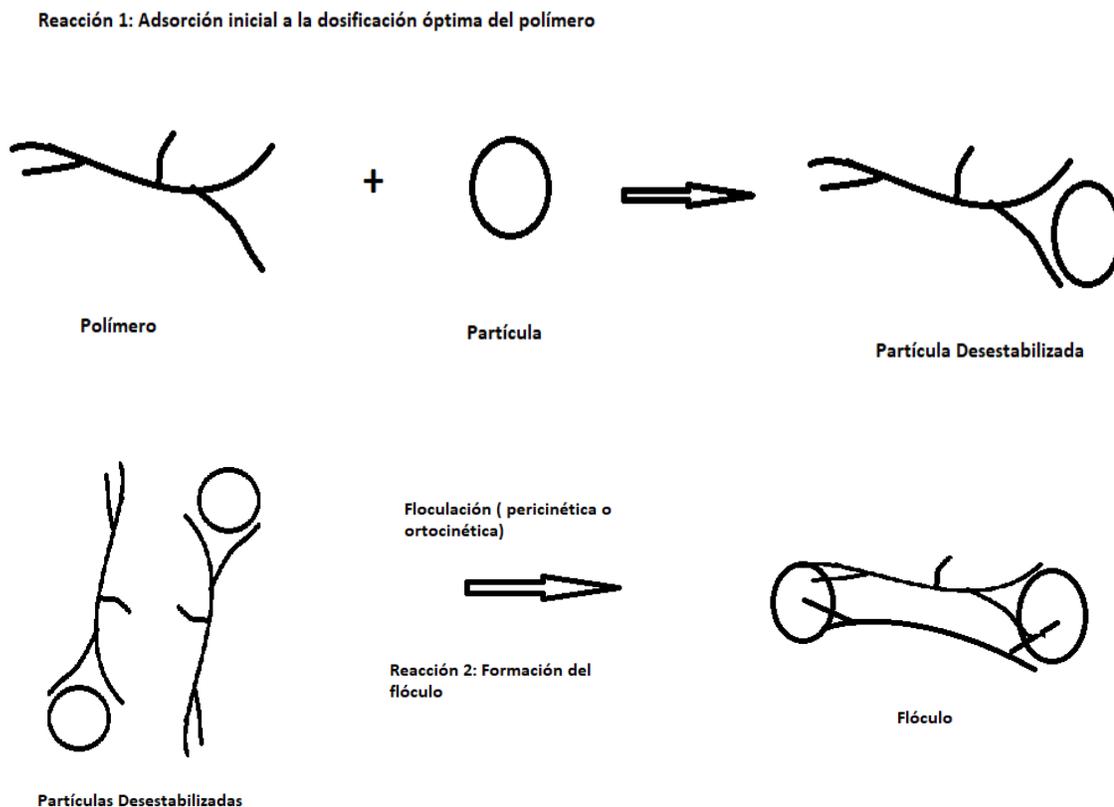
**Nota.** Fuente: Adaptada de (Arcila & Peralta, 2015, p.5)

### ***Tipos de Coagulación***

**Coagulación por Puente Químico.** En este tipo de coagulación se utiliza como agente desestabilizador de partículas, polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen grupos funcionales que interactúan y adhieren con la superficie del coloide por enlaces iónicos, covalentes, puentes de hidrogeno, entre otros., dejando una parte de la cadena polimérica libre en la disolución, a la cual, una segunda partícula coloidal que puede absorber sus grupos funcionales libres formando de esta manera un puente químico coloide-polímero-coloide, repitiéndose este proceso con el resto de las partículas presentes en la disolución, permitiendo su aglomeración en partículas más grandes llamadas flocs. (Mancipe & Jaramillo, 2016)

**Figura 8**

*Formación de Floc por Coagulación por puente químico.*



**Nota.** Fuente: Adaptada de (Mancipe & Jaramillo, 2016, p.35).

Las partículas coloidales en el agua están por lo general cargadas negativamente, debido a la presencia de grupos  $\text{COO}^-$  y  $\text{OH}^-$ , reemplazo de iones  $\text{Si}^{4+}$  por iones  $\text{Al}^{3+}$  o por la absorción en la superficie de iones por fuerzas de van der Waals y para remover estas partículas cargadas negativamente, las suspensiones coloidales deben ser desestabilizadas, mediante la adición de iones cargados positivamente como  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ . (Vargas-Camareno & Romero-Esquivel, 2006)

**Electrocoagulación.** Este sistema de coagulación donde se aplican los principios de la electroquímica es una técnica prometedora para las empresas de la galvanotecnia, donde en sus procesos quedan aguas residuales cargadas con muchas partículas metálicas. Este proceso consiste en usar una celda electrolítica con sus respectivos ánodos y cátodos y corriente eléctrica.

La efectividad de la electrocoagulación en la remoción de metales (Ni, Zn, Pb, Cu, Cd), es de un 98,5% con el uso de electrodos de aluminio en soluciones ácidas preparadas a escala de laboratorio, aunque según Heidmann & Calmano (2007), citado por Piarpuzan (2012), reportan que la razón de remoción para Zn, Cu, Ni y Ag, es independiente de la concentración inicial, esto indica que la precipitación de estos metales se da por la formación de sus respectivos hidróxidos con una desventaja en el por su alto consume de energía y los costos de los montajes de equipos necesarios. (Parpiuzan, 2012)

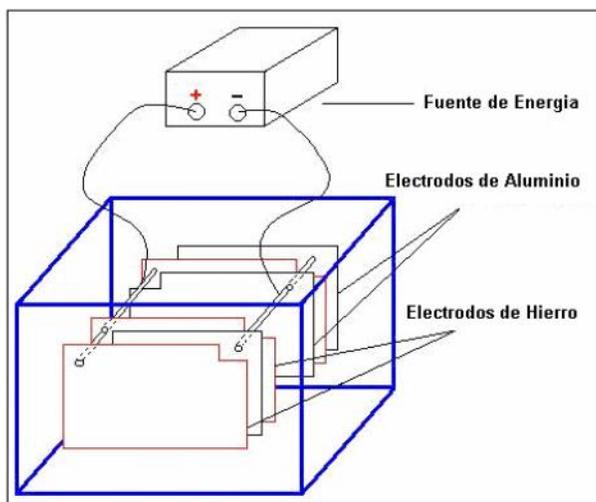
De acuerdo a Posada & Niño (2010) Para que el reactor funcione, se requiere de una fuente externa de energía eléctrica que origina las reacciones electroquímicas como consecuencia del flujo de electrones entre los electrodos metálicos y los compuestos presentes en el efluente, generando los procesos de reducción en el cátodo (conversión de los protones del agua en hidrógeno), y los de oxidación en el ánodo (que produce iones metálicos y oxígeno, este último proveniente de la hidrólisis del agua).

Durante el proceso se generan compuestos que desestabilizan las suspensiones y emulsiones provocando su floculación; de igual manera ocurre una disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución precipitándolos. En los electrodos se generan microburbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos, arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser

removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten. (Morante, 2002)

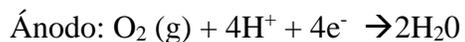
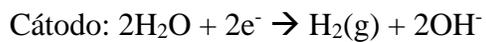
### Figura 9

#### *Reactor Electrolítico*



**Nota.** Fuente: Adaptada de (Morante, 2002, p.2)

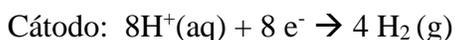
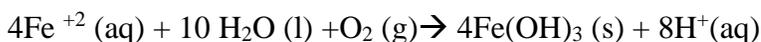
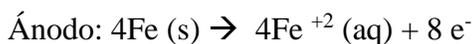
En estos reactores electrolíticos se presentan las siguientes reacciones (Bautista & Cecilia, 2018):



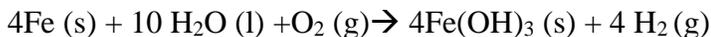
Al realizarse estos procesos electroquímicos en el agua residual, los iones cargados positivamente son atraídos por los hidroxilos cargados negativamente y producen hidroxilos iónicos con una fuerte tendencia a atraer las otras partículas y así producir la coagulación.

Cuando se agrega hierro al agua a tratar, se necesita la formación del hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , en el cual con la formación de los Hidróxidos crearán sustancias activas que favorecen el atrapamiento de los coloides que se encuentran en el agua a tratar. En estos procesos ocurren los siguientes mecanismos de formación (Parpiuzan, 2012):

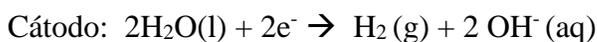
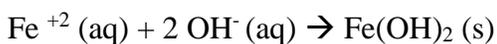
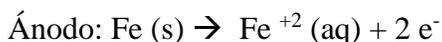
Mecanismo 1: Formación del Hidróxido Férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$



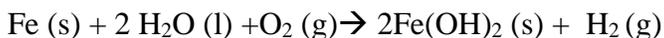
Reacción Global:



Mecanismo 2: formación del Hidróxido Ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$



Reacción Global:



Un aspecto a tener en cuenta en estos procesos de EC, de acuerdo con los estudios de Arango Ruiz (2012) cuando se agrega  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2$  ayuda a generar un aumento en la conductividad del agua residual y así evitar una capa insoluble que se presenta entre los

electrodos por la formación de iones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos puede conducir a la precipitación de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ . (Arango Ruiz, 2012)

En la tabla 4, se resumen los tipos de coagulación existentes:

**Tabla 4**

*Clases de Coagulación*

<b>Clase</b>	<b>Modo</b>	<b>Tipo de Adsorción</b>
<b>I. Adsorción – Desestabilización</b>	Neutralización de la carga Compresión del Doble lecho.	Adsorción Electrostática Adsorción Química.
<b>II. Puente Químico</b>	Unión de partículas por medio de cadenas poliméricas.	Adsorción Química
<b>III. Incorporación</b>	Producción de precipitado químico	No hay

**Nota.** Fuente: (Valencia, 2000, p.28)

***Floculación***

De acuerdo con Lorenzo-Acosta (2006), La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica el coagulante aplicado da lugar a la formación del flóculo, pero para ello es necesario aumentar su tamaño, su peso, su volumen y su cohesión. Para lograrlo se necesita de una agitación homogénea y lenta del conjunto.

Los floculantes que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales, se pueden clasificar en tres grandes grupos y entre ellos encontramos: floculantes inorgánicos tales como el aluminio, floculantes férricos o policloruro de aluminio; y floculantes orgánicos sintéticos, tales como deriva dos de poliacrilamida.(Arcila & Peralta, 2015)

Un dato importante para tener en cuenta es que los coagulantes floculantes orgánicos son amigables con el medio ambiente, porque son biodegradables, con una mejor capacidad de clarificación si se compara con productos inorgánicos utilizados en este proceso, además de destacar sus propiedades antibacterianas en algunos de los productos naturales a utilizar.(Arcila & Peralta, 2015)

El proceso de floculación demora en un rango de 15 -20 min a una hora o tal vez más, la velocidad requiere de mayor atención a la velocidad de la mezcla y la cantidad de energía, la cual deben de disminuir a medida que el flóculo va aumentando. (Nanjan Bellie, 2014)

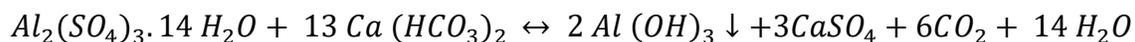
### ***Sedimentación.***

Comprende la precipitación de sólidos, incluyendo los sólidos provenientes de la contaminación de las aguas o los flóculos que se formen de las reacciones de la coagulación.

Por ejemplo, cuando se adiciona las sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados. (Arcila & Peralta, 2015)

En la siguiente reacción tomada de Cárdenas (2000) se puede observar que se adiciona una sal de aluminio (Sulfato de Aluminio) y se agrega bicarbonato para que el agua se alcalina.

En ese pH, se forma un trihidróxido de Aluminio que es el que se precipita y trae consigo los coloides:



### **Factores que Afectan el Proceso de Coagulación Floculación**

Teniendo en cuenta la estabilidad termodinámica, el proceso de Coagulación depende de varios factores, entre los cuales encontramos: PH, temperatura, velocidad de corte y concentraciones del coagulante. (Arcila & Peralta, 2015)

#### ***El pH***

Es uno de los factores más importantes en el proceso de coagulación floculación, si el agua residual está fuera del rango de PH del coagulante que se aplica al tratamiento, esto ocasiona que el coagulante tenga una nula o poca solubilidad, ocasionando que se necesiten mayor cantidad de este y su velocidad sea más lenta. (Fúquene & Yate, 2018,p.4), por tal motivo una dosis baja no permite la neutralidad de las partículas, los microflóculos no se formarán y la turbiedad sigue siendo elevada.

Se debe tener en cuenta que para cada agua el nivel de pH óptimo es diferente y esto se debe a la cantidad de iones y a la alcalinidad presente en ella. Por ejemplo, para las sales de aluminio un pH óptimo sería de 6,5 a 8,0; para las sales de hierro de 5,5 a 8,5.(Cárdenas, 2000). Un PH de 9,0 para un tratamiento donde se emplee sales de aluminio, se experimentará la formación de aluminatos  $(Al_2O_3)^{-3}$ , los cuales presentan cargas negativas y repelan entre ellos, al igual que con los coloides y por ende se forman micro flóculos que no van a sedimentar y al quedar suspendidos en el agua contribuirán con el aumento de la turbidez. (Veliz et al., 2016)

De acuerdo con Flórez (2011), si se adiciona exceso de coagulante, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de micro flóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas y la turbiedad del agua tratada es, igualmente, elevada.

### ***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; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Según el estudio de (Cárdenas, 2000), “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”.

### ***Mezclado***

El proceso de mezclado es muy importante para lograr que el coagulante sea mezclado con el agua, hay que tener en cuenta que las reacciones entre éste y los coloides ocurren casi que de inmediato, por lo tanto, el mezclado no debe ser muy prolongado porque ocasiona que los flóculos formados en las reacciones se rompan y que jamás se vuelvan a unir. (Nieto Orellana & Orellana Ulloa, 2011)

Amorocho & Fernanda (2013) menciona que “hay que tener en cuenta que las reacciones se logran en menos de ocho segundos por precipitación de hidróxidos y en menos de un segundo cuando es realizada por adsorción”.

### ***Cantidad de Coagulante***

La cantidad de coagulante juega un papel muy importante porque si hay poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula y por lo tanto la formación de los micro flóculos es muy escasa y la turbiedad residual es elevada. Por otro lado, una alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula que conduce a la formación de gran cantidad de micro flóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada. (Cárdenas, 2000)

### ***Turbiedad***

La turbiedad se debe a partículas disueltas en el agua como arcilla y minerales, la concentración de coagulante aumenta con la turbiedad del agua y para cada turbiedad hay una dosis óptima de coagulante, sin embargo, si la turbiedad es muy alta las dosis de coagulante aumentan, pues es de esperar colisión entre los coloides, por otra parte, si la turbiedad es muy baja, se requieren menores dosis de coagulante pues hay menor probabilidad de choque entre partículas (Amorocho & Fernanda, 2013).

### ***Sales Disueltas***

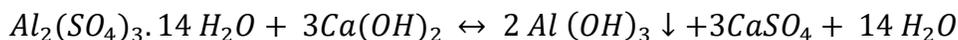
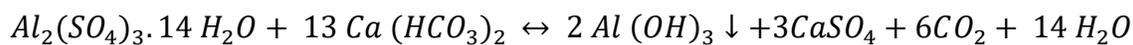
Según Cárdenas (2000) menciona que las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

## Sustancias Químicas Empleadas en el Proceso de Coagulación – Floculación

### *Sales de Aluminio*

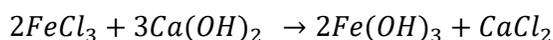
De acuerdo con los estudios realizados por Cárdenas (2000), cuando el sulfato de Aluminio se mezcla con el agua, los iones  $Al^{+3}$  desestabilizan las cargas negativas de los coloides. Entre las principales reacciones del sulfato de aluminio de acuerdo con la alcalinidad del agua, encontramos:



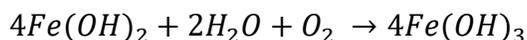
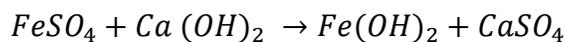
En los procesos de Coagulación floculación se pueden utilizar Sulfato de Aluminio tipo A (Solución al 8%) ó Tipo B (granulado).

### *Sales De Hierro*

Según los estudios de (Vargas-Camareno & Romero-Esquivel, 2006) al adicionar cloruro de hierro (III) en presencia de suficiente hidróxido de calcio, se forma el hidróxido de hierro (III) que también arrastra las impurezas:

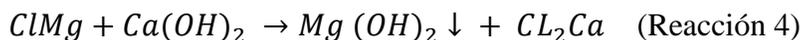
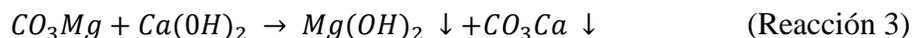
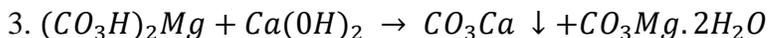
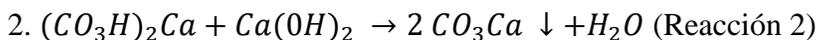
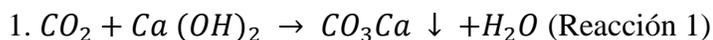


Finalmente, en el caso de utilizar sulfato de hierro (II) se debe llevar a cabo la oxidación del hierro (II) a hierro (III) para obtener el hidróxido de hierro (III):



### ***Sales de Calcio***

De acuerdo con los estudios realizados por (Espígares & Pérez, 2012), el calcio es utilizado en el ablandamiento del agua y se añade en hidróxido cálcico dando las siguientes reacciones:



En las reacciones anteriores se puede observar que:

- a) El calcio es eliminado del agua en forma de carbonato cálcico ( $CO_3Ca$ ), y el magnesio en forma de hidróxido de magnesio,  $Mg(OH)_2$ , ambos compuestos insolubles en agua.
- b) El anhídrido carbónico influye en la dosis de cal necesaria para el tratamiento, no porque afecte a la dureza, sino porque representa un consumo adicional de cal independientemente de la dureza, en el ablandamiento de aguas.

c) La tercera reacción formulada es doble, ya que el carbonato de magnesio no es suficientemente insoluble, siendo necesaria su transformación en hidróxido de magnesio.

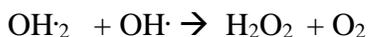
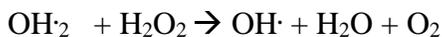
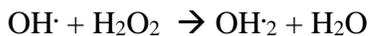
d) Como puede observarse en las reacciones (4), mediante el tratamiento con cal se elimina únicamente dureza temporal, es decir, dureza en forma de bicarbonatos, ya que la dureza magnésica se transforma en dureza cálcica. Esto quiere decir que el ablandamiento con cal podrá ser aplicado a aquellas aguas que presenten un contenido suficiente de bicarbonatos. (Espígares & Pérez, 2012)

### ***Peróxidos***

Muchas industrias entre sus aguas residuales tienen la presencia de organoclorados en los efluentes y es preocupante debido a los grandes riesgos en términos de mutagénicos, cancerígenos y tóxicos provocados al ecosistema acuático. Lo que ha se ha convertido en un asunto de relevancia actual, debido principalmente a: recalcitrancia para la degradación biológica, toxicidad para las especies acuáticas, genotoxicidad y potencialidad de acumularse en los organismos. (Rodríguez, Botelho & Cleto, 2007) (Rodríguez et al., 2008b)

En el estudio realizado por Rodríguez, Botelho & Cleto (2008) habla del Fotoclivaje (rompimiento) del peróxido de hidrogeno el cual puede en algunas situaciones, llevar a la oxidación parcial de compuestos recalcitrantes en elementos más biodegradables, mejorando la eficiencia en un posterior tratamiento biológico. El mecanismo propuesto para la fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es el rompimiento de la molécula por fotones produciendo dos radicales OH•, tal como se observa en la Ecuación.





Generalmente, se utilizan para la disociación del peróxido de hidrogeno lámparas UV con emisión máxima de 254 nm, debido a que la absorción del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alcanza su máximo a los 220 nm. En esta misma investigación, se destaca el gran poder del peróxido de hidrógeno para remover los compuestos en mención, pero también se dan unas recomendaciones que serán discutidas con más detenimiento más adelante.

## **Polímeros Naturales Empleados en el Proceso de Coagulación –Floculación**

### *Polímeros*

Los polímeros resultan de monómeros que se acoplan, dando lugar a un alto peso molecular en el intervalo 10<sup>4</sup> a 10<sup>6</sup> Da. Los polímeros tienen diferente peso molecular, estructura, composición, y tipo de carga. La cantidad de carga depende de las características de la ionización de cada grupo funcional, la copolimerización y la substitución de grupos en caso presentarse dicha substitución.

Entre las acciones que presentan los polímeros, se pueden encontrar:

1. Coagulación, son excelentes coagulantes porque disminuyen la carga de las partículas, especialmente sucede en los polielectrolitos catiónicos.

2. Forman puentes entre las partículas, como se evidencia cuando se utilizan polímeros aniónicos y no iónicos.

3. coagulantes y formadores de puentes, entre ellos se encuentran los polielectrolitos catiónicos, en especial los de alto peso molecular, los cuales poseen una alta efectividad para inducir a la floculación. (Trujillo et al., 2014)

De acuerdo con (Fúquene & Yate, 2018), los polímeros presentan propiedades muy importantes en el proceso de coagulación floculación, entre las que se destacan:

- Son biodegradables y amigables con el medio ambiente.
- Su carácter orgánico que minimiza la posible modificación del pH y la conductividad en el agua ya que no consumen alcalinidad del medio.
- La eliminación total del incremento de sales en el agua.
- Una mayor eficiencia traducida en dosis bajas de coagulante que consiguen aumentar la velocidad de decantación, disminuir los tiempos de coagulación y mejorar la densidad del coagulo reduciendo de manera significativa la cantidad de floculante.
- Presenta ventajas económicas relacionadas con la reducción de costes asociados al mantenimiento de las instalaciones debido a que se reduce significativamente la corrosión que producen las sales usadas convencionalmente; por su eficiencia también se reduce o elimina por completo el uso de floculantes lo cual se traduce en menores costos.

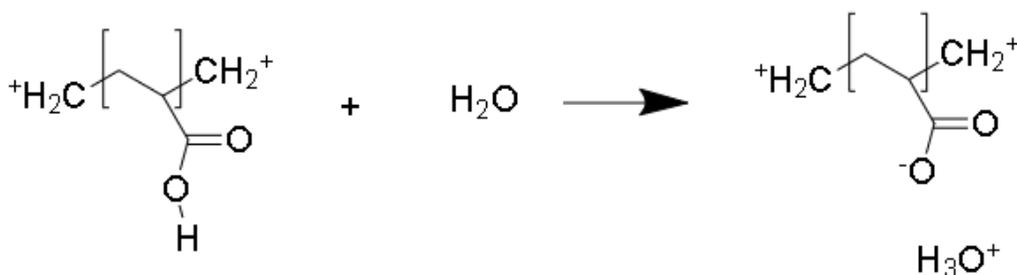
### ***Clasificación de los Polímeros***

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: polímeros naturales y polímeros sintéticos. Los primeros son propios de las reacciones bioquímicas de plantas y animales, que incluyen productos alimenticios con gran carga de proteínas y/o carbohidratos los cuales presentan una gran solubilidad en agua (Guzmán et al., 2013); los segundos son compuestos de tipo orgánico, los cuales son realizados en el laboratorio originados a partir del petróleo y el carbón, la gran ventaja es que al sintetizarse se pueden utilizar la cantidad de monómeros necesarias. (Trujillo et al., 2014)

En el proceso de coagulación-floculación, se utilizan polímeros sintéticos que se encuentran cargados positiva, negativa y neutramente son conocidos como los polielectrolitos, tienen un gran peso molecular y son eficaces en un amplio rango de pH aunque pierden solubilidad en rangos muy bajos, y se solubilizan al aumentar su grado de ionización. Por ejemplo, el ácido acrílico que en presencia de agua los hidrógenos del grupo ácido se disocian, uniéndose con las moléculas de agua y produciendo  $\text{H}_3\text{O}^+$  (Díaz Silvestre, 2018), tal como se indica en la siguiente figura:

**Figura 10**

*Representación de la disociación del poli(Ácido acrílico).*



**Nota.** Fuente: (Díaz Silvestre, 2018, p.26)

De acuerdo con la figura 10, el polímero disociado quedará con un cúmulo de cargas negativas, las cuales repelerán entre sí y el mismo cambia de forma, por lo tanto el polímero pasa de una forma ovillo con cadenas enrolladas a una forma extendida y ocupando mayor espacio, lo que ocasiona que la solución quede más espesa, tal cual como lo muestra la figura 11:

**Figura 11**

*Representación esquemática de un polielectrolito que de una forma de ovillo*



**Nota.** Fuente: Adaptada de (Díaz, 2018, p.27).

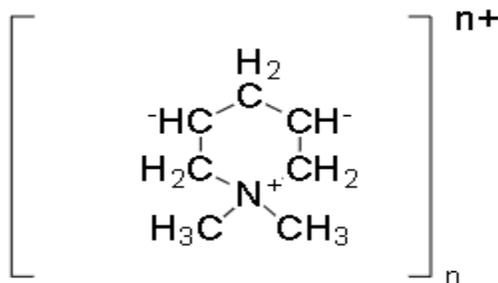
De acuerdo con estudios realizados por Martínez & González (2012), se clasifican según su carga en:

- Catiónicos: Estos polímeros tienen carga positiva y cuando entran en contacto con el agua, se originan aniones (+), los cuales permiten remover partículas con cargas negativas. Son más eficaces a pH bajo.

Entre estos polímeros, los más utilizados son: polietilamina, polimetacrilato), copolímeros de acrilamida con grupos amonios cuaternarios. (Gómez Puentes, 2005)

**Figura 12**

*Polielectrolitos catiónicos*



**Cat – flocc (polidialildimetilamonio)**

**Nota.** Fuente: Adaptado de (Martínez & González, 2012, p.43)

- Aniónicos: Son polímeros que presentan una carga negativa y que al entrar en contacto con el agua, va a formar cationes y por lo tanto van a remover las partículas que se encuentran con las cargas positivas, este tipo de aniónicos, son más efectivos en pH altos. (Martínez García & González Silgado, 2012).

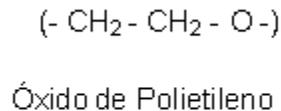
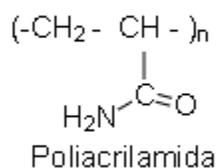
Entre estos polímeros los más usados son: copolímero de acrilamida-acrilato, poliacrilamida parcialmente hidrolizada, polisulfónicos. (Gómez Puentes, 2005)

- No iónicos: son polímeros neutros y presentan una gran ventaja porque al entrar en contacto con el agua, forman iones positivos y negativos. Aunque su desventaja radica en la exigencia de dosis mayores para obtener resultados similares a los otros polímeros.

Los polímeros no iónicos más utilizados son: poliacrilamidas, polímeros del óxido de etileno. (Gómez Puentes, 2005)

### Figura 13

*polieléctricos no iónicos.*



**Nota.** Fuente: Adaptado de (Martínez & González, 2012, p.44)

De acuerdo con la teoría, se ha comprobado que la repulsión electrostática, influye notoriamente en la absorción de un ion sobre la superficie de un electrodo que tenga una carga

con igual signo del ion. Pero, con el uso de polímeros sintéticos se ha demostrado que en varias reacciones químicas espontáneas, se presentan entre iones con igual signo y por lo tanto se puede deducir que este tipo de interacciones es más de tipo químico que coulombico, es decir que los polímeros aniónicos son efectivos para coagular coloides con cargas negativas y aunque este mecanismo no pueda ser explicado con los modelos de neutralización de cargas, se ha desarrollado la teoría del puente para explicar este tipo de comportamiento.(Gómez Puentes, 2005)

### ***Mecanismos de Coagulación y Floculación con Polímeros***

De acuerdo con los estudios realizados por (G. Martínez & González, 2015), entre Los principales mecanismos de coagulación – floculación que se pueden presentar en los polímeros, se encuentran:

- Interacción electrostática: este tipo de interacción es permitido por las diferencias de las cargas entre el polielectrolito y el coloide. Cuando el coloide se neutraliza, se termina este tipo de interacción, ocurriendo la reducción de la carga superficial de las partículas y entre tanto la reducción de la repulsión eléctrica entre el coloide y el polímero.(G. Martínez & González, 2015)

- Enlace de Hidrógeno: en este tipo de enlace los polímeros son adsorbidos por las superficies de los coloides a través de los enlaces de hidrógeno. Tal es el caso de la poliacrilamida catiónica (PAM), la cual se adsorbe a través de los grupos amidas que presenta en su estructura con algunos oxígenos como por ejemplo el que se encuentra en la sílice provenientes de los grupos hidroxilos.(G. Martínez & González, 2015)

- Enlace Iónico: En algunos casos donde existe la presencia de iones divalentes como el  $\text{Ca}^{2+}$  se presenta que los polielectrolitos aniónicos se adsorben en superficies con cargas negativas, porque estos iones ( $\text{Ca}^{2+}$ ) puede actuar como puente entre los grupos aniónicos en el polímero y la carga negativa presente en la superficie del coloide. (Martínez García & González Silgado, 2012)

### ***Polímeros Utilizados en la Coagulación***

Los polímeros naturales son obtenidos a través de métodos fisicoquímicos y físicos, los cuales provienen de las reacciones bioquímicas de las plantas y animales y pueden estar constituidos por diferentes tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glúcidos, ect) y proteínas (caseína, olieretina, gelatina, etc). Entre las grandes ventajas de estos polímeros se destacan su baja toxicidad y además su bajo costo, lo cual lo hace más económico que los polímeros sintéticos. (G. Martínez & González, 2015)

Entre los polímeros naturales más utilizados en el proceso de coagulación – Flocculación, se enuncian en tabla número 5:

**Tabla 5**

*Polímeros Naturales con Propiedades Coagulantes - Floculantes.*

<b>Nombre Común</b>	<b>Parte de donde se extrae</b>	<b>Parte de donde se obtiene</b>
<b>Aginato de Sodio</b>	Algas pardas marinas	Toda la planta
<b>Goma de Tuna</b>	Tuna o nopal	Hojas o pencas
<b>Almidones solubles en agua fría</b>	Maíz, papa, yuca, trigo	Grano o Tubérculo
<b>Gomas de semilla de nirmalí</b>	Nirmalí	Semillas
<b>Pulpa de algarrobo</b>	Algarrobo	Corteza de árbol
<b>Gelatina común</b>	Animales	Huesos y residuos de animales
<b>Carboximetil celulosa</b>	Árboles	Corteza del árbol
<b>Goma de guar</b>	Planta de guar	Semilla
<b>Goma de red sorrela</b>	Red sorrela	Semilla
<b>Silice Activada</b>	Silicato de Sodio	Activación con un ácido
<b>Lenteja</b>	Planta	Semillas
<b>Tamarindo</b>	Árbol de fruto tropical	Semillas
<b>Fenogreco, alholva</b>	Planta con flor	Semillas

*Nota. Fuente: (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975; citado por Martínez & González, 2015, p.62)*

### *El Almidón*

El almidón lo encontramos en gran abundancia en el reino natural, el cual constituye una de las mayores reservas de carbohidratos de las plantas y su proceso de extracción se realiza con gran facilidad, sin importar su fuente. (Campos et al., 1991)

**Tabla 6**

*Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y cenizas.*

<b>Componente</b>	<b>Composición (%)</b>			
	<b>Maíz</b>	<b>Trigo</b>	<b>Yuca</b>	<b>Papa</b>
<b>Almidón</b>	55,5	64,0	21,5	20,0
<b>Proteínas</b>	8,2	12,5	1,1	2,1
<b>Fibras</b>	2,4	2,5	1,1	1,1
<b>Ceniza</b>	1,5	1,7	0,5	0,9

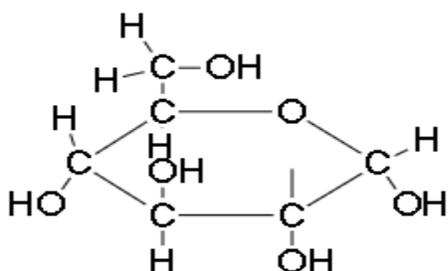
*Nota. Fuente: (Campos et al., 1991, p.38)*

De acuerdo con la información suministrada en la tabla 6, se evidencia que el maíz y el trigo son los productos que poseen mayor cantidad de almidón en sus compuestos. En el almidón se encuentran dos sustancias con propiedades diferentes: amilosa y amilopectina, las cuales para su estudio han sido bastante complejo. Por ejemplo, en presencia de yodo la amilosa arroja un color azul intenso y con la amilopectina un color violeta. (Campos et al., 1991)

En la figura 14 - 16 se muestran los principales compuestos del almidón (Kerr,1950)

#### Figura 14

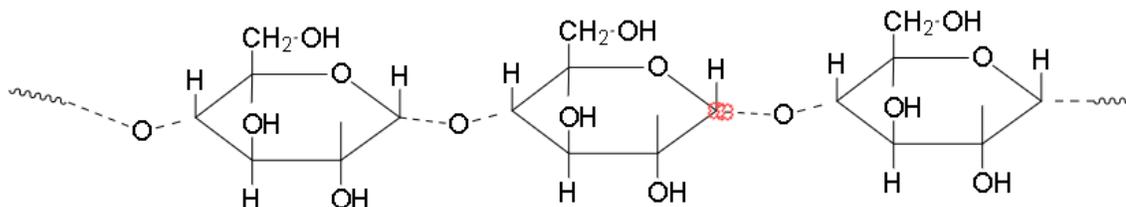
*Estructura de la glucosa.*



**Nota.** Fuente: *Modificada de (Ker,1950, P.39)*

#### Figura 15

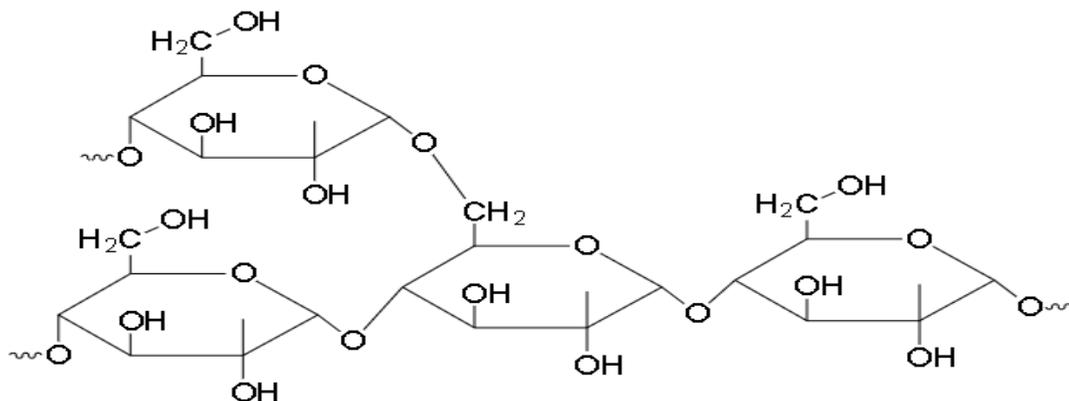
*Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilosa.*



**Nota.** Fuente: *Modificada de (Ker,1950, P.39).*

## Figura 16

*Estructura (simplificada) de las moléculas ramificadas de almidón: amilopectina*



**Nota.** Fuente: Adaptada de: <http://chocolatisimo.com/amilosa-y-amilopectina/>

## *Quitosano*

De acuerdo con los estudios de Tafur Bravo & Quevedo Salas (2014), este polímero se encuentra principalmente en el exoesqueleto de los artrópodos, en la piel de los nemaltemitos y en las membranas celulares de bacterias y hongos.). presenta una alta efectividad en la remoción de materia orgánica, iones metálicos, decoloración de efluentes y en el tratamiento de lodos.(citado en G. Martínez & González, 2015)

## *Galactamosas*

Se encuentran en los endospermas de ciertas leguminosas: fonogreco, algarrobo, mezquite y la goma guar. Se caracterizan por ser polisacáridos con estructuras lineales y de carga neutra. Son muy utilizados en los procesos de floculación. La goma guar se obtiene de la semilla de la planta guar, *Cyamopsis tetragonolobus*, se caracteriza porque posee alto peso molecular y contiene un gran número de amosas y galactosas unidas. (G. Martínez & González, 2015)

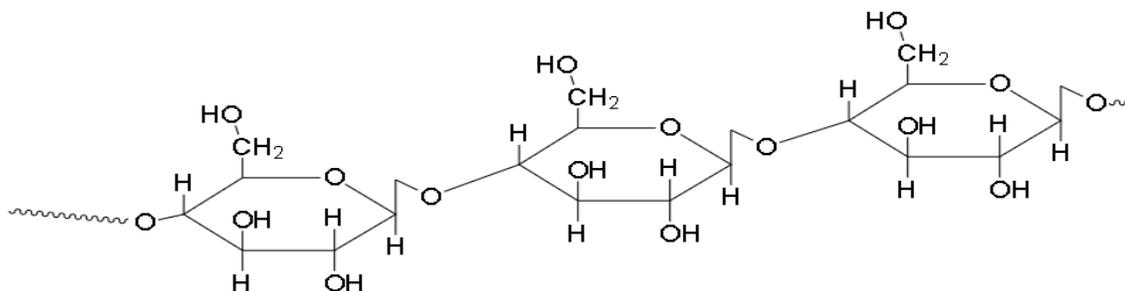
Continuando con los estudios de Martínez & González (2015), la goma de algarrobo es obtenida de la *Cetonia siliqua* y es usada por acelerar el proceso de sedimentación y la goma de mezquite se obtiene del árbol *Prosopis juliflora*, el cual tiene como compuestos por un polisacárido de galactomananas con unidades de manosas y galactosas, contiene propiedades emulsificantes

### ***Derivados de la Celulosa***

Según Varela-Salazar (1983) la celulosa es un polímero poli disperso de alto peso molecular compuesto de largas cadenas de unidades D-glucosa unidas por enlaces  $\beta$  1-4 glicosídicos ( citado en G. Martínez & González, 2015).

### **Figura 17**

*Estructura de la celulosa*



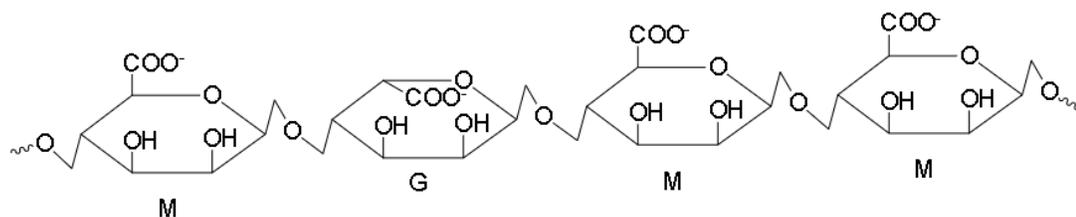
**Nota.** Imagen adaptada de: <https://sites.google.com/site/bioqlaboratorios/azucares-reductores>

### ***Alginato de Sodio***

Está constituido por un alto porcentaje de polisacáridos, el cual es obtenido a través de las algas marinas pardas, es utilizado como ayudante en el proceso de floculación y es un producto no tóxico, pues es utilizado en la industria alimentaria. (G. Martínez & González, 2015)

**Figura 18**

*Estructura del alginato de sodio.*



**Nota.** Fuente: Adaptada de (Fernández et al., 2015, p.3)

En estudios realizados en Inglaterra, se ha demostrado que el alginato de sodio presenta buenas remociones de turbiedad y coloides en las aguas tratadas. (Arboleda & Kirchmer, 1975)

### Marco Legal

Teniendo en cuenta la Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, expedida por el Ministerio de Medio Ambiente en Colombia, se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, los cuales se establecen de acuerdo a cada actividad del sector económico y que se pueden resumir algunos parámetros claves en la siguiente tabla 7:

**Tabla 7**

*Valores Máximos permisibles en los Vertimientos de Aguas Industriales.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Máximo Permitido</b>
<b>pH</b>	Unidades de pH	6,0 a 9,0
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	150,0
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>6</sub>)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	50,0
<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	mg/L	50,0
<b>Sólidos Sedimentables (SSED)</b>	mg/L	1,0
<b>Compuestos Semivolátiles Fenólicos</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos del Nitrógeno</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos del Fósforo</b>	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
<b>Cianuro Total (CN<sup>-</sup>)</b>	mg/L	0,1
<b>Cloruros (Cl<sup>-</sup>)</b>	mg/L	250,0
<b>Fluoruros (F<sup>-</sup>)</b>	mg/L	5,0
<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	mg/L	250,0
<b>Sulfuros (SO<sub>2</sub><sup>2-</sup>)</b>	mg/L	1,0
Metales y Metaloides		

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Máximo Permitido</b>
<b>Aluminio (Al)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Antimonio (Sb)</b>	mg/L	0,30
<b>Arsénico (As)</b>	mg/L	0,10
<b>Bario (Ba)</b>	mg/L	1,00
<b>Berilio ( Be)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Boro (Bo)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Cadmio (Cd)</b>	mg/L	0,01
<b>Cinc (Zn)</b>	mg/L	3,00
<b>Cobalto (Co)</b>	mg/L	0,10
<b>Cobre (Cu)</b>	mg/L	1,00
<b>Cromo (Cr)</b>	mg/L	0,10
<b>Estaño (Sn)</b>	mg/L	2,00
<b>Hierro (Fe)</b>	mg/L	1,00
<b>Litio (Li)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Manganeso (Mn)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Mercurio (Hg)</b>	mg/L	0,002
<b>Molibdeno (Mo)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Níquel (Ni)</b>	mg/L	0,10
<b>Plata (Ag)</b>	mg/L	0,20
<b>Plomo (Pb)</b>	mg/L	0,10
<b>Selenio (Se)</b>	mg/L	0,20
<b>Titanio (Ti)</b>	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Vanadio (V)</b>	mg/L	1,00

*Nota. Fuente: (Medio Ambiente, 2015, p.8.)*

En la Resolución 2115 del 22 de Junio del 2007, se dan las orientaciones puntuales para las características y valores permisibles para la potabilización del agua para el consumo humano, las cuales se resumen en la siguiente tabla número 8:

**Tabla 8**

*Características Fisicoquímicas del Agua para Consumo Humano*

<b>Características Físicas</b>	<b>Expresadas como</b>	<b>Valor Máximo Aceptable</b>
<b>Color aparente</b>	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
<b>Olor y Sabor</b>	Aceptable o no Aceptable	Aceptable
<b>Turbiedad</b>	Unidades Nefelométricas d Turbiedad (UNT)	2
<b>Características Químicas</b>		
<b>pH</b>	Unidades del pH	6.5 a 9.0
<b>Antimonio</b>	Sb	0,02 mg/L
<b>Arsénico</b>	As	0,01 mg/L
<b>Bario</b>	Ba	0,7 mg/L
<b>Cadmio</b>	Cd	0,003 mg/L
<b>Cromo Total</b>	Cr	0,05 mg/L
<b>Cianuro Libre y Disociable</b>	CN <sup>-</sup>	0,05 mg/L
<b>Cobre</b>	Cu	1,0 mg/L
<b>Mercurio</b>	Hg	0,001 mg/L
<b>Níquel</b>	Ni	0,02 mg/L
<b>Plomo</b>	Pb	0,01 mg/L
<b>Selenio</b>	Se	0,01 mg/L
<b>Trihalometanos Totales</b>	THMs	02 mg/L
<b>Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)</b>	HAP	0,01 mg/L

*Nota. Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente, 2007, p.3-8)*

Las características Químicas del agua que se nombran en la tabla 8, hacen referencia a los elementos y compuestos químicos que pueden presentar un alto riesgo para la salud humana si se presentan por encima del límite máximo aceptable.

En el uso del tratamiento de estas aguas para el consumo humano, se puede utilizar sales de hierro y aluminio, del cual se pueden derivar compuestos de Aluminio en forma  $Al^{3+}$  y será aceptable el valor de 0,2 mg/L y para las sales de Hierro de 0,3 mg/L.(Medio Ambiente, 2007)

### Antecedentes

El uso de polímeros naturales en el proceso de coagulación floculación ha sido tema de investigación durante muchas décadas con el objetivo de reducir costos en el tratamiento de aguas con productos químicos y las enfermedades que suelen producir las trazas de aluminio en el agua tratada. En la tabla 8 se enumeran algunos antecedentes que se dan en este proceso:

**Tabla 9**

*Antecedentes de uso de Polímeros Naturales en el proceso de Coagulación - Floculación en el tratamiento de aguas.*

<b>Año/ Título</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Referencia</b>
<b>2015. Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua.</b>	La Moringa Oleífera y diferentes tipos de Cactus presentan gran capacidad de coagulación y a la vez con poder de desinfección de la actividad microbiana.	(Arcila & Peralta, 2015)
<b>Almidón de yuca ( Manihot Esculenta Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticos.</b>	En esta investigación se realiza la mezcla de almidón de yuca procesado con sales químicas ( $Al_2(SO_4)_3$ , $FeCl_3$ y $Ca(OH)_2$ ), obteniendo mejor remoción en la mezcla de 750 mg/L de almidón y 250 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ , removiendo el 75% de turbiedad y 78% del color.	(Alcocer et al., 2018)
<b>2012. Evaluación de la eficiencia de la utilización de Semillas de Moringa Oleifera como una alternativa de Biorremediación en la purificación superficiales del caño cola de Pato ubicado en el sector</b>	En este estudio se evaluó la efectividad de la Moringa Oleifera en la remoción de turbiedad de agua de su región. El agua que se extrajo del río Cola de Pato en las Acacias, contaba con una turbidez inicial de 230 NTU y los resultados demostraron una remoción de turbidez de 84.34% (230 NTU a 36NTU).	(Melo & Turriago, 2012)

<b>Año/ Título</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Referencia</b>
<b>rural del municipio de las Acacias.</b>		
<b>2013. Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales.</b>	En sus estudios se comparó la efectividad de la M. Oleifera con tres tipos de soluciones: En agua con cloruro de Sodio, agua de mar y agua destilada. Los resultados demostraron que la mayor efectividad se dio en el agua con contenido del NaCl (92.03%), agua del mar (90.72%) y agua destilada (56.02%).	(Arreola & Canepa, 2013)
<b>2012. Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants</b>	Entre sus estudios se evaluaron la remoción del color rojo Congo con el uso de semillas de Surjana (Moringa), semillas de maíz y chitosan, al mismo tiempo evaluaron factores como el pH, tiempos de coagulación y floculación, Dosis de Coagulante. Entre los resultados reportados se encuentran: 98.0% para la Surjana,. 94.5% del chitosan y 89.4% para la semilla de maíz.	(Patel & Vashi, 2012)
<b>2009. Potential of using plant extracts for purification of Shallow well water in Malawi</b>	En esta investigación se llevaron a cabo ensayos en laboratorio con agua recogida de cinco posos de Malawi y les agregaron extractos de Moringa Oleifera, Jatropha curcas y Goma de Juar. Los resultados de esta investigación arrojaron que entre más turbia el agua, más eficiencia se lograba con los coagulantes. Es decir, que en aguas con turbidez superior a 49 NTU, se lograba una eficiencia superior al 90%.	(Pritchard et al., 2009)
<b>2018. Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo, Atlántico</b>	En esta investigación se utilizó agua de la Ciénaga de Malambó en el Atlántico y se comparó la efectividad del Sulfato de Aluminio con la de las semillas de la Moringa Oleifera, obteniendo el 96% de eficiencia de la remoción de turbidez del Sulfato de Aluminio y del 64% con la Moringa O.	(Meza-Leones et al., 2018)
<b>2019. Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con</b>	Estos estudios se realizaron con agua residual y en prueba de jarras, evaluando la turbidez, el color, DQO, DBO, Sólidos Suspendidos y Totales. Los resultados que dieron el uso de Opuntia Ficus Indica fueron: 77,8% en turbidez, 51,8% en color,	(Chuiza-Rojas et al., 2019)

<b>Año/ Título</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Referencia</b>
<b>Tuna (Opuntia ficus indica)</b>	26,8% en DQO, 13,9% en DBO, 31,0% en SS, 26,4% en ST y 99,96% en CF, con una dosis de 20 ml del coagulante al 2% (400ppm).	
<b>2017. Uso de las Semillas de Moringa oleifera como coagulante en el tratamiento de efluentes provenientes del lavado de vehículos.</b>	En esta investigación se utilizó agua residual proveniente del lavado de carros, el cual contiene alta carga de contaminantes. Este estudio se llevó a cabo en pruebas de jarra a una agitación de 100 rpm en un intervalo de un minuto, 40 rpm a 15 minutos y la sedimentación demoró 30 minutos. Se utilizaron 900 mg/L del coagulante y se obtuvieron las siguientes eficiencias: Los porcentajes de remoción de color, turbidez, DQOT y sólidos totales fueron: 92,5%, 94,57%, 90,41% y 86,77%, respectivamente	(González et al., 2017)
<b>2017. Coagulantes naturales extraídos de Ipomea incarnata en el tratamiento de aguas residuales industriales en Cartagena de Indias</b>	Para esta investigación se comprobó la eficiencia de la Ipomea incarnata en el tratamiento de aguas residuales industriales, obteniendo una reducción de la turbidez del 99.18%, el cual resultó siendo muy efectivo a diferencia de los químicos: Sulfato de Aluminio (99.06%), Sulfato de Cobre (98.06%), sulfato de Hierro (99.11), Ipomea Incarnata (99.18).	(Martínez et al., 2017)

*Nota. Fuente: Propia del autor.*

### **Aspectos Metodológicos**

De acuerdo con la definición de Kaufman (1997), una monografía se define como la “estructura en forma analítica y crítica de la información recogida en distintas fuentes acerca de un tema determinado”(p.39) para esta monografía se tuvieron en cuenta documentos provenientes de revistas científicas, trabajos de grado, documentos de rigor científico que aportaron un amplio espectro de la información respecto al estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua

En este orden de ideas, el desarrollo de esta monografía es de compilación bibliográfica donde se analizan los resultados de las investigaciones bibliográficas para dar desarrollo al tema en cuestión.

### **Enfoques de Investigación**

De acuerdo con Anguera (1986) la investigación cualitativa se fundamenta en una descripción contextual y detallada de registros directos y documentales, utilizando entre sus técnicas la observación, entrevistas, análisis de contenidos y estudios de caso- también presentan características propias como el descubrimiento de una teoría sustantiva, llegando a la formación de conceptos.

Entre las técnicas que presenta la investigación cualitativa, se encuentran la directa y la indirecta. La directa implica una transducción de la realidad, el cual goza de gran nivel de la observación, el fin de ella es describir la situación tal cual como es observada; en la indirecta la observación no constituye un bloque compacto, sino que incluye tanto el registro de conductas encubiertas que son susceptibles de elaboración de informes -por ejemplo, los análisis a partir de

indicadores- como el análisis de contenido llevado a cabo a partir de textos documentales (cartas, autoinformes, discursos, etc.)se encuentra el análisis de textos documentales. (Anguera, 1986)

En este orden de ideas, esta monografía tiene un enfoque de investigación cualitativo, que se fundamenta en la recogida, análisis y estructuración de la información de forma documentada, sin presentar mucho contacto con el objeto de estudio y donde el análisis de la información se presenta a partir de textos documentales.

### **Tipo de Investigación**

Zorrilla (1993) define la investigación documental como: “aquella que se realiza a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, constituciones, etc.)”(p.43) también se puede definir como la serie de métodos y técnicas de búsqueda y almacenamiento de la información contenida en los documentos y la presentación de la misma sistemática, coherente y argumentada de la misma. (Tancara Q, 1993)

### **Técnicas de Investigación**

La técnica de investigación documental empleada en esta monografía “Estudio sobre la combinación de mezclas naturales y químicas para el proceso de coagulación/floculación en la remoción de la turbidez del agua desde una perspectiva química en el tratamiento del agua” consiste en la consulta de libros, revistas científicas, trabajos de grado y otros artículos científicos que le aportan argumento, análisis y un carácter científico a la respuesta del tema en mención.

En este orden de ideas se realizaron los siguientes pasos para el desarrollo de la monografía, de acuerdo con Morales (2003):

1. Selección y delimitación del tema: se limita el tema con los objetivos que se desean alcanzar y se puntualiza el problema a resolver, además de resaltar el propósito que se logra con el estudio de la monografía.

2. Acopio de la información o fuentes de información: Después de seleccionado el tema, sus objetivos y la pregunta a tratar, se acopia la información que servirá para dar rigor científico a los resultados de la monografía.

3. Organización de datos y elaboración de un esquema conceptual del tema: Se hace dicho esquema con el fin de facilitar la recolección de los datos y darle cuerpo a la monografía.

4. Análisis de los datos y organización de la monografía: se tabulan y analiza la información recogida de las diferentes fuentes de investigación para cumplir con el objetivo del tema de estudio.

5. Redacción de la monografía y presentación final: Después de consultada la información que permite dar respuesta al problema de la monografía, se procede a redactar el documento final y posteriormente su sustentación.

Para el desarrollo de la investigación se buscó la información en varios de los buscadores que se encuentran en la red, como lo son: base de datos y compilación de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, así como los buscadores académicos Dialnet, Redalyc, Google académico, Scielo, los datos obtenidos de dichas investigaciones formaron parte del cuerpo conceptual y el resultado de cada uno de los objetivos que dieron forma y fuerza a la monografía.

**Tabla 10***Resultados de la Búsqueda de Información.*

<b>Motor de búsqueda</b>	<b>Resultados</b>
<b>google Académico</b>	20.400
<b>Repositorio unad</b>	2.207
<b>Dialnet</b>	142
<b>Redalyc</b>	110
<b>Scielo</b>	11

*Nota. Fuente: propia del autor*

De acuerdo con la tabla 10, se muestra que existe gran cantidad de información para la investigación documental de la monografía, muchos documentos fueron descartados por su antigüedad, por falta de información necesaria para el desarrollo de la monografía; otras fueron utilizadas en la parte teórica y muchas en el resultado de los objetivos, para lograr cumplir con los objetivos se tuvieron en cuenta con unos criterios de búsqueda, así como se enumeran a continuación:

***Criterios de Búsqueda***

1. Revistas, artículos, tesis, trabajos de grado y postgrado sobre los procesos de floculación y coagulación, con tiempo no mayor a 10 años.
2. Investigaciones Científicas sobre los polímeros Naturales y combinaciones con productos químicos utilizados en los procesos de Coagulación. Floculación entre los años 2.010 y 2020.

## **Resultados de Efectividad en la Mezcla de Polímeros y Sustancias Químicas en la Eliminación de la Turbiedad del Agua a través del Proceso de Coagulación-Floculación.**

Siguiendo con los objetivos propuestos de esta investigación documental y de acuerdo con la información consultada a través de documentos científicos, artículos, entre otros, se analizaron y se comparte la información pertinente al logro del objetivo propuesto.

En los estudios realizados por Alcocer et al., (2018) se evaluó la efectividad del almidón de yuca ( *Manihot Esculenta Crantz*) con la combinación de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para remover los parámetros de color y turbidez. Se realizó una experimentación con agua turbia que presentaba las siguientes características:

- Temperatura: 24.99 °C
- Turbiedad, 18.97 NTU
- Color: 1114.25 UC
- pH: 7.66 UpH

Entre sus experimentos, trataron el agua inicialmente con compuestos químicos y dieron los siguientes resultados: con el  $\text{FeCl}_3$  se utilizaron 300 mg/L y se removi6 el 91.2% de turbiedad (3.6 NTU) con concentración inicial de 41 NTU; el resultado obtenido con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  fue de 5.4 NTU (87.9%). con una turbidez inicial de 44.7 NTU y se utilizaron 400 mg/L del compuesto; otra de las aguas iniciaron con una concentración de 74.6 NTU a la cual se le agregaron 300 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y la turbiedad final fue de 17.8 NTU (76.1%).(Alcocer et al., 2018)

De acuerdo con los resultados obtenidos en dicha investigación, la mezcla de sales metálicas y el almid6n de yuca que mejor resultados obtuvieron, fueron los siguientes:

- 250 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  + 750 mg/L del almid6n, obteniendo un 75% de remoci6n de la turbiedad y un 78% de remoci6n del color, con una turbiedad inicial de 24 NTU y final de 6NTU; el color inicial fue de 958UC y la final de 210 UC.

- La mezcla de 250 mg/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y 250 mg/L de almidón, con turbiedad inicial de 23.9 NTU y color inicial de 1430 CU, logró remover el 34.3 % de turbiedad y 67.6 % del color, es decir, se redujo la turbiedad hasta 15.7 NTU y el color hasta 453 CU, siendo la segunda mezcla con mejor efectividad.(Alcocer et al., 2018)

De acuerdo con los estudios realizados por Trujillo et al.,(2014) se evaluaron los parámetros de pH, cantidad de coagulante, velocidad de mezcla rápida y lenta; donde se evaluó el almidón de plátano mezclado con Sulfato de Aluminio y los resultados demostraron una mayor efectividad para los siguientes factores de pH a 5, una mezcla de 50:50 porcentaje en peso de la combinación de almidón y sulfato de aluminio líquido porque de acuerdo con la experimentación el  $\text{Al}_2(\text{SO}_3)_4$  granulado no se realizó diluido y se alteraron los resultados; velocidad de mezcla rápida de 150rpm, velocidad de mezcla lenta de 20rpm.

El almidón de plátano ha sido un buen floculante aunque presentó una sedimentación lenta en el proceso de clarificación en aguas con una turbidez de 150 NTU y su concentración final fue de 3.9 NTU (97.4%).(Trujillo et al., 2014)

En los estudios de Rivas & Antonio, (2009) se utilizó la mezcla del cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) en cantidad de 20 mg/L con 5mg/L de hojas de Fique, en un pH de 4.62, temperatura de 18.5 °C, sólidos disueltos de 1487 ppm y DQO 15367 mg/L, se realizaron diferentes ensayos para determinar la cantidad óptima de la mezclas de coagulantes, obteniendo los resultados expuestos en la tabla 11:

**Tabla 11**

*Resultados promedio de coagulación con adición de extracto de hojas de Fique*

	<b>Dosis de FeCl<sub>3</sub> (mg/L)</b>	<b>Dosis extracto de hojas de Fique (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Color (UPC)</b>	<b>Turbiedad (UNT)</b>	<b>TDS (ppm)</b>
<b>1</b>	20	1	4.57	18.7	160	15.1	100
<b>2</b>	20	2	4.57	18.7	150	9.84	100
<b>3</b>	20	5	4.60	19.2	120	8.94	100
<b>4</b>	20	10	4.58	18.9	170	10.86	100
<b>5</b>	20	20	4.61	18.5	120	9.73	100
<b>6</b>	20	40	4.57	18.7	110	9.21	100
<b>Dosis óptima</b>	20	5					

**Nota.** Fuente: (Rivas & Antonio, 2009, p.7)

De acuerdo con los datos registrados en la tabla 10 y en conclusión de esta investigación, se demostró que el extracto de las hojas de Fique a 5mg/L como ayudante de coagulación en la mezcla con 20mg/L de FeCl<sub>3</sub> presentó un resultado medio de la remoción ( $p < 0.50$ ), de los cuales se obtuvieron remociones del 17% en la remoción del color, 28% en valores de turbiedad y 11% en la DQO. También se estimula la gran capacidad que presentan las hojas de Fique en los procesos de coagulación, por formar micelas que capturan compuestos orgánicos por sus grupos hidrófilo e hidrófobo, aunque la investigación se queda corta en evidencias moleculares.

(Sandoval et al., 2019) analizaron la combinación de varios polímeros naturales con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en el tratamiento de aguas con baja cantidad de turbidez (5.32 NTU), donde los polímeros naturales no presentaron ninguna eficiencia, pero al combinarlos con sulfato de aluminio su efectividad es buena y estos fueron sus resultados:

**Tabla 12**

*Resultados del tratamiento de agua con Sulfato de Aluminio y PAM*

<b>Combinación de coagulante + floculante</b>	<b>Final pH</b>	<b>Remoción (%)</b>	
		<b>Turbiedad</b>	<b>Color</b>
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></b>	7.05	86	88.7
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + PAM</b>	7.17	86.9	88.9
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + almidón</b>	7.23	87.4	98
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + pectina</b>	6.99	89.2	90.2
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + tamarindo en agua</b>	7.09	87.6	98
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + tamarindo con cloruro de sodio</b>	7.12	87.5	92.2
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + tamarindo en acetato de amonio</b>	7.08	86.8	90.2

*Nota. Fuente: (Sandoval et al., 2019, p.7)*

Para los estudios anteriores, los polímeros naturales no presentaron eficiencia en la remoción de turbidez y color en el agua a tratar por ser de baja concentración para poder lograr el proceso de coagulación. Pero, al combinarse con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> se mostró un porcentaje de eficiencia muy alto, lo que permitió que se pueda ahorrar mucho dinero en el uso del solo coagulante químico ya que se presenta mejor eficiencia de la remoción del color y la turbidez cuando se combinaron, presentado remoción de la turbidez del 86% al 89% y del color del 88.7% al 98%. (Sandoval et al., 2019)

Otros estudios donde se evaluaron la efectividad del almidón de yuca combinado con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en el proceso de coagulación, fueron realizados por Solís Silvan et al. (2012),

utilizando una muestra de agua de río con turbiedad de 70 NTU, color de 85CU y pH 6.8, en la siguiente tabla se resumen los resultados de los estudios realizados:

**Tabla 13**

*Resultados tratamiento de agua con Sulfato de Aluminio y Almidón de Yuca*

Vaso	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	Dosis extracto de Almidón de Yuca (mg/L)	pH	Color (UPC)	Turbiedad (UNT)
1	30		6.3	10.33	1.00
2	28	2	6.4	7.11	1.50
3	26	4	6.4	10.55	3.00
4	24	6	6.5	11.00	4.75
5	22	8	6.6	14.00	5.30
6	20	10	6.7	16.00	7.80
<b>Dosis óptima</b>	28	2	18.00		

*Nota. Fuente: Datos obtenidos de (Solís Silvan et al., 2012, p.2)*

El aporte del trabajo de investigación de Solís Silvan et al. (2012) es que la mezcla que se propone entre el almidón de yuca y el sulfato de aluminio debe ser del 1:0.07 y así evitar los gastos por insumos, así como lo propone Laines (2001, citado por Silven et al., 2008) que es una proporción de 1:1 y de acuerdo con los resultados obtenidos se puede evidenciar que la mejor combinación fue la de 28g de  $Al_2(SO_4)_3$  + 2g de Almidón de yuca, presentado una eficiencia del 97.9% en la remoción de la turbiedad y del color de 91.6.

Estudios realizados por Vázquez González (1994) con diferentes especies de Opuntia (lindheimeri, imbricata) en combinación con sulfato de aluminio en proporción de 200mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  y 3mg/L de Opuntia, obteniendo una remoción del 82.5% (200 Pt/Co a 35 Pt/Co) y

80% en la remoción de turbiedad la mejor eficiencia se presentó con 150mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  y 11 mg/L de Opuntia, dando como resultado una remoción de 92%. (Vázquez González, 1994)

De acuerdo con la información consultada en el tratado de los resultados de efectividad en la mezcla de polímeros y sustancias químicas en la eliminación de la turbiedad del agua a través del proceso de coagulación-floculación, en la combinación de polímeros naturales con sales químicas, demuestran que presentan un gran poder de remoción de la turbiedad del agua, de acuerdo con estudios realizados por la carga negativa de los hidroxilo (OH) presente en los polímeros de los almidones, lo cual facilita la formación de flóculos con los coloides y además la unión de algunos metales, es de recordar que el almidón presenta entre sus compuestos: amilosa, glucosa y amilopectina.

El almidón de yuca en conjunto con el sulfato de aluminio líquido presentó una gran eficiencia en la remoción de la turbidez de un 75% y 78% de color d.(Alcocer et al., 2018), aunque es de concluir que con estos porcentajes el agua que se puede tratar es la residual, ya que los parámetros de turbidez quedan muy elevados para el agua de consumo humano y cumplir con la normatividad vigente, ver tabla 7.

En otros estudios se empleó el almidón de plátano con sulfato de aluminio y se presentó una eficiencia del 97.4%, las hojas de Fique presentaron remociones del 28% de turbiedad, aunque es un valor muy bajo, se destaca el potencial de este polímero para formar micelas que pueden capturar muchos compuestos por su carácter hidrófilo e hidrófobo.

En la tabla 12, se relaciona el resultado de varios polímeros extraídos del tamarindo, almidón y pectina en combinación con el Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  donde se destacó la mejor eficiencia en el almidón de yuca, aunque los valores en la eliminación de la turbidez

estuvieron muy cercanos 86 a 89%, demostrando que estos compuestos naturales son una buena opción para las mezclas.

Es de tener en cuenta que tanto el Sulfato de Aluminio al mezclarse con el agua proporciona hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), al igual que las proteínas y polisacáridos presentes en los polímeros naturales, que proporcionan atracción a las partículas allí presentes y su posterior sedimentación.

## **Resultado de Parámetros de Desempeño Óptimo en el Proceso de Coagulación**

### **Floculación.**

Siguiendo con el cumplimiento de los objetivos de la monografía, en este apartado se evaluarán los parámetros necesarios para que el proceso de coagulación floculación se presente de manera eficiente y se puedan aprovechar los recursos.

#### **pH**

Las partículas causantes del color y la turbidez tienen características coloides y una carga negativa cuando el pH está cerca a 7, permitiendo determinar las condiciones óptimas para alcanzar el punto isoeléctrico de la disolución, el cual permite la formación de flóculos con capacidad de precipitar. (López & Campos, 2011)

Cuando las partículas coloides han absorbido los iones  $\text{OH}^-$  pueden ser destruidos por el aumento del pH a causa del aumento de los iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  causante de la inestabilidad de la suspensión coloidal, por ello es importante tener en cuenta este factor ya que dependiendo de la sustancia coagulante, el pH para el mínimo de solubilidad varía, como se resumen en tabla 14:

**Tabla 14***pH mínimo de Solubilidad sustancias Químicas*

<b>Sustancia</b>	<b>pH (mínimo de Solubilidad)</b>	<b>Aclaraciones</b>
<b>Sales de Hierro</b>	>5	
<b>Hidróxido de Aluminio</b>	<7,4 y >8.5,	En medio ácido elimina mejor las materias orgánicas.
<b>Hidróxido de Hierro</b>	>6	El agua con mucha cantidad de materia orgánica forma las sales orgánicas de hierro y el agua queda coloreada.
<b>Coagulador férrico</b>	Entre 7 y 8	
<b>Coagulador Cúprico</b>	Alcalinas	En estas aguas asegura la decoloración y la formación de algas por su poder desodorante.
<b>Alumbre</b>	5.5 y 8	(Rodríguez, 2008 citado por Montes Gazabón et al., 2013)

**Nota.** Fuente: Datos obtenidos de (Lorenzo-Acosta, 2006, p.6)

Los polímeros naturales también presentan un mejor desempeño en ciertos rangos de pH, en la tabla 15 se resumen los coagulantes naturales y el pH de óptimo desempeño:

**Tabla 15***pH óptimo de Polímeros Naturales*

<b>Sustancia</b>	<b>pH</b>	<b>Referencia</b>
<b>Mucílago Opuntia</b>	7 y 10	(Yin, 2010 citado por Montes Gazabón et al., 2013)
<b>Almidón de Yuca</b>	6.5	(Solís Silvan et al., 2012)
<b>Opuntia Imbricata</b>	6.5 a 6.7	(Vázquez González, 1994)
<b>Opuntia microdasys</b>		
<b>Opuntia lindheimeri</b>		

**Nota.** Fuente: Propia del Autor.

Un aspecto para tener en cuenta, cuando la alcalinidad del agua no es suficiente para activar el coagulante, se deben agregar sustancias alcalinas que permitan alcanzar el pH óptimo del coagulante. En la tabla 16 se muestran las sustancias que se pueden utilizar.

**Tabla 16**

*Modificadores de pH.*

<b>Óxido de Calcio</b>	<b>CaO</b>
<b>Hidróxido de Calcio</b>	<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>
<b>Carbonato de Calcio</b>	<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>
<b>Gas Carbónico</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>Ácido Sulfúrico</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
<b>Ácido Clorhídrico</b>	<b>HCl</b>

*Nota. Fuente: (Martínez & Gomzález, 2012, p.40)*

### **Mezclado y tiempo**

De acuerdo con Lorenzo-Acosta (2006) la mezcla rápida es utilizada con el fin de lograr que las partículas coloidales entren en contacto con las sustancias químicas, neutralizando las cargas, ocasionando desestabilización y proporcionando la aglomeración por un corto tiempo dependiendo este último factor de la clase del coagulante. Por ejemplo:

**Tabla 17***Tiempo y rpm según el tipo de mezclado*

<b>Tipo de Mezclado</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Rpm</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Rápido</b>	1-3	30-100	Para aquellas plantas que tienen una razón de mezcla rápida. Al no poseer mezcla rápida definida, se recomienda 30-60 rpm por 15-60 segundos.
<b>Lenta</b>	3-15	20-40	El mezclado no puede superar más de 15 min, el agua empieza a desprender gases y las burbujas ocasionan la flotación de los flóculos y poca sedimentación.
<b>Reposo</b>	30		

**Nota:** Fuente: modificado de (Lorenzo-Acosta, 2006, p. 7-8)

Por otra parte, en los estudios realizados por Martínez García & González Silgado (2012), se evalúan los parámetros de color y turbidez con la puesta en marcha de varias corridas, donde se evalúan la cantidad de coagulante utilizada y la velocidad de agitación, en esta investigación experimental utilizaron la tuna, para lo cual cortaron y removieron la cutícula de los tallos en pequeñas tiras, la secaron durante 48 horas a una temperatura de 89 – 61°C, luego las trituraron y tamizaron para garantizar que las partículas tengan un diámetro menor a 0.5 mm y les agregaron etanol al 98% para eliminar la clorofila y por último se secó para eliminar el disolvente y los parámetros utilizados se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 18***Porcentaje de Color Removido usando Tuna*

Corrida	Remoción de Color				
	Velocidad de Agitación (rpm)	Dosis del Coagulante (mg/L)			
1	0	50	75	90	
	20	8.33	51.79	50.00	49.40
	30	1.19	49.40	47.62	53.57
	40	3.54	55.36	52.98	57.14
2	20	9.52	52.98	48.81	51.19
	30	2.38	50.60	50.00	52.38
	40	3.57	54.76	52.98	56.55

**Nota.** Fuente: (Martínez & González, 2012, p71)

De acuerdo con la tabla 17, se puede evidenciar que los porcentajes de remoción del color aumentaron a medida que se incrementó la velocidad de agitación y la cantidad de coagulante.

### **Temperatura**

La temperatura es muy influyente en el proceso de coagulación y formación del floculo, según estudios de (Lorenzo-Acosta, 2006) cuando se disminuye la temperatura se debe de aumentar la cantidad de coagulante para garantizar la formación de los flóculos,

### **Influencia de la Dosis del Coagulante**

De acuerdo con los estudios de Díaz Claros (2014) la cantidad de coagulante es un parámetro muy importante porque:

1. Un poco cantidad de coagulante no neutraliza las cargas, por lo tanto no hay mucha formación de flóculos y los valores de turbiedad son elevados.
2. Cuando se agrega una gran cantidad, se hace que la partícula invierta su carga y por ende se forman muchos microfloculos con tamaños muy pequeños que no conducen a la sedimentación.

Para concluir y de acuerdo con la información encontrada, analizada y organizada, se puede decir que estos parámetros son muy importantes en el proceso de coagulación floculación, porque son los parámetros que van a permitir el contacto del agua, las partículas disueltas en ella y el coagulante, reaccionen y se pueda remover la turbidez, entre otros parámetros analizados.

Por ejemplo, el pH es un parámetro que interviene de forma directa con la solución del agua y el coagulante, porque en condiciones muy ácidas va a hacer que el coloide invierta su carga y ocasione repulsión y por ende el proceso de coagulación no se va a dar. Esto puede ocurrir porque muchas de las partículas que han acogido iones  $\text{OH}^-$  queden sueltos por la acción de los Iones  $\text{H}^+$  ocasionando desestabilidad de los coloides en suspensión.

Para lograrlo, en la literatura se encontró que el pH inicial afecta directamente el proceso de coagulación y por ende hay que tener en cuenta el pH óptimo y éste oscila entre 6.5 y 8 unidades de pH, cuando el agua presenta diferencia de pH, se hace necesario agregar sustancias para equilibrarlo, entre ellas como se menciona en la tabla 15, se encuentra: NaOH, CaO,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HCl.

En cuanto al mezclado es importante la mezcla rápida y corta de tiempo con una fuerte turbulencia para que el agua y todos los coloides entren en contacto con los polímeros, pero también es importante el mezclado lento y espacios de tiempo largos, porque después de formado el floc, no intervenga en su separación, además para que no se sedimenten rápidamente y se pueda permitir la formación de flóculos largos.

Otro aspecto importante que se trató en este apartado fue la temperatura, éste es un factor que se debe tener en cuenta porque el aumento de la temperatura ocasiona aumento de la energía cinética de las partículas y por lo tanto forma turbulencias que no favorecen el proceso de

coagulación y temperaturas muy bajas conllevan a que la viscosidad aumente y por lo tanto aparecen dificultades para la sedimentación de los floc y posterior separado de los mismos.

Desde la cantidad del coagulante se deben tener en cuenta los aspectos tratados en el estudio de esta monografía porque desde el punto de vista químico, si se agrega poca cantidad de coagulante, no se neutralizan todas las cargas y por ende, la turbiedad es muy elevada por efecto de todas las partículas que quedan en la suspensión. Si se agrega mucha cantidad, ésta interviene de forma individual con las partículas y se da la formación de flóculos muy pequeños que no sedimentarán, ocasionando viscosidad y poca o nada remoción de coloides.

### **Resultados de Tratamientos Electroquímicos Usados en las Aguas Residuales.**

Los Tratamientos electroquímicos son importantes para la remoción de metales pesados (Ni, Cd, Pb, Cu, Zn), que se encuentran presentes en solución por la oxidación natural de pirita, los cuales producen ácido sulfúrico y metales disueltos en función del pH. Estas aguas como se conocen: Drenaje ácidos de Mina (DAM), se caracterizan por valores de pH bajos, normalmente entre 2.9 y 3.3; alto contenido de sales disueltas (sulfatos 2246mg/L) y las concentraciones elevadas de metales pesados: Hierro (576,4 mg/L), Aluminio (33,2 mg/L), Manganeseo (9.1 mg/L), Zinc (1,42 mg/L); también por los impactos negativos que trae para el medio ambiente y por esta razón se hace necesario el tratamiento previo de estas aguas residuales, antes de ser incorporadas a los efluentes naturales y así mitigar el impacto ambiental que genera la actividad minera.(Parpiuzan, 2012)

En el proceso de Electrocoagulación, se obtiene una efectividad cercana al 98.5% de remoción en una solución polimetálica, para lo cual se pueden utilizar electrodos de Aluminio. Aunque presenta una efectividad muy alta, este proceso se ve afectado el alto consumo energético. (Parpiuzan, 2012)

Aunque este proceso es muy efectivo en la remoción de metales, se ve afectado por varios factores que afectan de forma negativa la electrocoagulación, entre ellos se encuentra el pH influyendo directamente en la eficiencia de la corriente para formar hidróxidos y se ve afectado tanto por la naturaleza del agua como de los electrodos a utilizar y que en aguas ácidas se ve más afectado por la formación  $H^+$  originadas en el cátodo, es por ello que algunos estudios han demostrado que este proceso funciona mejor en aguas cercanas a un pH 7. (Arango Ruiz, 2012)

Otro factor a tener en cuenta es la densidad corriente y todo porcentaje de remoción está relacionado con la cantidad de corriente que se aplique al medio acuoso, aunque también aumenta el consumo de energía al mismo tiempo que aumenta la eficiencia de la remoción y también incrementando la temperatura porque mucha de esta corriente presenta una transformación calorífica afectando el medio acuoso. También es de tener en cuenta que la corriente eléctrica va a afectar a los electrodos y van a liberar al medio iones  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$  y la cantidad de corriente debe establecerse de acuerdo con el pH y la temperatura. (Arango Ruiz, 2012)

Un incremento en la conductividad eléctrica produce un aumento en la densidad eléctrica y para mantener una buena conductividad se puede adicionar al agua residual electrolitos como  $\text{NaCl}$  o  $\text{CaCl}_2$  que ayudarán a una mejor conductividad y además a eliminar los efectos negativos que dan los iones carbonatos o sulfatos ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$ ) los cuales provocan una precipitación de  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$  produciendo una capa insoluble que se deposita en los electrodos y desfavorece la conductividad. (Arango Ruiz, 2012)

De acuerdo con los estudios experimentales de Piarpuzan (2012), se realizaron estudios preliminares donde se evaluaron los siguientes parámetros: Turbiedad (NTU), pH sobredonante y concentración de sulfatos (mg/L); con cargas de (150-200-300 c/L), con rangos de pH (4.5-6-8-10) y con variación en la cantidad de polímero PAM (10-20-30 ppm). Los resultados de estos estudios preliminares, arrojaron los mejores resultados de desempeño con 200 c/L, pH altos (8-10) y un incremento de la densidad de la corriente a  $9.1 \text{ mA/cm}^3$  y una concentración de Sulfato de Magnesio a 114 ppm que ayudaron a atrapar los iones metálicos en el proceso de FC.

La muestra de agua obtenida por Piarpuzan (2012), presentó las siguientes características plasmadas en la tabla 19:

**Tabla 19**

*Característica de la muestra de agua.*

Parámetro	Unidad	Cantidad
<b>pH</b>		< 2.4
<b>Hierro</b>	mg/L	303.8
<b>Manganeso</b>	mg/L	29.96
<b>Zinc</b>	mg/L	1.90
<b>Sulfatos</b>	mg/L	6224

**Nota.** Fuente: datos obtenidos de (Piarpuzan, 2012, p.24)

De acuerdo con las características presentadas en la tabla 19, se debe resaltar que el ión sulfato es uno de los que se presenta en mayor cantidad en aguas naturales, los cuales provienen del yeso y minerales similares, y son producto de la oxidación de sulfuros, sulfitos o tiosulfatos de los suelos.

Siguiendo con los estudios de Parpiuzan (2012), realizaron la comparación de sus resultados con otros estudios y estos se describen en la tabla 20:

**Tabla 20***Comparación de Resultados del Proceso de Electrocoagulación*

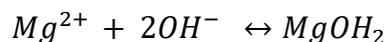
<b>Parámetros</b>	<b>Referentes Bibliográficos</b>		
	(Heidmann and Calamno, 2008)	(Merzouk et al., 2009)	(Piarpuzan, 2012)
<b>Metales</b>	Zn, Cu, Ni, Ag, Cr	Zn, Cu, Ni, Pb, Cd	Zn, Fe, Mn
<b>Conductividad (mS/cm)</b>	20	2.4	16
<b>pH inicial</b>	4.5 – 7.5	7.8	2.4
<b>Materiales Electroodos</b>	Aluminio	Aluminio	Hierro
<b>Área Superficial Activa (m<sup>2</sup>)</b>	0.031	0.000459	0.051
<b>Voltaje (V)</b>	No reporta	No reporta	5.5
<b>Carga (c/L)</b>	800	48	200
<b>Tiempo (s)</b>	9384	900	24
<b>Densidad de Corriente (A/m<sup>2</sup>)</b>	3.3	115.5	91
<b>% Reducción de Metales</b>	98	99	97

*Nota. Fuente: (Parpiuzan, 2012p.35)*

De acuerdo con los estudios realizados por Parpiuzan (2012) que se muestran en la tabla 20, se puede observar que en los tres estudios se dan casi los mismos resultados y aunque en dichos resultados no se realizó la comparación del consumo energético, se evidencia que en los experimentos realizados por Parpiuzan, se obtuvo un tiempo muy bajo para el tratamiento que se realizaba, presentando un alto porcentaje de reducción de metales: 99,4% de hierro, 96,8% de manganeso y 94,2% de zinc.

Algunos estudios han demostrado que al formarse el hidróxido de Hierro, presentan una acción adsorbente y ayudan a atrapar los iones disueltos en la solución, mientras que los metales de transición presentan una hidrolización que actúa de acuerdo con el pH y hacen que estos se encuentren hidrolizados y así se pueda realizar la eliminación. (Parpiuzan, 2012)

En el proceso experimental de floculación realizado por Parpiuzan (2012), se agregó Sulfato de Magnesio, el cual al entrar en contacto con el agua y realizarse la neutralización, se da como resultado la precipitación del hidróxido de magnesio con áreas superficiales positivas que atraen a los coloidales con cargas negativas.



El comportamiento del  $MgOH_2$  ha demostrado que es un coagulante eficiente en el tratamiento de estas aguas, logrando que la turbiedad y la reducción del color se redujera al 99% por la formación de los hidróxidos metálicos como se había explicado en el párrafo anterior, también se redujo la DQO en un 42% (Parpiuzan, 2012), los resultados de dicha investigación se resumen en la siguiente tabla número 21:

**Tabla 21***Resumen de Resultados*

	<b>Unidades</b>	<b>DAM sin tratar</b>	<b>Después del TTO</b>
<b>pH</b>		2.4	6.14
<b>Turbiedad</b>	NTU	109	1.8
<b>Conductividad</b>	mS/cm	16	4.45
<b>Sólidos Totales</b>	Ppm	5200	5650
<b>Color</b>	Pt/Co	397 (Dilución 1 a 5)	7.9 (Sin dilución)
<b>DQO</b>	mg/L	142	84
<b>Sulfatos</b>	mg/L	6224	3937
<b>Hierro</b>	mg/L	303.98	1.77
<b>Manganeso</b>	mg/L	29.96	0.95
<b>Zinc</b>	mg/L	1.90	0.11

**Nota.** Fuente: (Parpuizan ,2012, p.38).

Los resultados mostrados en la tabla 21, se obtuvieron en las siguientes condiciones:

- Carga: 200 c/L
- Densidad de Corriente: 9.1 mA/cm<sup>2</sup>
- 114 ppm de MgSO<sub>4</sub> y 30 ppm de PAM
- pH<sub>FC</sub>: 10. (Parpuizan, 2012)

En los estudios realizados por Posada & Niño, (2010) se tomaron muestras de aguas ácidas de la compañía Eléctrica Ltda en Bogotá, la cual presentaba las siguientes características fisicoquímicas: pH 1,40; conductividad de 26.4 m S/m; temperatura de 18,2 °C y un voltaje de 31.8 Vdc, empleando para el proceso tres placas de Cu y Fe, la primera con polaridad negativa ( cátodo) y la segunda con polaridad positiva (ánodo), cumpliendo con la función de electrodos en paralelo en la celda electrolítica.

Durante el proceso de electrocoagulación se presentaron unas variaciones de los parámetros iniciales: la temperatura aumentó a 48.5° C, la conductividad se redujo a 19.4 mS/m; el amperaje osciló entre los 0.27 A y 2.40 A y el pH llegó a 3.7, siendo el voltaje constante en 31.8 Vdc.(Posada & Niño, 2010)

En los resultados de dicha investigación se lograron remover metales como el Cr en un 51,65% (1.82 mg/L a 0.88 mg/L), también se logró remover Cr<sup>+6</sup> (0.02 mg/L a 0.01mg/L) el cual se redujo en un 50%; Ni del 18.09% (3.87 mg/L a 3.17 mg/L), también se presentó la remoción de Pb del 50%(1 mg/L a 0.5mg/L), zinc del 47.3.7 % ( 38.00 mg/L a 20.0 mg/L) cantidades de estos tres últimos elementos que se alejan del parámetro estipulado por el DAGMA, ( 1997) que debe ser de 0.2 mg/L para el Ni y de 0.1 mg/L para el Pb y 5.0 mg/L para el Zinc.(Posada & Niño, 2010)

El Cu presentó una variación elevada del 519.48% (1.54 mg/L a 9.54 mg/L) error que se presentó durante el proceso debido a los ensayos de polaridad y la placa de Cu invirtió dicha polaridad produciendo un aumento excesito de Cu en el agua residual y un dato para tener en cuenta es que los elementos removidos presentan una gran afinidad electrónica dentro del proceso. (Posada & Niño, 2010)

En los ensayos elaborados por Arango Ruiz, (2012) se tuvieron en cuenta tres tiempos: 5, 10 y 15 minutos teniendo mejor proporción de remoción a los 15 minutos en cada una de las corridas, además se notó un bajón de 1 a 2 unidades del pH y una conductividad constante y una densidad de corriente de 32.43 A/m<sup>2</sup>, donde el pH más efectivo fue entre 5 y 7, removiendo un 97.92% de la DQO y cuando se ajustó la densidad de corriente a 43.23 A/m<sup>2</sup> aumentó la

remoción de la DQO a 98.94%, de lo que se puede concluir que las condiciones últimas, son las óptimas para un proceso de electrocoagulación de aguas residuales en una planta de leche.

Las investigaciones de Bautista & Cecilia, (2018) realizaron el proceso de electrocoagulación usando placas de Aluminio y Hierro, actuando como ánodo y cátodo respectivamente que se sometieron a la intensidad de 10 y 30 Amperios, evaluados en tiempos de 30, 45 y 60 minutos, mostrando mayor eficiencia en la remoción de la DQO a 30 A y 60 minutos, removiendo el 94,52% de este parámetro.

Los resultados de esta investigación se reflejan en la siguiente tabla número 22:

**Tabla 22**

*Resultados de Color, turbiedad, DQO, Conductividad y pH*

<b>Tratamiento</b>	<b>Intensidad (Amperios)</b>	<b>DQO (%)</b>	<b>Turbidez (%)</b>	<b>Conductividad (promedio uS)</b>	<b>Color (%)</b>	<b>pH (prom)</b>
<b>E1</b>	10	77,00	56,65	311,00	37,99	7,20
<b>E2</b>		79,94	75,50	300,50	80,18	6,90
<b>E3</b>		78,98	34,15	298,25	30,05	7,00
<b>E4</b>	30	80,47	65,16	290,65	53,91	7,29
<b>E5</b>		81,48	72,99	308,50	65,96	7,00
<b>E6</b>		94,52	83,04	301,15	74,73	7,00

*Nota. Fuente: (Bautista & Cecilia, 2018, p.51-56)*

De acuerdo con los resultados resumidos en la tabla 22, se puede evidenciar que el tratamiento más eficiente en la remoción fue a los 60 minutos para todos los parámetros con una intensidad eléctrica de 30 A, se tiene a la DQO con una eficiencia de remoción del 94,52 %; la turbidez con 83,04%, el color demostró a 10 A y en un tiempo de 30 minutos una reducción 80,18%; la conductividad eléctrica mayor fue a 30 minutos con 10 Amperios a 311,00 uS.(Bautista & Cecilia, 2018)

Para concluir con el capítulo VII y el tema de la Electrocoagulación, se puede evidenciar la necesidad de este proceso para la eliminación de los metales pesados en las aguas residuales de procesos mineros. Es de recordar que estos metales le dan el pH ácido a las aguas y éste pH bajo no permite la buena interacción de los polímeros Naturales con los coloides, pues invierten su carga y hace que repelen.

Otro aspecto que se trató en el capítulo para tener en cuenta en los ensayos, es el electrodo a usar porque en los ensayos de Posada & Niño, se invirtió la polaridad del electrodo de Cobre que se usó y el agua se saturó de iones de Cobre. El pH también juega un papel muy importante, porque influye directamente en la formación de Hidróxidos y son estos ( $\text{OH}^-$ ) los que van a formar las partículas y formar micelas que precipitarán, de acuerdo a los estudios que se abordaron en este capítulo, un pH óptimo está entre 5 y 78 Unidades de pH.

Los procesos de electrocoagulación son muy eficientes en la remoción de metales como Cr,  $\text{Cr}^{+6}$ , Ni, Pb, Zn, entre otros. Porque para estos procesos se utilizan dos electrodos (Ánodo y Cátodo) el primero con polaridad positiva, atrayendo todos los iones y coloides cargados negativamente, mientras que el segundo con polaridad negativa atrae las partículas cargadas positivamente.

Entre los trabajos estudiados, se destacan las pruebas realizadas por Parpiuzan Donde se realizaron las pruebas con Sulfato de Magnesio y permitió la formación de Hidróxido de Magnesio ( $\text{MgOH}$ ), el cual presentó una eficiencia alta en la remoción de la turbiedad.

**Resultados Obtenidos en el Uso de Polímeros Naturales en los Procesos de Coagulación-Floculación, Aplicados al Tratamiento de las Aguas Naturales y Servidas.**

**Opuntia Ficus Indica**

En los estudios realizados por Martínez García & González Silgado (2012), se realiza una comparación entre los resultados obtenidos con la tuna y otras sales, las cuales se describen en la tabla 23:

**Tabla 23**

*Comparación entre los valores de turbidez y color*

Proceso	Coagulante Utilizado	Color (UPC)	Turbidez (NTU)
<b>Clarificación del agua cruda</b>	Polvo coagulante obtenido de la Tuna	54,76	24,35
	Sulfato de Aluminio (Garzón,2003)	65	30
	Sulfato de Aluminio (Martínez, 2003 )	38	17
	Sulfato de Aluminio (Díaz, 2000)	183	22
	Valores mínimos exigidos para el agua potable por el Decreto 1575 del 2007.	15	2

*Nota.* Fuente: (Martínez & González , 2012. p.76.)

Aunque los valores obtenidos por la Tuna (*Opuntia ficus indica*) en los experimentos realizados por Martínez García & González Silgado (2012), se debe tener en cuenta que los resultados con este coagulante en polvo natural proveniente de los polisacáridos es muy parecido a los obtenidos por el sulfato de aluminio en las diferentes investigaciones que se describen en la tabla 22 y aunque los valores obtenidos en los estudios mencionados no alcanzan los valores mínimos exigidos en el Decreto 1575 del 2007, estos valores se pueden obtener en un proceso de filtración para aguas con turbidez menor a 50 NTU.

En las investigaciones de Montes Gazabón et al.(2013) se utilizó agua del río Magdalena con las siguientes características: turbidez (276 NTU), pH (7.22), Conductividad (151.5uS/cm), SDT (72.22,g/L) y fue comparada con la efectividad de un coagulante químico, los resultados de dicha investigación se resumen en la tabla 24:

**Tabla 24**

*Resultados registrados del uso de la Opuntia Indica*

<b>Referencia</b>	<b>Turbidez</b>	<b>Color</b>	<b>Observaciones</b>
<b>(Montes et al., 2013)</b>	92.39 %		
<b>(Flores et al., 2006).</b>	90%	80%	Es útil en la remoción de coliformes.
<b>(Almàndarez,2004)</b>	91%		No reportan datos sobre la remoción de color.
<b>(Parra et al.2011)</b>	82.25% - 94.84%		
<b>(Montes et al., 2013)</b>	92.39 y 93.25%		Porcentajes obtenidos utilizando la Opuntia como coagulante primario.

**Nota.** Fuente :Datos obtenidos de (Montes et al., 2013, p. 6-7)

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 24, se demuestra la Opuntia Indica presenta una eficiencia alta para remover la turbidez, en varios estudios presenta remociones mayores al 90% de eficiencia, siendo una buena alternativa para ser utilizada como coagulante natural y evitar el uso de compuestos químicos.

En otros experimentos realizados en la remoción de la turbidez del río Magdalena presentando una turbidez de 174 NTU y un pH de 6.55, se utilizaron pruebas de jarras a 100 y 200 rpm con diferentes concentraciones de Opuntia ficus-indica (Tuna) y alumbre por separado para demostrar su eficiencia, los resultados se resumen en la tabla 25:

**Tabla 25***Resultados Opuntia vs Alumbre.*

<b>Coagulante</b>	<b>Rpm</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Turbidez (UNT)</b>	<b>Ph</b>
<b>Alumbre</b>	100	35	3.06	5.78
		40	4.9	5.51
	200	35	1.22	5.54
		40	2.95	5.44
<b>Opuntia</b>	100	35	33.93	6.22
		40	29.66	6.55
	200	35	31.36	6.35
		40	28.43	6.41

*Nota. Fuente: (Olivero et al., 2014, p.4)*

La tabla 25 muestra los resultados del agua tratada con Tuna y con alumbre, de acuerdo a esos resultados se puede concluir que la mejor eficiencia de la tuna fue con la agitación de 200 rpm con 40 mg/L, con la cual se logró una eficiencia del 83.66%, aunque la eficiencia del agua tratada con alumbre fue del 99.30%, cabe destacar que la remoción de turbidez con tuna no cumple con las reglamentaciones para agua potable, pero sí para otros usos. (Olivero et al., 2014)

### **Cactus Lefaria**

En los estudios realizados por Martínez et al. (2003) se evaluó la eficiencia del cactus lefaria como agente coagulante, el cual fue comparado en crudo y con disolventes como el

metanol, acetato de etilo y éter de petróleo. Entre los resultados obtenidos de dicha experimentación realizada a escala de laboratorio a través de la prueba de jarras y con aguas turbias sintéticas con un nivel de turbidez desde los 20 a 150 NTU, donde el Cactus Lefaria en crudo (sin disolventes) a una dosis de 10 mg/L demostraron que la turbidez residual se logró mantener en 5 NTU, el color en 5 UVC(Unidades de Color Verdadero o real) y el pH se mantuvo entre 6,5 y 8,5, lo cual indica que el Cactus L. es capaz de favorecer los procesos de coagulación floculación.

Los resultados obtenidos con los disolventes arrojaron baja coagulación cuando el Cactus Lefaria se le aplicó el éter de petróleo, dando como resultado ausencia del proceso porque el éter solo disuelve lípidos y no proteínas; además, la dilución usando metanol y acetato de etilo arrojaron un porcentaje de remoción entre el 70 y 80%, como lo indica la tabla 26:

**Tabla 26**

*Actividad de Coagulación Cactus Lefaria en diferentes solventes*

<b>Solvente</b>	<b>Actividad de Coagulación</b>	<b>Turbidez Removida (%)</b>
<b>Metanol</b>	Presente	80
<b>acetato de etilo</b>	Presente	70
<b>éter de petróleo</b>	Ausente	0

**Nota.** Fuente: (D. Martínez et al., 2003, p.6)

## **Almidón**

En los estudios realizados por Carmona (2012) se utilizaron las cáscaras de papa con una mezcla de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) con el fin de remover parámetros como la turbiedad, color y efectividad en el tratamiento de aguas residuales, para lograrlo las cáscaras de papa se sometieron a una temperatura de secado de 100 a 105 °C durante 24 horas y posteriormente se trituraron en un molino de martillos, hasta lograr una consistencia en polvo, aunque estas cáscaras presentan una cantidad menor de 14,77% de almidón.

Para la investigación de Carmona (2012) se utilizó agua con los siguientes parámetros iniciales: Color de 41 UPC, Turbiedad de 2 UNT y un pH de 7,76 unidades, a través de pruebas de jarras se determinó que el Sulfato de Aluminio tiene un poder óptimo en 8mg/L, los resultados de dicha investigación mostraron que la cáscara de papa tiene un gran poder floculante en cantidad de 2.5g de cáscara de papa, cumpliendo con los parámetros que establece la norma.

Los estudios reportados por Herrera (2015), se realizaron pruebas de jarras con agua con turbiedad de 355 NTU, 1660 Pt/Co de color a un pH de 7.34 unidades. Se utilizó el almidón de papa con una dosis de 50mg/L aportando beneficios muy efectivos, logrando obtener una turbiedad de 20.4 NTU, color de 412 UPC , valores muy similares al reportado en esta misma investigación con coagulante químico como el Sulfato de Aluminio.

Es de tener en cuenta que los valores de remoción de color no se adaptan a los de la norma colombiana (Decreto 1594 de 1984) y un aspecto a tener muy importante en el uso de almidón de papa es la reducción del volumen de los lodos depositados. (Herrera, 2015)

## **Quitosano**

En los estudios realizados por Nieto & Orellana (2011), se evaluó la efectividad del quitosano en la remoción de metales como el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) obteniendo una efectividad de remoción entre el 60 al 90% y según los estudios realizados, las mejores remociones se dieron en tiempos cortos, de 5 a 15 minutos de floculación.

Se realizaron 81 ensayos, donde se compararon tres valores de pH (5, 7 y 9), cantidades del quitosano (15, 30 y 60 ml), se hicieron tres réplicas y se analizó la concentración del cromo hexavalente a través del espectrofotómetro, para luego calcular el porcentaje de remoción. De acuerdo con los resultados reportados, la mejor eficiencia se obtuvo con un pH 5,0; 60 ml de quitosano, 30 min de floculación, para un 89,77% de remoción. (Nieto Orellana & Orellana Ulloa, 2011)

## **Moringa Oleifera**

Los extractos de las semillas de la M. Oleifera se han utilizado en aguas con una alta turbidez y han demostrado una alta efectividad en la remoción de la turbiedad y también se ha utilizado su ingrediente activo, un polielectrolito orgánico para removerla en aguas con baja turbidez y siendo recomendada en países de bajo desarrollo. (Vargas-Camareno & Romero-Esquivel, 2006)

Las partes utilizadas de esta planta son las semillas secas que se pulverizan para extraer el coagulante, la cual puede estar disuelta en agua o en solución salina al 0.5% para tener efectividad del 92 al 98% en la extracción de turbidez; además que también se ha utilizado sus hojas y se ha comprobado su alto poder antimicrobiano en la proliferación de bacterias Gram positivas y Gram negativas ente las más comunes en las aguas residuales se encuentran la E.

Coli, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus Thuringensis* debido a la presencia del compuesto 4-(4'-O-acetil- $\alpha$ -L-ramnopiranosiloxi)-isotiocionato de bencilo. Además, los aceites esenciales de las hojas, extractos etanólicos de semillas y hojas, poseen una capacidad antifúngica. (Bravo Gallardo, 2017)

Según las investigaciones de Okuda et al.,(2011),( citado en Bravo Gallardo,2017) sostiene que el compuesto activo que le da la efectividad de las semillas se deben a un polielectrolito de 13,0 kDa, el cual fue extraído en una solución salina 1.0 M de NaCl y dicha efectividad se debe al aumento de las fuerzas iónicas que causa el aumento de la solubilidad de los compuestos activos y así se mejora la capacidad neutralizadora de las cargas superficiales de la suspensión y así generar menor repulsión electrostática y se permite la formación de una estructura en forma de red que ayuda a eliminar los sólidos suspendidos.

De acuerdo con los estudios de Ndabigengesere, et al (1995, citado en Bravo Gallardo.2017), las semillas de la Moringa utilizadas con cascara, presentan la capacidad de tratar aguas con alta turbidez (Aprox. 426 NTU), mientras que las semillas sin cáscara son especiales para tratar las aguas con una turbidez baja (Aprox. 105 NTU) en las cuales se han necesitado solo la cantidad de 50mg/L, en cambio cuando se emplean la dilución con cáscara en esta misma agua de baja turbidez, se necesitan hasta 10 veces más de cantidad y esto se debe porque que las soluciones con cáscara las proteínas están menos activas.

En una central de sacrificio se realizaron pruebas con la Moringa Oleífera para la remoción de turbiedad, color, DBO, DQO Sólidos Suspendidos Totales (SST), coliformes y fecales. Para este estudio se utilizaron semillas de moringa que fueron trituradas y tamizadas para una consistencia fina, la cual proporcionaba un 40% de su peso en aceites y grasas,

haciendo necesario su extracción por no presentar propiedades coagulantes a través de dos procesos: prensado y disolución en alcohol etílico (etanol al 95%), para el cual se utilizó el segundo agregando 50 g de polvo de Moringa en 200 ml de Etanol y se agitó durante 2 min a 1300 rpm, dejando secar en 24 horas. (Arias-Hoyos et al., 2017)

Para la preparación de la mezcla que contiene el M. oleífera se utilizó una concentración de NaCl 5M y 50g de polvo de la moringa con movimiento magnético por 20 min a 200 rpm. El NaCl favorece que la proteína catiónica de la moringa se vuelva soluble en el agua turbia. (Arias-Hoyos et al., 2017)

Los resultados de la investigación de Arias-Hoyos et al., (2017), se resumen en la tabla número 27:

**Tabla 27**

*Resultados de Remoción de la Prueba Test de Jarras*

Jarras	Parámetros					
	Dosis (mg/L)	Dosis (ml)	Turbidez (NTU)	% de Remoción	Color Pt/Co	% de Remoción
1	500	10	868	24	30.700	11
2	1.000	20	724	37	25.800	25
3	2.000	40	860	25	26.200	24
4	3.000	60	740	35	31.500	9
5	4.000	80	840	27	25.800	25
6	5.000	100	832	27	22.200	36
7	5.500	110	452	60	27.500	20
8	7.500	150	309	73	21.300	38
9	10000	200	303	74	17.000	51

**Nota.** Fuente: (Arias-Hoyos et al.,2017, p.6)

De acuerdo con la información registrada en la tabla 27, se evidencia que los mejores resultados obtenidos con turbidez inicial de 1.144 NTU y color de 34.500 Pt/Co fue en las jarras

8 y 9 con una eficiencia de 73 y 74% y con la dosis de 7.500 y 10.000 mg/L respectivamente. También en otras pruebas de jarras se demostró que el polvo de *M. oleífera* disminuyó los parámetros de DQO, DBO, DDT, coliformes totales y fecales, SST con porcentajes mayores al 90% y no afectó el pH y tampoco se vio en la necesidad de modificar el mismo. (Arias-Hoyos et al., 2017)

### ***Jatropha Curcas***

De esta planta se han utilizado las semillas diluidas en agua destilada, Cloruro de sodio o hidróxido de sodio en diferentes concentraciones: 0,5 M de NaCl, 0,005 M de Na(OH) y en agua destilada, con dosis de 120 mg/L a un pH 3 eliminando la turbidez a un 98% teniendo en cuenta que el coagulante presente es una proteína catiónica y a medida que aumenta el NaCl, aumenta la solubilidad de la proteína en la solución y con esto aumenta también la capacidad electrolítica gracias al desplazamiento salino. (Bravo Gallardo, 2017)

### ***Cassia Obtusifolia***

De esta planta se utilizan las semillas secas y según los estudios, han mostrado gran efectividad en el tratamiento de las aguas residuales con alto contenido de sólidos suspendidos totales (SST) con una remoción del 86,9% y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 36,2%, esto se debe a la presencia de proteínas y ácidos grasos, aunque en otros estudios se recomienda usar la goma y a un pH bajo porque así este polímero proporciona una superficie cargada positivamente y logra una buena reacción con las partículas coloidales negativas. (Subramonian et al., 2014, citado en Bravo Gallardo, 2017)

Según estudios, se han utilizado dosis de 0,75g/L de *C. Obtusifolia* para eliminar los SST y DQO, obteniendo resultados de un 86,9% en sólidos suspendidos totales y un 36,2% en la

demanda química de oxígeno, convirtiéndolo en un eficaz coagulante floculante natural de acuerdo con sus variados mecanismos: adsorción, neutralización de la carga, floculación de barrido, puente de partículas.(Bravo Gallardo, 2017)

Entre los estudios que se realizan con esta planta para el tratamiento de las aguas residuales, se encuentra el estudio de la participación del , se debe ajustar a 4 unidades de pH y así garantizar la carga positiva de los polímeros, por lo tanto el equilibrio de carga se basa en el ajuste de los iones  $H^+$   $OH^-$  y manteniendo el pH equilibrado, se permite los mecanismos de adsorción y neutralización de carga, permitiendo la formación de flóculos a través de las fuerzas de Van der Waas ; además, la temperatura alta no contribuye a la formación de los flóculos, por lo tanto es otro parámetro a tener en cuenta. (Bravo Gallardo, 2017)

### **Phaseolus Vulgaris**

Se caracterizan por poseer una gran cantidad de proteínas entre el 20 y 30%, en las cuales se encuentran la faseolina o globulina, albúmina, prolamina y glutelina, las cuales se obtienen en soluciones de 0,5 M de NaCl donde se utiliza el extracto crudo de la semilla y se prepara con caolín y agua cruda presentando una eficiencia del 47,7% en la eliminación de la turbidez y 2,32% en la reducción de la DQO. (Bravo Gallardo, 2017)

De acuerdo con los estudios de Antov et al, (2017, citado en Bravo Gallardo, 2017) la actividad coagulante obtuvo mejor resultado en aguas alcalinas, donde se realizaron varios ensayos y se obtuvo mejor eficiencia a un pH 10, mientras que en pH 9 la eficiencia se vio afectada. También se realizaron estudios con diferentes masas moleculares del componente activo del frijol con fracciones e 10, 10 a 20 y 30 Da, de las que se obtuvieron 0.36, 0.04 y 0.47

mg/L de concentración en una mezcla de 0,5M de NaCl y la solución de 30Da obtuvo la eficiencia del 47,7%. (Bravo Gallardo, 2017).

### **Tamarindus Indica (Semilla de Tamarindo)**

La semilla de Tamarindus Indica presenta entre sus compuestos un 57,1% de carbohidratos, 13,3% de proteínas y 11,3% de agua, donde las proteínas están formadas en su mayoría por ácido glutámico y aspártico los cuales son responsables del proceso de coagulación y también cuentan con la presencia de glicina y leucina. (López & Campos, 2011)

En los estudios realizados por López & Campos (2011), se trataron dos tipos de agua: la primera es un agua residual industrial proveniente de la industria textil con una elevada turbidez y color provenientes del proceso de entintado y lavado de prendas; la segunda es agua provenientes de los hogares presentando poca turbidez y poco color, pero con otros componentes como: materia orgánica, sólidos, tensoactivos, sustancias desinfectantes y un pequeño volumen de químicos.

Los resultados reportados por López & Campos (2011), en el estudio de la semilla de tamarindo que fue utilizada en  $3500 \pm 500$  ppm presentando una remoción de la turbidez muy baja del 18,9% y DQO del 36,7%, estos valores fueron de las aguas residuales industriales.

En las aguas residuales domésticas, se utilizó la semilla de tamarindo en  $4667 \pm 1115$  ppm en un pH de 5,56 y se obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción: turbidez 22% y 43% de DQO, siendo este porcentaje más alto que en las aguas residuales de la industria textil y por tanto el autor recomienda el uso de las semillas para aguas domésticas residuales. (López & Campos, 2011)

### **Ipomoea Incarnata**

En los estudios realizados por Martínez et al., (2017) se realizaron pruebas de jarras para demostrar la efectividad de esta planta en el tratamiento de aguas residuales industriales, obteniendo una gran efectividad en la remoción de la turbiedad, los resultados de dicha investigación se muestran en la tabla 28, donde sus resultados evidencian que los extractos naturales de la Ipomea Incarnata son efectivos para la remoción de la turbidez.

**Tabla 28**

*Resultados de Remoción de Turbidez con diferentes Coagulantes.*

<b>Coagulantes</b>	<b>Turbidez Inicial (NTU)</b>	<b>Turbidez Final (NTU)</b>	<b>Porcentaje de Remoción (%)</b>
<b>Sulfato de Aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)</b>	920	8.62	99.06
<b>Sulfato de Cobre (CuSO<sub>4</sub>)</b>		17.86	98.06
<b>Sulfato de Hierro II (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)</b>		8.17	99.11
<b>Sulfato de Hierro III (FeSO<sub>4</sub>)</b>		12.07	98.69
<b>Ipomoea Incarnata</b>		7.51	99.18
<b>Moringa Oleifera</b>		6.54	99.29

*Nota. Fuente: ( Martínez et al., 2017, p.4)*

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 28, se presenta una remoción del 99.18% de la turbidez utilizando la Ipomea I. y del 99.29% con la Moringa O. destacando el gran poder de coagulación de estos polímeros naturales en comparación con los sulfatos presentado.

## Resumen Polímeros Naturales Utilizados en el Proceso de Coagulación Floculación.

Los polisacáridos y las proteínas que se encuentran en las especies vegetales han sido un componente activo utilizado con gran eficiencia en la purificación de aguas servidas. Según estudios en la *Moringa oleifera* su componente activo es la proteína y ésta ha demostrado una gran eficiencia del 98% en los procesos de coagulación de la turbidez y se ha demostrado que se puede utilizar tanto la semilla con cáscara, como sin ella, también es de tener en cuenta que entre los parámetros más estudiados en el tratamiento de aguas residuales se encuentra la reducción de turbidez. (Bravo Gallardo, 2017).

En la tabla 29, se resumen algunos vegetales utilizados en la reducción de contaminantes:

**Tabla 29**

*Resumen de la actividad Coagulante y floculante de diferentes especies.*

Especie vegetal/Animal	Partes Utilizadas	Agente Coagulante	Solución de Extracción	Dosis Coagulante (mg/L)	pH	Reducción de Contaminantes (%)				Referencias Bibliográficas
						Turbidez	Color	SS T	DQO	
<b>Moringa Oleifera</b>	semillas con cáscara	Proteínas	Agua Destilada	500	7	95				(Gassenschmi et al, 2005)
<b>Moringa Oleifera</b>	semillas sin cáscara	Proteínas	Agua Destilada	50	7	98,2				Gassenschmi et al, 2005
<b>Cassia Obtusifolia</b>	Vainas	Proteínas	Agua Destilada	750	4			86,9	36,2	Singh et al, 2009
<b>Jatropha Curcas</b>	semillas con cáscara	Proteínas	0,5 M NaCl	120	3	99				Abidin et al, 2011
<b>Aesculus Hyppocastanum</b>	Semillas	Proteínas	Agua Destilada	0,5	10	80				Scriban et al, 2009
<b>Quercus Robur</b>	Semillas	Proteínas	Agua Destilada	0,5	10	70				Scriban et al, 2009
<b>Abelmoschus esculentos</b>	Vainas	Polisacáridos	Agua Destilada	3,2	6	97,24	93,57		85,69	Mishra et al, 2002
<b>Plantago Mayor L</b>	Semillas	Polisacáridos	Agua Destilada	300	6,5		82	92		Chaibakhsh et al, 2014

Especie vegetal/Animal	Partes Utilizadas	Agente Coagulante	Solución de Extracción	Dosis Coagulante (mg/L)	pH	Reducción de Contaminantes (%)				Referencias Bibliográficas
						Turbidez	Color	SS T	DQO	
<b>Opuntia Ficus Indica</b>	Mucílago	Polisacáridos	Agua Destilada	40	7	91				Narhingo et al, 2015
<b>Vitis Vinifera</b>	Semillas	Polifenoles	70% Etanol	1500	6		95			Jeon et al, 2009
<b>Plantago Psyllium</b>	Cáscara	Polisacáridos	Agua Destilada	400	7		27	41	17	Mishra et al, 2002
<b>Phaseolus Vulgaris</b>	Semillas	Proteínas	0,5 M NaCl	0,25	10	47,7				2,32 Antov et al, 2010
<b>Vicia Faba L.</b>	Semillas	Proteínas	Agua Destilada	0,5	7	48				Kukić et al, 2015
<b>Residuos Agrícolas</b>		Ácido-2-hydroxypropanoico	Agua Destilada			98		2,3		8 Moldes et al, 200
<b>Residuos Agrícolas</b>	Semillas	2-hidroxipropanoato de calcio	Agua Destilada			85				Moldes et al, 200
<b>Escamas de Pescado</b>	Escamas	Proteínas	Agua Destilada	5000	7		90		98	Musa et al, 2015

**Nota.** Fuente: (Bravo Gallardo, 2017, p.94)

Como puede observarse en la tabla 29, diferentes estudios han demostrado que la M. olifeira presenta un desempeño mayor al 98% y de allí la importancia de su estudio en numerosas investigaciones por ser tan eficiente en la eliminación de diversos tipos de contaminantes: turbidez, sólidos suspendidos y hasta metales pesados en aguas residuales y por ello la importancia de ser usado a nivel industrial. Como puede observarse en la tabla anterior, la M. olifeira utilizada con cáscara presenta una alta actividad coagulante en aguas con turbidez de 426 NTU, mientras que las que se usaron sin cáscara, son muy buenas para baja turbidez desde los 105 NTU, con la diferencia que en las semillas con cáscara se necesitan mayor cantidad de

concentración del producto a utilizar porque las proteínas activas se encuentran menos concentradas en los extractos acuosos.(Bravo Gallardo, 2017)

En otros estudios bibliográficos realizados por (Guzmán et al., 2013), se evalúan los coagulantes naturales catiónicos, aniónicos y no iónicos, los cuales presentan una actividad positiva en la reducción de turbidez, donde la especie *M. Oleifera* presenta el mejor desempeño de coagulación con un porcentaje del 94 al 96% en la remoción a la cual le sigue las variedades de opuntia, dando un rango del 90 al 92%. Otra especie para destacar es la de los taninos, la cual es un excelente eliminador de la turbidez.

En la tabla 30 se resumen los estudios realizados por Guzmán et al, (2013), describiendo algunos parámetros necesarios en la eficiencia de los procesos de Coagulación floculación:

**Tabla 30**

*Productos Naturales Evaluados y Probados para Reducir la Turbidez*

<b>Material Vegetal</b>	<b>Turbidez Inicial (ntu)</b>	<b>Eficiencia de Remoción (%)</b>	<b>Dosis Óptima (mg/l)</b>	<b>Referencia</b>
Coagulantes aniónicos <b>Nimali (<i>strychnos potatorum</i>)</b>	18-21; 38-42;130-135	83 -88	1,0 - 2,0	(Babu & chaudhuri, 2005)
Coagulantes catiónicos <b>Moringa oleifera</b>	18-21; 38-42;130-135	94 – 99	100 – 200	
<b>- amorpha fruticosa ( falso indigo bush)</b>	17,5; 30; 70	80, 70, 80	5, 5, 10	(Scriban et al, 2005)
<b>Ceratonia siliqua (carob)</b>	17,5; 30; 70	100, 80, 80	20, 10, 10	

<b>Material Vegetal</b>	<b>Turbidez Inicial (ntu)</b>	<b>Eficiencia de Remoción (%)</b>	<b>Dosis Óptima (mg/l)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Robinia psuedoacacia (black locust)</b>	17,5; 30; 70	60, 60, 60	5, 10, 10	
<b>Phaseolus vulgaris (cargamanto)</b>	17,5; 30; 70	80, 60, 65	5, 10, 10	
<b>Cactaceuos opuntia</b>	176	90	30 – 50	(Zhang et al, 2006)
<b>Polímero catiónico a base de tanino (tbp) pH entre 4,0 y 7,0</b>	100	85	0,15 – 0,30	(Graham et al, 2008)
<b>Acacia siamea (exudado gomoso)</b>	10 – 100	80 – 95	50	(Fernández et al, 2008)
<b>Opuntia spp</b>	125	90 – 92	5 – 15	(Miller et al, 2008)
<b>Moringa olifeira</b>	125	90 – 92	15	(Miller et al, 2008)
<b>Aesculus hyppocastanum (castaño)</b>	70, 35, 17,5	40 – 85	0,5	(Scriban et al, 2009)
<b>Castanea sativa (castaño común)</b>	70, 35, 17,5	40 – 85	0,5	
<b>Quercus robur (roble común)</b>	70, 35, 17,5	40 – 85	0,5	
<b>Quercus cerris (roble turco)</b>	70, 35, 17,5	40 – 85	0,5	
<b>Quercus rubra (roble rojo)</b>	70, 35, 17,5	40 – 85	0,5	
<b>Moringa oleifera</b>	49	96 ± 2	250	(Pritchard et al, 2009)
<b>J. Curcas</b>	49	95 ± 1	50	(Pritchard et al, 2009)
<b>Schinopsis balansae (quebracho)</b>	123	80 – 95	0,25	(Beltrán et al, 2010)
<b>Acacia meanssi (acacia australiana)</b>	200	75	12,5	(Beltrán et al, 2011)

<b>Material Vegetal</b>	<b>Turbidez Inicial (ntu)</b>	<b>Eficiencia de Remoción (%)</b>	<b>Dosis Óptima (mg/l)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Tanfloc (coagulantes a base de taninos)</b>	100	50 – 60	2	
<b>Tanfloc (coagulantes a base de taninos)</b>	80	100	20	(Sánchez et al, 2010 <sup>a</sup> )
<b>Moringa oleifera</b>	80	95	20	(Sánchez et al, 2010 <sup>b</sup> )
<b>Silvafloc (coagulante a base de taninos)</b>	80	85	20	
<b>Phaseolus vulgaris (fríjol común)</b>	35	72,3	0,7 – 1,0	(Antov et al, 2011)
<b>Moringa oleifera</b>	90 - 120	86,9	50	(Asraffuzzaman et al, 2011)
<b>Dalichos lablab</b>	90 – 120	84,5	50	
<b>Cicer arietinum</b>	90 - 120	93,8	50	
<b>Coagulantes no iónicos Cyamopsis tetragonolobus (goma guar)</b>	49	90 ± 2	50	(Pitchard et al, 2009)

**Nota.** Fuente: (Guzmán et al., 2013, p.7)

De acuerdo con los datos suministrados en la tabla 30, se muestran los porcentajes de remoción obtenidos por diversas plantas, entre las cuales se pueden destacar la eficiencia superior al 90% de las siguientes especies vegetales: Goma Guar, Opuntia Spp, Moringa Olifeira, Schinopsis balansae (Quebracho), Cactaceuos Opuntia, aunque también se deben de tener en cuenta las otras especies porque sirven para tratamientos de aguas que no sean de consumo humano.

Para concluir el capítulo VIII que abordó el tema de los coagulantes naturales, se debe destacar la gran eficiencia que presentó la Opuntia Ficus Indica, removiendo la turbidez desde el 82.25% al 94.84%, siendo un buen coagulante en el proceso, además de no alterar el pH del

agua, parámetro que es afectado por las sustancias químicas cuando se emplean en el proceso de Coagulación Floculación.

También se puede destacar la efectividad del Cactus *Lefaria* presenta un buen desempeño como coagulante, presentando resultados del 70 al 80% de remoción, al igual que el almidón que mostró un desempeño óptimo como si se tratara del Sulfato de Aluminio.

Otro de los polímeros Naturales estudiados fue la *Moringa Olifeira*, la cual se ha caracterizado a lo largo de esta monografía por su gran poder para remover la turbidez, el color, DQO, DBO cuando se trabajó con la semilla, además de cumplir con funciones anti fungicidas y micóticas, siendo un compuesto muy versátil en el proceso de tratamiento de aguas, cuando se usa con hojas.

De los estudios tratados en este capítulo sobre la *Moringa*, vale la pena destacar que tiene gran capacidad para eliminar la turbidez alta en las aguas residuales, pero para lograrlo se debe de preparar el coagulante con la cáscara de la semilla, ya que se aporta mayor cantidad del polielectrolito de 13.0 KDa.

En la tabla 29 se describieron los compuestos activos de los productos naturales utilizados en el proceso de coagulación floculación y se dice que el polímero activo de la *Moringa O.* es la Proteína; también para tener en cuenta que esta planta no altera el pH del agua tratada, pero sí se debe ajustar el agua para tener un balance de  $H^+$  y  $OH^-$  y así obtener los mejores resultados mayores al 90% de remoción de la turbidez.

En los estudios con el frijol (*Phaseolus Vulgaris*), se destacaron por poseer una gran cantidad de proteínas entre el 20 y 30%, en las cuales se encuentran la faseolina o globulina, albúmina, prolamina y glutelina, preparados en solución de NaCl 0.5 M y mostrando la

efectividad del 47.7% de remoción de la turbidez, a pesar de presentar alta cantidad de proteínas catiónicas, no es el resultado adecuado que se espera para la remoción de la turbidez. Aunque un parámetro a tener en cuenta es que estas proteínas coagulan mejor en aguas alcalinas a un pH de 10 unidades.

Los extractos naturales para tener en cuenta cuando son aguas ácidas son los provenientes del *Jatropha Curcas*, del cual se extraen las proteínas catiónicas de las semillas y diluidas en NaCl 0.5M permitiendo el aumento de la solubilidad de la proteína en la solución y aumentando la capacidad electrolítica gracias al desplazamiento salino, eliminando el 98% de la turbidez según los estudios analizados en el apartado 8.6.

La semilla de Tamarindo (*Tamarindus Indica*) el 13,3% de proteína, las cuales están formadas en su mayoría por ácido glutámico y aspártico y se les atribuye la responsabilidad del proceso de coagulación, capaces de remover del 18% al 22% de turbidez. Es de aclarar que según los estudios las aguas residuales presentaban muy baja turbidez y faltan ensayos en aguas bien turbias para destacar su poder coagulante.

Se destaca el gran poder coagulante de muchas plantas estudiadas en este capítulo por presentar entre sus compuestos. Proteínas, polisacáridos, entre otros compuestos que le dan el carácter catiónico o aniónico al polímero y permite la interacción con los coloides o partículas a través de la atracción de cargas o por las fuerzas de Van der Waals

## Conclusiones

El agua es un recurso muy valioso para el ser humano, de ella depende nuestro metabolismo y el metabolismo de muchos seres vivos que conforman el planeta tierra. Al estar formada por dos átomos de Hidrógeno y uno de Oxígeno, la hace muy polar y por ello no la encontramos en forma pura en la naturaleza, aunque por su bajo punto de fusión y ebullición, es fácil de encontrar en los tres estados el planeta tierra.

Al ser el agua un recurso importante y necesario, es empleado por el hombre en todos sus contextos: en el hogar, diversión, industria y comercio, motivo por el cual la convierte en agua residual, cargada de partículas que alteran su color, sabor y propiedades, estos cambios afectan los ecosistemas acuáticos y acaban con la vida de muchos seres vivos.

En este orden de ideas, el tratamiento de las aguas residuales no es un gusto, sino una necesidad para la conservación de las especies y de la vida misma, así antes de verter las aguas residuales se pueden eliminar las cargas contaminantes y evitar la contaminación de ríos, lagunas, mares y otros efluentes. Para lograrlo se utiliza un proceso llamado Coagulación Floculación y ese fue el motivo de esta monografía.

Entre los procesos estudiados en esta monografía, se encontraron: Polímeros Naturales, sustancias con gran capacidad de atracción de partículas presentes en el agua y remoción de estas, al presentar las mismas cargas que tienen los productos químicos utilizados para tal fin. Entre los estudios evaluados estaba la combinación de polímeros naturales con sales químicas y el proceso de electrocoagulación.

Entre los estudios analizados para la combinación de polímeros naturales y <sup>y</sup> la efectividad del almidón de yuca ( *Manihot Esculenta Crantz*) con la combinación de  $Al_2(SO_4)_3$ ,

$\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  para remover los parámetros de color y turbidez, : con el  $\text{FeCl}_3$  se utilizaron 300 mg/L y se removió el 91.2% de turbiedad (3.6 NTU) con concentración inicial de 41 NTU; el resultado obtenido con el  $\text{Ca(OH)}_2$  fue de 5.4 NTU (87.9%). con una turbidez inicial de 44.7 NTU y se utilizaron 400 mg/L del compuesto; otra de las aguas iniciaron con una concentración de 74.6 NTU a la cual se le agregaron 300 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y la turbiedad final fue de 17.8 NTU (76.1%).(Alcocer et al., 2018)

El sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) con almidón logró una remoción del 87.4% de la turbidez, con la pectina el 89.2%, con el tamarindo en agua 87.6, mostrando una gran eficiencia en la remoción del parámetro de la turbidez y teniendo en cuenta que el solo Sulfato remueve el 86%, se destaca la efectividad al ser mezclado con polímeros naturales. .(Sandoval et al., 2019)

Es de tener en cuenta que tanto el Sulfato de Aluminio al mezclarse con el agua proporciona hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), al igual que las proteínas y polisacáridos presentes en los polímeros naturales, que proporcionan atracción a las partículas allí presentes y su posterior sedimentación.

Entre los parámetros a tener en cuenta en el proceso de Coagulación Floculación se encuentra el pH, éste es muy importante tener en cuenta porque cuando los coloides han absorbido los iones  $\text{OH}^-$ , estos se pueden destruir por el aumento de los  $\text{H}^+$  y en efecto contrario no se da la coagulación y posterior floculación, por eso es importante conocer los puntos de pH donde cada sustancia coagulante es más efectiva.

Los estudios abordados demuestran que las sales de Hierro deben ser agregadas al agua con  $\text{pH} > 5$ , el Hidróxido de Aluminio 7.4 y 8.5, Hidróxido de Hierro  $> 6$  y Alumbre entre 5.5 y 8 unidades de pH (Lorenzo-Acosta, 2006), entre los polímeros naturales se encuentran: Mucílago

Opuntia entre 7 y 10 (Montes Gazabón et al., 2013), Almidón de Yuca 6.5 (Solís Silvan et al., 2012) y las diferentes especies de Opuntia entre 6.5 y 6.7 Unidades de pH. (Vázquez González, 1994)

Un punto a favor de los polímeros naturales es que no afectan las unidades del pH porque no producen ácidos como es el caso de los sulfatos y otras sales, lo que no implica tener que agregar sustancias neutralizadoras como el Hidróxido de Sodio o Calcio, carbonato de Calcio o Amoniacó al proceso final.

Factores como la velocidad de la mezcla también fueron evaluados en este estudio y se llega a la conclusión que la mezcla rápida permite la homogenización de la solución y que las partículas entren en contacto con el coagulante, pero este proceso debe ser en cuestión de segundos, porque después que entren en contacto empieza la floculación y si se da una velocidad muy rápida se desprenden los flóculos formados, allí la mezcla lenta debe ser más larga para que los flóculos se vuelvan grandes y sedimenten o de lo contrario el agua se vuelve viscosa y no sedimenta.

En las aguas residuales que presentan gran cantidad de metales, como es el caso de las aguas residuales de la minería, se recomienda el proceso de electrocoagulación, donde se llegó a reducir hasta el 83.04% de la turbidez (Bautista & Cecilia, 2018), en los procedimientos de Posada & Niño (2010), la placa de Cobre ( Cu) invirtió su polaridad produciendo un aumento excesivo de Cu en el agua residual y un dato para tener en cuenta es que los elementos removidos presentan una gran afinidad electrónica dentro del proceso.

Entre los coagulantes naturales estudiados, se encuentra la Opuntia Ficus Indica con porcentajes de remoción de la turbidez desde el 82.25% al 94.84%, el cactus Lefaria con

remociones del 70 al 80%; el almidón fue utilizado en otras investigaciones y se pudo comparar su eficiencia en la remoción de la turbidez, con los mismos resultados del uso del Sulfato de aluminio, mostrando ser un buen coagulante natural.

Otro de los polímeros Naturales estudiados fue la Moringa Olifeira, la cual se ha caracterizado a lo largo de esta monografía por su gran poder para remover la turbidez, el color, DQO, DBO cuando se trabajó con la semilla, además de cumplir con funciones anti fungicidas y micóticas, siendo un compuesto muy versátil en el proceso de tratamiento de aguas, cuando se usa con hojas.

De los estudios tratados en este capítulo sobre la Moringa, vale la pena destacar que tiene gran capacidad para eliminar la turbidez alta en las aguas residuales, pero para lograrlo se debe de preparar el coagulante con la cáscara de la semilla, ya que se aporta mayor cantidad del polielectrolito de 13.0 KDa.

En la tabla 29 se describieron los compuestos activos de los productos naturales utilizados en el proceso de coagulación floculación y se dice que el polímero activo de la Moringa O. es la Proteína; también para tener en cuenta que esta planta no altera el pH del agua tratada, pero sí se debe ajustar el agua para tener un balance de  $H^+$  y  $OH^-$  y así obtener los mejores resultados mayores al 90% de remoción de la turbidez.

Otro compuesto muy importante es el de la Ipomea I. en el cual se obtuvo una remoción del 99.18% de la turbidez presentando una gran eficiencia en la remoción de este parámetro y si se compara con los sulfatos se debe destacar el gran poder de coagulación de estos polímeros naturales.

En conclusión, de acuerdo con los resultados consultados y registrados, los polímeros naturales ofrecen una buena remoción de la turbidez y de otros parámetros como DQO, DBO, coliformes, hongos y bacterias. Esta gran eficiencia se debe a la cantidad de polisacáridos y proteínas presentes en sus semillas y en algunos casos hojas, las cuales le dan ese poder de atracción catiónico y aniónico para atraer las partículas y coloides presentes en el agua y sedimentarlas.

### Bibliografía

- Alcocer, V. O., Ocaña, G. L., Balcazar, C. A. T., & González, L. P. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas / Cassava Starch (*Manihot esculenta* Crantz) As a coadyuvant in the coagulation flocculation of domestic wastewater. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46.  
<https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Amorocho, D., & Fernanda, M. (2013). Optimización de la coagulación—floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre—Cajasan. *instname: Universidad Pontificia Bolivariana*.  
<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/848>
- Anguera, M. T. (1986). *La investigación cualitativa*.  
<http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/22330>
- Arango Ruiz, Á. (2012). Effects of the pH and the conductivity on the electrocoagulation of waste water from dairy industries. *Producción + Limpia*, 7(1), 59-67.
- Arango Ruíz, Á., Garcés Giraldo, L. F., & Restrepo Mejía, A. P. (2012). *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*.  
<http://repository.lasallista.edu.co/dspace//handle/10567/514>
- Arcila, H. R., & Peralta, J. J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *revista facultad de ciencias básicas*, 11(2), 136-153.  
<https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>

- Arias-Hoyos, A., Hernández-Medina, J. L., Castro-Valencia, A. F., & Sánchez-Peña, N. E. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la M.. Oleífera como coagulante natural. *15*, 29-39.  
<https://doi.org/10.18684/BSAA>(Edición
- Arreola & Canepa, J. R. L. (2013). Moringa Oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. *Ingeniería*, *17*(2), 93-101.
- Bautista, J., & Cecilia, K. (2018). *Reducción de DQO por Tratamientos físico-químicos de coagulación-floculación y electrocoagulación en aguas residuales*.  
<http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9284>
- Suárez Castillo, J. J., Navia Paz, G. A., Suárez Castillo, J. J., Navia Paz, G. A., Suárez Castillo, J. J., & Navia Paz, G. A. (2007). Aporte a la utilización de agua termal como coagulante en el tratamiento de las aguas residuales municipales. *Repositorio institucional UN* [Other, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales].  
<http://bdigital.unal.edu.co/971/>
- Botello Suárez, W. A., Ortiz Varón, J. C., & Peña Perea, S. A. (2016). Inmovilización. *Microbial immobilization on synthetic polymers for wastewater treatment. (English)*, *13*(26), 95.
- Bravo Gallardo, M. A. (2017). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales*.  
<https://docplayer.es/50251632-Coagulantes-y-floculantes-naturales-usados-en-la-reduccion-de-turbidez-solidos-suspendidos-colorantes-y-metales-pesados-en-aguas-residuales.html>
- C, A., & Marina, R. (2005). Water. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, *23*(1), 91-102.

- Campos, J. R., Bernardo, L. D., & Agua, C. I.-R. de A. y R. de. (1991). *Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento*.
- Cárdenas, I. Y. A. (2000). Tratamientos preliminares del agua.  
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- Carmona, L. N. A. (2012). Uso de las cáscaras de papa como coagulante natural en el tratamiento de aguas potables de la planta "La Diana". *Publicaciones e Investigación*, 6(0), 115-121. <https://doi.org/10.22490/25394088.1115>
- Castellanos Pinzón, F. L., & Riaño, F. (2017).; *Revision of the use of natural coagulants in the process of water clarification in Colombia*.
- Chaves, P. R., Benavides, M. J. V., Obando, A. A., Cerdas, J. V., & Esquivel, L. G. R. (2015). Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología en Marcha*, 28(4), 54-65.
- Chuiza-Rojas, M. R., Calderón, S. H., Vargas-Escobar, J. A., Borja-Mayorga, D. F., & Rennola-Alarcón, L. (2019). Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con Tuna (*Opuntia ficus indica*). *Ciencia e Ingeniería*, 40(3), 245-252.
- Coagulation and Flocculation*. (s. f.). 6.
- DAGMA. (1997). *Resolución 1074 de 1997 Departamento Administrativo de Medio Ambiente*.  
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=974>
- Díaz Claros, J. N. (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas / José Nahum Díez Claros; asesora de Tesis Estela Rosinda Álvarez Martínez*.  
<http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmch1516>

- Díaz, M., Rivas, L., Fernández, D., Salazar, D., Miller, S., & la Maza, N. (2017). Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuales oleosas. *Selection of chemical treatment program for oily wastewater.*, 44(2), 89-100.
- Díaz Silvestre, S. E. (2018). *Síntesis y caracterización de polielectrolitos asociativos multiunión obtenidos mediante polimerización RAFT en solución.*  
<http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/566>
- Dominguez, A. (s. f.). *“Método de jarras”*;  
[https://www.academia.edu/34721453/\\_M%C3%A9todo\\_de\\_Jarras\\_](https://www.academia.edu/34721453/_M%C3%A9todo_de_Jarras_)
- Domínguez, J. A. O., Canepa, J. R. L., & Trápala, M. A. A. (2010). Almidón modificado de plátano: posible uso en el tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Kuxulkab'*, 17(31), Article 31. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a17n31.403>
- Espígares, M., & Pérez, J. A. (2012). *Precipitación química ablandamiento del agua.*  
<https://docplayer.es/23951468-Precipitacion-quimica-ablandamiento-del-agua-m-espigares-garcia-y-j-a-perez-lopez.html>
- Eustaquio Rojas, J. L. (2019). Propiedades del agua. *Universidad Nacional de Trujillo.*  
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/14765>
- Flórez, J. M. C. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del Hidroxicloruro de Aluminio. *DYNA*, 78(165), 18-27.
- Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 0(1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>

- Garzón-Zúñiga, M. A., & Buelna, G. (2014). Pig farm effluents characterization and treatment in different full scale processes in Mexico. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 65-79.
- Gómez Puentes, N. A. (2005). *Remoción de Materia Orgánica por Coagulación-Floculación* [Engd, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales].  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2841>
- González, A. R., Mejias, L. S. de, Gonzalez, J. D., Ferrer, S. C., & Montiel, A. D. (2017). Uso de las semillas de Moringa oleifera como Coagulante en el tratamiento de efluentes provenientes del lavado de vehículos. / Use of Moringa Oleifera's seeds as a coagulant in the car wash wastewater. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 51(1), 31-42.
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reduction of water turbidity using natural coagulants: a review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253-262.
- Herrera, M. E. T. (2015). Evaluación del almidón de papa como floculante para el tratamiento de aguas residuales domésticas, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(2), 123-135.  
<https://doi.org/10.24054/16927125.v2.n2.2015.1877>
- López, R. G., & Campos, J. M. C. (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.
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL(2), 10-17.

- Lozano-Rivas, W. A., & Lozano Bravo, G. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio: Vol. Primera edición*. Universidad Piloto de Colombia.
- Mancipe, L. C. A., & Jaramillo, B. A. O. (2016). *Implementación de oxidantes (MIOx, NaClO, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para el mejoramiento de los procesos de coagulación y floculación de aguas residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) el Salitre* .
- Martínez, D., Chávez, M., Díaz, A., Chacín, E., & Fernández, N. (2003). Performance of Cactus Lefaria to use like coagulating in the water clarification. *revista técnica de la facultad de ingeniería. Universidad del Zulia*, 26(1), Article 1.  
<https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/5794>
- Martínez, G., & González, C. (2015). *Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano*. [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000737125](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000737125)
- Martinez García, J., & González Silgado, L. E. (2012). *Evaluación del poder coagulante del a Tuna (Opuntia Ficus Indica) para la remoción de turbidez y color en aguas residuales* [Thesis, Universidad de Cartagena].  
<http://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/137>
- Martínez, N., Julio, A., Vásquez, E., Jiménez, , & Caraballo, K. (2017). Coagulantes naturales extraídos de Ipomoea Incarnata en el tratamiento de aguas residuales industriales en Cartagena de Indias. *Scientia Et Technica*, 22(1), 109-112.
- Medio Ambiente, M. (2015). *Resoluciones / Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.  
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/resoluciones>

- Mejía, A. P. R., Ruiz, Á. A., & Giraldo, L. F. G. (2006). *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. 1(2), 20.
- Melo, G., & Turriago, F. (2012). *Evaluación de la eficiencia utilización de semillas de Moringa - Biorremediación*. <https://docer.com.ar/doc/n80enn8>
- Meza-Leones, M., Riaños-Donado, K., Mercado-Martínez, I., Olivero-Verbel, R., & Jurado-Eraso, M. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa Oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de malambo, Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 95-103.
- Montes, L. E., Olivero Verbel, R. E., & Mercado Martínez, I. D. (2013). *Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal Opuntia ficus-indica*. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/1005>
- Morales, Ó. A. (2003). *Fundamentos de la investigación documental y la monografía*. <https://1library.co/document/dzx339nz-fundamentos-de-la-investigacion-documental-y-la-monografia.html>
- Morante, G. (2002). *Electrocoagulación de aguas residuales*. studylib.es. <https://studylib.es/doc/4824047/electrocoagulación-de-aguas-residuales>
- Moreno, M., & Aldo, L. (2011). *Las semillas de Moringa Oleífera Lam como alternativa de coagulante natural para purificación de agua*. [Thesis, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Química]. <http://noesis.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/39253>
- Muñoz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales\_unlocked—universidad autónoma del estado de hidalgo instituto de ciencias básicas e ingeniería | Course Hero*.

<https://www.coursehero.com/file/14767034/Caracterizacion-y-tratamiento-de-aguas-residuales-unlocked/>

Nanjan Bellie, P. (2014). Waste water treatment by coagulation and flocculation. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, Volume 3, 479.

Nieto Orellana, C. R., & Orellana Ulloa, V. P. (2011). *Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante.*

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1510>

Ochoa-Gómez, J., Hernández, M., Sasia, P., Gómez, N., Río, F., Díaz de Apodaca, E., Valle, B., & Sánchez, F. (2003). Obtención de floculantes no iónicos y aniónicos (densidad de carga 40%) por polimerización en microemulsión inversa. Influencia del sistema tensioactivo. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4, 14-29.

Olivero, R. E., Aguas Mendoza, Y. del R., Mercado Martínez, I. D., Casas Camargo, D. P., & Montes Gazabón, L. E. (2014). Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1), 70. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.302>

Ortiz Alcocer, V., Solís Silvan, R., López Ocaña, G., & Margulis, R. G. B. (2016). Mezclas con potencial coagulante en el tratamiento de aguas residuales. (Spanish). *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*, 8(3), 1390.

Parpiuzan, E. T. P. (2012). *Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón.* 47.

Patel, H., & Vashi, R. T. (2012). Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants. *Journal of Saudi Chemical Society*, 16(2), 131-136.

<https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.12.003>

Posada, N. B. M., & Niño, G. E. A. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33-44.

<https://doi.org/10.18359/rcin.282>

*Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio.* (s. f.).

<http://eds.b.ebscohost.com/bibliotecavirtual.unad.edu.co/eds/ebookviewer/ebook/bmx1YmtfXzE1OTMzNzVfX0FO0?sid=c7fa3d90-0d9d-48ba-af3e-124c615182c6@pdc-v-sessmgr05&vid=3&format=EK&rid=4>

*Precipitacion\_quimica\_ablandamiento.pdf.* (s. f.). Recuperado 26 de enero de 2020, de

[http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Precipitacion\\_quimica\\_ablandamiento.pdf](http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Precipitacion_quimica_ablandamiento.pdf)

Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. G., & Kululanga, G. (2009).

Potential of using plant extracts for purification of Shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 799-805.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.07.001>

*Sandoval, W (2011). Determinacion de color aparente en aguas*

<https://www.meta.gov.co/web/sites/default/files/adjuntos/P-SA->

[84%20DETERMINACION%20DE%20COLOR%20APARENTE%20EN%20AGUAS%20V1.pdf](https://www.meta.gov.co/web/sites/default/files/adjuntos/P-SA-84%20DETERMINACION%20DE%20COLOR%20APARENTE%20EN%20AGUAS%20V1.pdf)

Rivas, L., & Antonio, W. (2009). *Uso del extracto de fique (Furcraea sp.) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de efluentes de pastelería.*

<http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/596>

Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008a). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta.

*Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 46, 24-38.

Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008b). *Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation.* 16.

Romero, Á. F. M. (2016). Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua. *Dominio de las Ciencias*, 2(4), 334-345.

Sandoval, M. B. A., Bautista, B. B. B., & Calle, E. R. V. (2019). Study of coagulating/flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *Ingeniería e Investigación*, 39(1), 24-35.

Solís Silvan, R., Laines Canepa, J. R., & Hernández Barajas, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 229-236.

Soya, M. (1998). Evaluación del requerimiento de nitrógeno y Fósforo en Sistemas de Tratamiento Biológico Aerobio de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 6, 65-75. <https://doi.org/10.18359/rcin.1523>

Tancara Q, C. (1993). La investigación documental. *Temas Sociales*, 17, 91-106.

Trapote Jaume, A. (2011). *Depuración de aguas residuales urbanas.* Publicaciones de la Universidad de Alicante.

- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014).  
Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación  
usando almidón de plátano. *Revista ION*, 27(1), 17-34.
- Valencia, J. A. (2000). *Teoría y práctica de la Purificación del agua*. 72.
- Vargas-Camareno, M., & Romero-Esquivel, L. G. (2006). Aprovechamiento de algunos  
materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en  
Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 19(4), ág. 37-ág. 37.
- Vázquez González, O. (1994). *Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la  
clarificación de aguas superficiales [por] Osvaldo Vázquez González*.  
<http://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/2936>
- Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., Bataller, M., Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A.,  
& Bataller, M. (2016). Coagulation-Flocculation, Filtration and Ozonation of Wastewater  
for Reuse in Crop Irrigation. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 17-34.
- Vertimientos y reuso de aguas residuales | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.  
(2010). [https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-  
hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-  
residuales](https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales)
- Wolfrom, M. L. (1951). Chemistry and industry of starch. Second Edition. Ralph W. Kerr,  
Editor, Academic Press, Inc., New York, 1950. 719 pp., *Journal of Polymer Science*,  
6(2), 254-254. <https://doi.org/10.1002/pol.1951.120060215>