

**OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS DE COAGULACION -FLOCULACION EN
EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE A PARTIR DE LA INVESTIGACIÓN
DOCUMENTAL DE COAGULANTES EN EL PROCESO DE POTABILIZACION**

ANGIE NATALIA AVILA PULIDO

Código: 20132150166

ANDRES FELIPE RODRIGUEZ ALBARRACIN

Código: 20122150026

DIRECTOR

LUIS EDUARDO PEÑA PRIETO

DOCENTE DE PLANTA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

LICENCIATURA EN QUÍMICA

BOGOTÁ D.C. 2020

**OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS DE COAGUALACION -FLOCULACION EN
EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE A PARTIR DE LA INVESTIGACIÓN DE
COAGULANTES EN EL PROCESO DE POTABILIZACION**

ANGIE NATALIA AVILA PULIDO

Código: 20132150166

ANDRES FELIPE RODRIGUEZ ALBARRACIN

Código: 20122150026

DIRECTOR

LUIS EDUARDO PEÑA PRIETO

DOCENTE DE PLANTA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

LICENCIATURA EN QUÍMICA

BOGOTÁ D.C. 2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá. D.C., _____ de _____ 2020 _____

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen	08
2. Introducción.....	09
3. Descripción del problema.....	11
2.1 Descripción del área de estudio.....	11
2.2 Planteamiento del problema.....	14
4. Justificación	16
5. Objetivos	18
4.1. Objetivo general.....	18
4.2. Objetivos específicos.....	18
6. Antecedentes.....	19
5.1. Tratamiento de Agua Potable.....	19
5.2 Calidad del Agua.....	20
5.3 Estudios frente al proceso e implementación de agentes activos para el tratamiento de aguas.....	21
7. Marco teórico.....	23
6.1. Tipos de plantas de tratamiento de agua potable.....	23
6.1.1. Filtración rápida completa.....	23
6.1.2 Filtración rápida directa.....	23
6.1.3 Plantas de filtración lenta.....	24
6.2. Tratamiento del agua potable en plantas industriales	24
6.3. Procesos de coagulación y floculación.....	24
6.3.1 Principales usos del proceso de coagulación y floculación en plantas de tratamiento de agua potable.....	25
6.3.2 Principios de la coagulación y floculación.....	25

6.4. Coagulantes en el tratamiento de aguas.....	26
6.4.1 Mecanismos de coagulación.....	27
6.4.2 Captura de precipitados o barrido.....	27
6.4.3 Compresión de doble capa.....	28
6.4.4 Adsorción y puente interparticular.....	28
6.4.5 Adsorción y neutralidad de cargas.....	29
6.5 Factores que influyen en la coagulación y la floculación.....	30
6.5.1 Decantación.....	30
6.5.2 Filtración.....	31
6.5.3 Desinfección.....	31
6.6. Procesos unitarios de potabilización.....	32
6.6.1 Pre-cloración.....	33
6.6.2 Aireación.....	33
6.7 Dosificación de coagulante y acondicionador de pH.....	33
6.8 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua	34
6.8.1 Parámetros físicos.....	35
6.8.2 Parámetros químicos.....	36
6.8.3 Parámetros microbiológicos.....	38
6.9 Planta de tratamiento de agua potable TIBITOC.....	39
6.10 Procesos de potabilización en la PTAP TIBITOC.....	41
8. Metodología y resultados.....	42
7.1. Recopilación de la información.....	42
7.2. Diseño, estructuración y escritura de la monografía	42
9. Resultados	43
8.1 Coagulantes y floculantes químicos	43
8.1.1 Cloruro férrico.....	43
8.1.2 Sulfato de Aluminio hidratado.....	43

8.1.3 PAC (coagulantes alternativos).....	45
8.2 Coagulantes Orgánicos.....	47
8.3 Coagulantes y floculantes en Colombia.....	48
8.4 Electrocoagulación.....	48
8.4.1. Estudios sobre electrocoagulación en Colombia	49
8.4.2. Otros estudios sobre electrocoagulación.....	50
10. Análisis de resultados.....	54
11. Conclusiones.....	56
12. Recomendaciones.....	57
13. Bibliografía	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red matriz del sistema de agua potable de la EAB-ESP

Figura 2. Sistemas de abastecimiento de las plantas de tratamiento de agua potable, EAB-ESP

Figura 3. Efecto del coagulante en un coloide

Figura 4. Atrapamiento de partículas en el floculo

Figura 5. Adsorción de polímeros para la formación del flóc (a) y formación del puente polimérico (b)

Figura 6. Sedimentador convencional

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas de regulación nacional.

Tabla 2. Variables y ponderaciones de algunos parámetros de calidad.

Tabla 3. Características químicas del agua con su valor aceptable frente a la regulación Nacional

Tabla 4. Características de algunos elementos y/o compuestos químicos en el agua con su valor aceptable frente a la regulación Nacional.

Tabla 5. Características microbiológicas del agua, según Resolución 2115 de 2007.

Tabla 6. Tamaño en mm de varios tipos de partículas

Tabla 7. Dosis óptima para hidróxido de aluminio y soda caustica a diferentes valores de turbiedad

Tabla 8. Comparación de características entre sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC).

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1. Proceso general de potabilización

Esquema 2. Funcionamiento de la PTAP TIBITOC perteneciente a EAB-ESP

1. RESUMEN

El desarrollo de esta monografía, se basa en una revisión y recopilación bibliográfica sobre los métodos de tratamiento de agua potable, de tipo investigación documental específicamente en los procesos de coagulación y floculación, los cuales se implementan en las plantas de tratamiento de agua potable para la sedimentación de sólidos y la eliminación y/o disminución de turbidez en el agua, los cuales son considerados como parámetros que miden la calidad y la pureza del agua; del mismo modo se consideran diversos agentes químicos coagulantes y floculantes para determinar cuáles de ellos son los más apropiados en la optimización de estos procesos.

Teniendo en cuenta lo anterior se realiza una revisión en las principales bases de datos de consulta libre y otras a las que está suscrita la Universidad Distrital Francisco José de caldas. La revisión de aproximadamente 50 artículos científicos relacionados con el tratamiento de agua potable permitió determinar los valores óptimos de diferentes parámetros físico químicos (organolépticos, pH, concentración de agentes activos, entre otros), que deben ser monitoreados en el agua para lograr un estado óptimo para el consumo humano. Además, se enfatiza en los procesos realizados por plantas de tratamiento de agua potable en la ciudad de Bogotá, encontrándose como principales agentes coagulantes el PAC (policloruro de aluminio), el cloruro férrico (FeCl_3) y el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, los cuales permiten obtener un agua apta para el consumo humano a un ritmo acelerado y a un costo relativamente asequible.

2. INTRODUCCION

Durante el tiempo se ha realizado abastecimiento de agua potable en ciudades, aldeas, y grandes metrópolis, usando “aljibes” para uso abastecimiento de agua subterránea, con el paso del tiempo se crearon sistemas de alcantarillados y baños los cuales promovieron la higiene y el mayor abastecimiento de agua a la población.

El abastecimiento de agua potable constituye un peldaño importante en el desarrollo de las regiones o países y de las poblaciones que habitan en los mismos. Un sistema de agua potable correctamente diseñado conlleva consecuencias positivas en la calidad de vida de las personas que tienen acceso a este servicio, en especial en el campo de la salud. Este sistema de agua potable debe contar con todos los elementos necesarios para captar, conducir, almacenar, tratar y distribuir de una manera eficiente el agua hasta los distintos sectores en la que ésta va a ser servida. Este sistema de agua potable entonces debe respetar las normativas vigentes que garantizan la calidad del agua potable que se quiere suministrar, reduciendo así enfermedades y muertes en las poblaciones que se benefician de este tipo de sistemas.

Refiriéndonos a nuestro país, sabemos que muchas de las pequeñas comunidades no cuentan con sistemas de agua potable o cuentan con sistemas que necesitan de urgente rehabilitación. Ya que, en Colombia, la cobertura de acueducto y alcantarillado solo alcanza cerca del 40% de la población colombiana, y cerca del 26% del agua residual es tratada mientras que el restante es desechado sin ningún tipo de tratamiento.(Asesora, 2014)

Es por eso que cada vez se estudia a fondo acerca de las tecnologías y técnicas de limpieza y desinfección para optimizar los procesos en las plantas de producción, como en el caso de los coagulantes-floculantes, donde al tener varios tipos como son orgánicos e inorgánicos, ayudan a la potabilización de agua, manteniendo los parámetros fisicoquímicos y sin alterar la

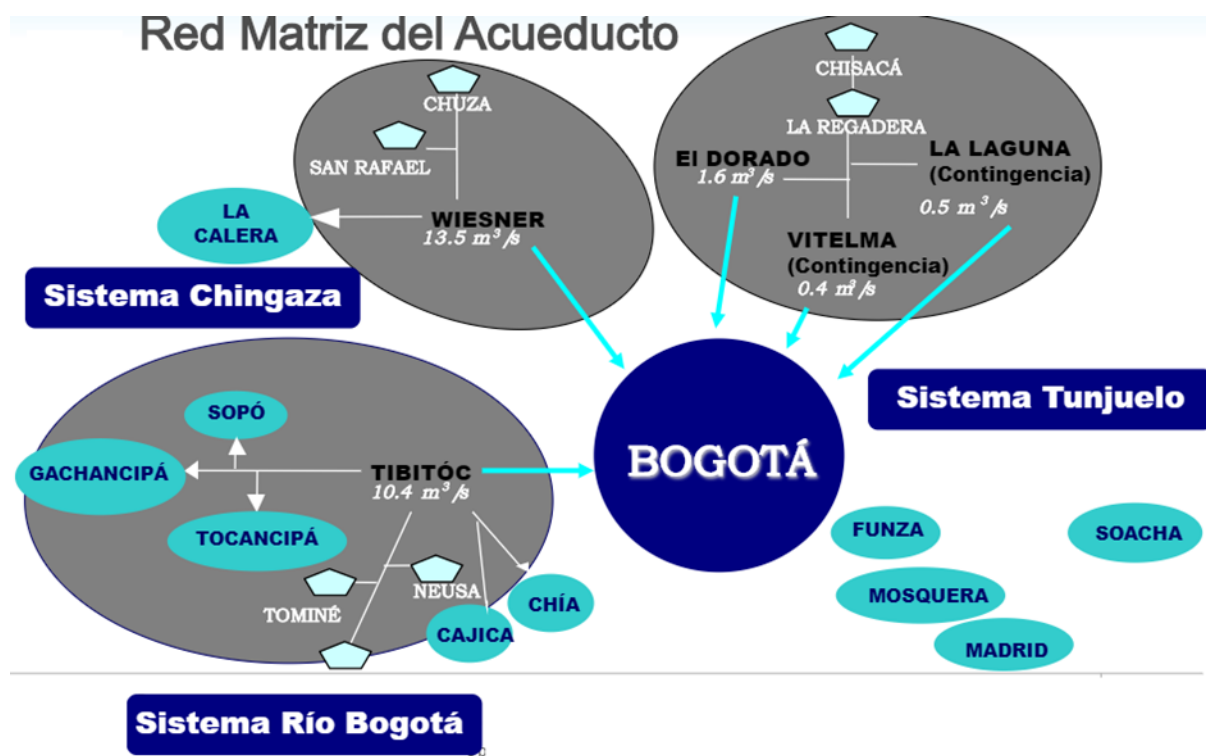
naturaleza de la misma, así como enfatizando en los diferentes mecanismos y procesos de la misma.

Al contar con diferentes estrategias de purificación de agua, también se analizará las técnicas de limpieza del agua, así como analizando cada proceso unitario y elaborando estrategias que conlleven al mejoramiento y a la efectividad de la misma.

3. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La red matriz de acueducto, cuenta con 3 plantas de tratamiento de agua potable las cuales potabilizan el agua para el uso en casas e industrias. A continuación, se describirán los 3 sistemas que componen la red de matriz de acueducto.



Fuente: (Acueducto agua y alcantarillado Bogota, 2015)
Figura 1: red matriz del sistema de agua potable de la EAB-ESP

Sistema Chingaza. Se conforma por los embalses de Chuza y San Rafael y el subsistema río Blanco. También cuenta con la planta de tratamiento Francisco Wiesner, esta se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Bogotá y está en funcionamiento desde el año 2011, la cual potabiliza el agua que consume el 80% de los habitantes de Bogotá y del municipio de la Calera.

Contiene una estructura de llegada, vertedero de excesos, estructura hidráulica de mezcla rápida de coagulantes, sistema de 16 filtros y una cámara de contacto de 50.000 metros cúbicos de capacidad.

El agua se trata a través de un sistema de filtración directa con capacidad nominal de 14m³/s.

El agua potable es conducida desde Wiesner a toda la ciudad se hace por los Túneles de Usaqué, Santa Bárbara, Santa Ana y Los Rosales.

Sistema Sumapaz, cuenca alta del río Tunjuelo. Incluye los embalses de La Regadera y Chisacá y la laguna de Los Tunjos o Chisacá. Cuenta con las plantas de tratamiento La Laguna y El Dorado (tratamiento Convencional) y el subsistema Cerros Orientales, que a su vez cuenta con las plantas de tratamiento Vitelma y Yomasa (tratamiento Convencional). (Acueducto agua y alcantarillado Bogota, 2015)

En la cuenca Tunjuelo se asienta el 30 % de la población de Bogotá. El sistema sanitario está compuesto principalmente por los interceptores Tunjuelo Medio, Comuneros.

Esta planta se abastece del embalse La Regadera y suministra en promedio 0,4 m³ /s de agua potable a usuarios que viven por encima de la cota 2800 m.s.n.m., a la Localidad 5 de Usme sobre los 2850 m.s.n.m. y usuarios que habitan en la margen derecha del río Tunjuelito (Matiz,

La planta tiene una capacidad máxima de tratamiento de 1,6 m³ /s y se realizan procesos de aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y estabilización de pH, es decir, corresponde a un sistema convencional de potabilización.(Acueducto agua y alcantarillado Bogota, 2015)

La planta trata agua proveniente de tres fuentes naturales, del embalse Los Tunjos del cual se capta 1 m³ /s, embalse de Chizacá del que se captan 6 m³ /s y el embalse de La Regadera del cual se captan 4 m³ /s. (Martinez Navarro, 2008).

Sistema Tibitóc - Agregado Norte. Incluye el embalse de Aposentos y los embalses de Neusa Sisga (CAR, Cundinamarca) y Tominé, los cuales cumplen con la función de regular el Río Bogotá, cuenta con la planta de tratamiento Tibitóc (tratamiento Convencional).

La planta de tratamiento de TIBITÓC ubicada en el municipio de Tocancipá provee el 25% del agua de la ciudad y de varios municipios de la sabana; En la parte baja de la subcuenca se localiza la bocatoma que surte de agua la dársena de almacenamiento y sedimentación de la planta de tratamiento de agua potable, que alimenta a la ciudad de Bogotá con aproximadamente $10.4\text{m}^3/\text{s}$. igualmente en su parte baja y antes de la bocatoma se localizan las compuertas del Espino, que actúan para el control de los niveles del desvió de las aguas a la bocatoma.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Tibitóc está diseñada para tratar $12\text{m}^3/\text{s}$ y se trata de una planta tipo convencional, por lo que incluye los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

La captación de agua se da a partir del cauce del río Bogotá y Teusacá, además los embalses de Sisga, Neusa y Tominé, que cuenta con volúmenes útiles usando unidades de (hectómetros cúbicos) los cuales son 102hm^3 (hectómetros por metro cubico), 102hm^3 (hectómetros por metro cúbico) y 690hm^3 (hectómetros por metro cúbico) respectivamente.

<i>Sistema Tibitoc: Agregado Norte</i>		Capacidad [Millones m ³]
Embalse Tominé		690
Embalse Sisga		102
Embalse Neusa		102
	Total	894

<i>Sistema Chingaza</i>		Capacidad [Millones m ³]
Embalse de Chuza		257
Embalse San Rafael		75
	Total	332

<i>Sistema La Regadera: Agregado Sur</i>		Capacidad [Millones m ³]
Embalse Chisacá		6.7
Embalse La Regadera		3.3
Laguna Los Tunjos		2.4
	Total	12.4

Figura 2: *sistemas de abastecimiento de las plantas de tratamiento de agua potable, tomado de:* (Acueducto agua y alcantarillado Bogota, 2015)

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, debido a la sobreexplotación de recursos, la sobrepoblación y el surgimiento de los avances tecnológicos se ha generado una serie de problemáticas de gran impacto ambiental en recursos no renovables como lo es el agua; se ha observado que este problema genera una crisis de talla mundial y nacional, puesto que se ha evidenciado que todos los recursos hídricos están sometidos a altos grados de contaminación. (Bravo, 2017)

Estos niveles de contaminación en el agua son medidos a partir de algunos parámetros fisicoquímicos que aseguran si esta agua es o no es apta para consumo humano a partir de procesos mecánicos y de la utilización de componentes químicos y biológicos para un buen tratamiento. A escala industrial, las plantas de tratamiento de agua potable de la ciudad de Bogotá cuentan con procesos convencionales y de filtración directa (Acueducto agua y alcantarillado Bogota, 2015), pero es necesario, el estudio de los procesos que se realizan y los

factores que lo afectan siendo la coagulación uno de los procesos altamente utilizados para la purificación del agua, además, es necesario identificar cuáles son las condiciones más óptimas y los agentes activos necesarios para cumplir con dicha finalidad. Por lo tanto, se podría decir: ¿Qué factores y procesos afectan la coagulación-flotación en el tratamiento de agua potable?

4. JUSTIFICACIÓN

El agua presente en el río Bogotá y otros afluentes de aguas naturales o duras, contiene una alta carga de contaminantes debido a las actividades domésticas, agrícolas e industriales que se realizan en el área circundante a sus cauces; al ser un recurso no renovable e indispensable para la vida, es necesario realizar procesos de purificación y de potabilización efectivos que garanticen la eliminación de agentes tóxicos y contaminantes que puedan afectar la salud humana.

Para el tratamiento y abastecimiento de agua potable en la ciudad de Bogotá y de los municipios aledaños se cuenta con tres plantas de tratamiento de agua potable: la planta de tratamiento Tibitóc, el Dorado y Laguna las cuales realizan un proceso de tratamiento convencional, y la planta de tratamiento Francisco Wiesner realizando un proceso de filtración directa; a partir de las características físico químicas presentes en el agua, por ejemplo, la turbiedad y el color de la misma, se determina que estas condiciones adversas del agua son causadas principalmente por partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación; la coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión, es decir, facilitar su aglomeración; este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un “floc” que pueda ser fácilmente eliminado por procedimientos de decantación y filtración.

Con este trabajo se pretende encontrar una serie de floculantes y coagulantes idóneos en proporciones adecuadas para la purificación del agua del río Bogotá para convertirla en un recurso óptimo para el consumo humano, para ello se requiere el uso de agentes coagulantes

tales como $Al_2(SO_4)_3$, PAC (policloruro de aluminio) y $FeCl_3$, adicionalmente de coagulantes orgánicos y nuevas alternativas para la potabilización del agua; en proporciones adecuadas para el tratamiento de aguas con diferentes niveles de contaminación, lo que lleva a una implementación de una metodología capaz de abordar cualquier contingencia con el fin de garantizar la remoción de gran cantidad de posibles contaminantes.

5. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Realizar y presentar los resultados de la revisión bibliográfica acerca del tratamiento de agua potable y la optimización del proceso de coagulación-floculación publicados en diferentes fuentes de naturaleza científica (bases de datos, artículos, libros, etc.)

4.2 Objetivos específicos

- Identificar en la bibliografía consultada los parámetros fisicoquímicos que influyen significativamente en los procesos de tratamiento para establecer correlaciones de importancia en la potabilidad del agua para su posterior consumo.
- Analizar los procesos de tratamiento de agua y agentes activos utilizados en algunas plantas de tratamiento de agua potable en Bogotá durante los últimos 20 años a partir de la información bibliográfica.
- Determinar a partir de investigación documental, cuales son los agentes coagulantes más utilizados en las plantas de tratamiento; que contribuyen a la potabilización del agua

6. ANTECEDENTES

Entre los diversos tipos de problemáticas al Medio Ambiente, probablemente una de las que más ha centrado la atención del mundo investigador en los últimos años ha sido el vertido de efluentes líquidos procedentes de actividades urbanas, agropecuarias, ganaderas e industriales a los medios acuáticos naturales. Esto ha sido así porque existe la conciencia de que el agua es un bien escaso, y el conocimiento de que de su correcta gestión depende en gran medida el funcionamiento de nuestra sociedad. En los últimos años, diferentes estudios han sido llevados a cabo sobre una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, que se pueden utilizar como fuente de coagulantes. Aunque se han reportado muchos coagulantes, los polímeros orgánicos se han empleado en la coagulación y floculación en las últimas cuatro décadas, en el proceso de potabilización de las aguas. Mientras que el uso de coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio es uno de los coagulantes más ampliamente utilizados en tratamientos convencionales de agua potable y aguas residuales.

5.1 TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

La relación existente entre agua y salud se conoce desde sus inicios, ya que para el hombre la alimentación era lo esencial y el agua como fuente de bebida, las aguas claras se consideraban aguas limpias mientras que las aguas de diferente color de pantanos no aptas para el consumo. Cuando no existen lagos y ríos las personas aprovechan los recursos de agua subterráneos que se extrae mediante la construcción de pozos. Cuando la población humana comienza a crecer de manera extensiva, y no existen suficientes recursos disponibles de agua, se necesita buscar otras fuentes diferentes de agua. (Hernán Alonso, 2009)

Hace aproximadamente 7000 años en Jericó (Israel) el agua almacenada en los pozos se utilizaba como fuente de recursos, además se empezó a desarrollar los sistemas de transporte y distribución del agua. Este transporte se realizaba mediante canales sencillos, excavados en la arena o las rocas y más tarde se comenzarían a utilizar tubos huecos. Por ejemplo, en Egipto se utilizan árboles huecos de palmera mientras en China y Japón utilizan troncos de bambú y más tarde, se comenzó a utilizar cerámica, madera y metal. En Persia la gente buscaba recursos subterráneos. El agua pasaba por los agujeros de las rocas a los pozos.

Alrededor del año 3000 a.C., la ciudad de Mohenjo-Daro (Pakistán) utilizaba instalaciones y necesitaba un suministro de agua muy grande. En esta ciudad existían servicios de baño público, instalaciones de agua caliente y baños. En la antigua Grecia el agua de escorrentía, agua de pozos y agua de lluvia eran utilizadas en épocas muy tempranas. Debido al crecimiento de la población se vieron obligados al almacenamiento y distribución (mediante la construcción de una red de distribución) del agua. El agua utilizada se retiraba mediante sistemas de aguas residuales. Los griegos fueron de los primeros en tener interés en la calidad del agua. Ellos utilizaban embalses de aireación para la purificación del agua. (Fernández-Crehuet, 1999).

5.2 CALIDAD DEL AGUA

Las aguas naturales casi nunca son completamente puras, ya que contienen diversas sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas y suspendidas en ellas (Marcó et al., 2004), las cuales ocasionan tres tipos de problemas en el agua: incrustación, corrosión y proliferación bacteriológica, que afectan el desarrollo normal de las actividades domésticas, comerciales e industriales (Aldana & López, 2017). Desde el momento en que se condensa en forma de lluvia, en el agua se disuelven los componentes químicos de sus alrededores, a medida que precipita a través de la atmósfera y escurre sobre la superficie del suelo se contamina por los diferentes compuestos que arrastra a su paso, posteriormente se filtra en el suelo mejorando la calidad o

contaminándose con otros compuestos como bicarbonato de calcio (dureza) al ser filtrada en áreas con piedra caliza o con cloruros al ser filtrada en áreas salinas (Marcó et al., 2004). Es de gran importancia mantener y evaluar la calidad del agua para consumo humano. Los primeros métodos eran simples y puramente subjetivos, es decir se daba respuesta a las siguientes preguntas ¿y el agua parece limpia?, ¿huele bien?, y otros. Puede que una evaluación de estas características sea suficiente para algunos procesos de consumo, pero en la mayoría de los casos, el hecho de que el agua sea un solvente tan eficaz, capaz de mantener todo tipo de sustancias, requiere métodos de evaluación más precisos, que se han desarrollado mediante técnicas analíticas hidroquímicas. Cada parámetro químico está asociado a una norma y el agua es químicamente analizada como medida rutinaria para garantizar que reúne los requisitos de calidad requeridos en cada uno de los procesos de consumo(Aldana, 2017).

5.3 ESTUDIOS FRENTE AL PROCESO E IMPLEMETACION DE AGENTES ACTIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS

Para la remoción y eliminación de contaminantes particulados se han utilizado diversas sustancias que faciliten el proceso de coagulación-floculación en las condiciones apropiadas.

A continuación, se pueden evidenciar algunos estudios realizados con este fin:

- Según “Biotecnología en el sector agropecuario industrial”, publicado en el año 2017 por “Medina, José”; se realizó el tratamiento de aguas residuales por medio de un coagulante natural (semilla *M. Olifera*), donde se realizaron diferentes test fisicoquímicos. Se midieron pH, Turbidez, Temperatura y se llegó a los resultados de una aplicación óptima de (7500mg/L) y una concentración del 5% además logró una eficiencia de remoción de 80% - 85%.

- Según “Coagulantes naturales para el tratamiento de aguas residuales” expuesto por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bravo, 2017) se determinó que sobre el uso de coagulantes y floculantes de origen natural para el tratamiento de aguas residuales y

superficiales, las semillas son las partes de las plantas más utilizadas; las cuales son extraídas de las especies *Moringa oleífera*, *Aesculus hyppocastanum*, *Quercus robur*, *Plantago mayor*, *Jatropha Curcas*, *Vitis vinífera*, *Phaseolus vulgaris* y *Vicia faba L.*

- Hasta la fecha, los tipos de especies vegetales que se han utilizado ampliamente como coagulantes naturales son *Moringa oleífera (moringa)*, *Strychnos potatorum (nirmali)*, *Opuntia ficus indica* (cactus) y *Jatropha curcas*, usados en la disminución de contaminantes para los tratamientos de aguas residuales (Sánchez Martin et al., 2010, Yin, 2010 y Abidin et al., 2013).

- Clarificación de aguas usando clarificantes polimerizados (Hidroxiclورو de aluminio) por “Cogollo, Juan” reportado por la Universidad Nacional en (2010), se puede evidenciar que el uso de Hidroxiclورو de aluminio es adecuado para remover turbidez y mejorar el pH en los niveles residuales de aluminio ya que tiene un mejor rendimiento en lechos fluidizados que contiene arena y otros residuos como metales pesados.(Flórez, 2011).

- En el tratamiento de aguas residuales por medio de arcillas inorgánicas , publicado en la universidad de Antioquia por (Biviana A. Llano, 2014) se evidencia el uso de arcillas para la remoción de sólidos suspendidos totales SST usando el test de jarras y coagulantes como sulfato de aluminio y polímero aniónico y se demostró que usando concentraciones bajas de estos dos se lograba una remoción cerca al 100% de material particulado, en concentraciones de 20mg/L y pH de 6,5.

- El artículo “Capacidad de un floculante natural” expuesto por la Universidad tecnológica de los Andes, Perú (2017); autor (David Choque) muestra los resultados de las pruebas con los floculantes naturales Neomarimondia, Opuntia Focus, donde se determinó un aumento de DQO aplicando dosis de 1%,2%,3% y se aumentó el pH de 6.68 a 7,51.(Choque-Quispe et al., 2018).

7. MARCO TEÓRICO

6.1 TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Las plantas de tratamiento de agua potable pueden clasificarse a partir de la tecnología que implementa, como planta de tratamiento convencional antigua, de tecnología apropiada y de tecnología importada, o también se clasifica de acuerdo al proceso, en donde encontramos plantas de filtración rápida y planta de filtración lenta.(Vargas, 2018).

6.1.1 Filtración rápida completa

Este tipo de plantas contiene filtros que realizan operaciones a alta velocidad, lo que disminuye la formación de biopelículas en estos; eliminando las partículas a partir de métodos físicos.(Jhon Sebastián, Alvarado Bohórquez ; Mónica Alejandra, 2018). Este tipo de plantas pueden ser de filtración rápida completa o de filtración directa.

La planta de filtración completa, realiza procesos de coagulación, decantación, filtración y desinfección.(Jhon Sebastián, Alvarado Bohórquez ; Mónica Alejandra, 2018). Para la coagulación, se realiza una agitación rápida para la homogenización del coagulante, para continuar con una agitación lenta que promueva el proceso de floculación que permita el crecimiento del floc.

6.1.2 Filtración Rápida Directa

Es un proceso apto para aguas clarificadas y poco contaminadas como la que se encuentra en los embalses, realizado a partir de la mezcla rápida y de la filtración: pero genera mayor costo

de producción y estudios convirtiéndose en una alternativa a la filtración completa.(Jhon Sebastián, Alvarado Bohórquez ; Mónica Alejandra, 2018)

6.1.3 Plantas de filtración Lenta

Se realiza un proceso de percolación del agua proveniente de distintos cuerpos de agua, por medio de capas de grava, arena, arcilla etc., esta simula un proceso espontaneo y natural con filtros que realizan procesos de carácter físico y biológico, actuando junto a otros procesos como la pre sedimentación y sedimentación, desarenación, filtración gruesa o en grava los cuales son elegidos de acuerdo al análisis y la calidad del agua a tratar. (Jhon Sebastián, Alvarado Bohórquez ; Mónica Alejandra, 2018).

6.2 TRATAMIENTO DEL AGUA POTABLE EN PLANTAS INDUSTRIALES

Una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), es la encargada de realizar una serie de procesos unitarios que permitan la eliminación de contaminantes químicos, físicos y microbiológicos de aguas crudas; teniendo en cuenta las normas estipuladas que regulan los valores admitidos.

6.3 PROCESOS DE COAGULACION Y FLOCULACION

Procesos comúnmente utilizados en plantas de tratamiento por su bajo costo y su facilidad de operación.(Sillanpää et al., 2018). Se fundamenta en la adición de agentes químicos (coagulantes) que desestabilizan eléctricamente algunas partículas, cancelando las cargas electrostáticas, al mismo tiempo que genera una compresión de la capa difusa que rodea los coloides.(Bravo, 2017), proceso seguido por la floculación, en donde se produce la formación de aglomeraciones llamadas flóculos.

6.3.1 PRINCIPALES USOS DEL PROCESO DE COAGULACION Y FLOCULACION EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Estos procesos se usan para generar la sedimentación de partículas de origen coloidal que son difícilmente filtrables durante el proceso de limpieza en plantas de tratamiento, eliminando la turbidez existente en el agua que ocasiona una mayor dificultad en la remoción de sustancias contaminantes orgánicas e inorgánicas, además de eliminar el color aparente y verdadero que generan un aspecto poco agradable; también facilita la eliminación de organismos patógenos y sustancias tóxicas en general, realizado en el mayor grado de remoción y en el menor tiempo posible.

6.3.2 PRINCIPIOS DE LA COAGULACION Y FLOCULACION

Un coloide es una suspensión de alta estabilidad que genera la turbiedad y color en el agua y que difícilmente son sedimentables. Su tamaño es muy pequeño comparado con otros tipos de partículas presentes en el agua (Tabla 6).

Tipo de Partícula	Diámetro (mm)
Grava	10
Arena Gruesa	1,0
Arena Fina	0,1
Lodo Fino	0,01
Bacterias	0,001
<i>Coloides</i>	<i>0,0001</i>

Tabla 6. Tamaño en mm de varios tipos de partículas (Andía, 2000)

Para desestabilizar y anular las cargas eléctricas de la superficie del coloide y generar el aglutinamiento que forma el floculo, (Figura 4) se realiza en proceso de coagulación y floculación, el cual es considerado el método universal en donde se adiciona un coagulante generando una nube iónica que va a neutralizar las cargas en la superficie del coloide para formar el floculo. (Figura 1).

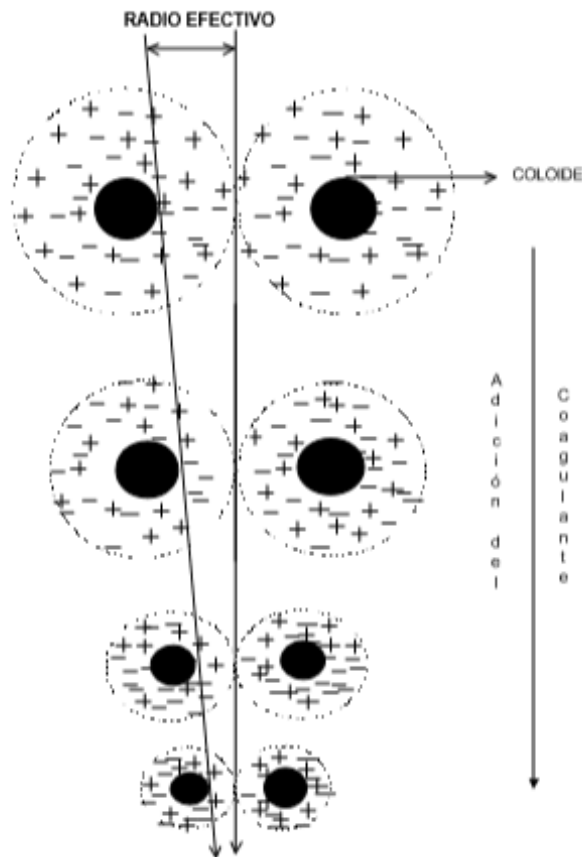


Figura 3. Efecto del coagulante en un coloide.

Fuente: (Andía, 2000)

6.4 COAGULANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

En general podemos decir que los coagulantes son aquellos compuestos de hierro o aluminio capaces de formar un floculante y que pueden efectuar coagulación al ser añadidos al agua. Por otra parte, son sustancias que producen poco o nada floc al ser utilizadas solas, pero mejoran los resultados obtenidos por simple coagulación.

Los coagulantes metálicos comúnmente utilizados se clasifican en 2 categorías:

- Coagulantes de aluminio: los que incluyen sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, aluminato de sodio, clorhidrato de aluminio, policloruro de aluminio, y formas de cloruro de polialuminio con polímeros inorgánicos.
- Coagulantes de hierro: incluyen sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico, sulfato de cloruro férrico, sulfato poliférrico y sales de hierro con polímeros orgánicos.

La popularidad de los coagulantes de aluminio y hierro surge no solo de su efectividad como coagulantes, sino también de su disponibilidad y relativo bajo costo. (Romero et al., 2007)

6.4.1 MECANISMO DE COAGULACION

Existen cuatro mecanismos fisicoquímicos para el proceso de coagulación y la formación del floculante, dentro de los cuales se encuentra la absorción y neutralidad de cargas, captura de un precipitado o barrido, absorción y puente interparticular y compresión por doble capa. (Barraque . Ch ., 1979).

6.4.2 Captura de precipitado o barrido

En este caso, se adiciona el coagulante a cantidades de agua con bajos niveles de turbiedad. El agente coagulante atrapa el coloide para la posterior formación de una red tridimensional y generación de flóculos. (Bravo, 2017). Generalmente se utiliza como coagulante sales trivalentes como sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, o Cloruro Férrico $FeCl_3$, (Cárdenas, 2000), formando un hidróxido de la sal respectiva para aumentar la formación de precipitado. Se ha encontrado que turbiedades altas necesitan una concentración mayor del coagulante (Figura 5).

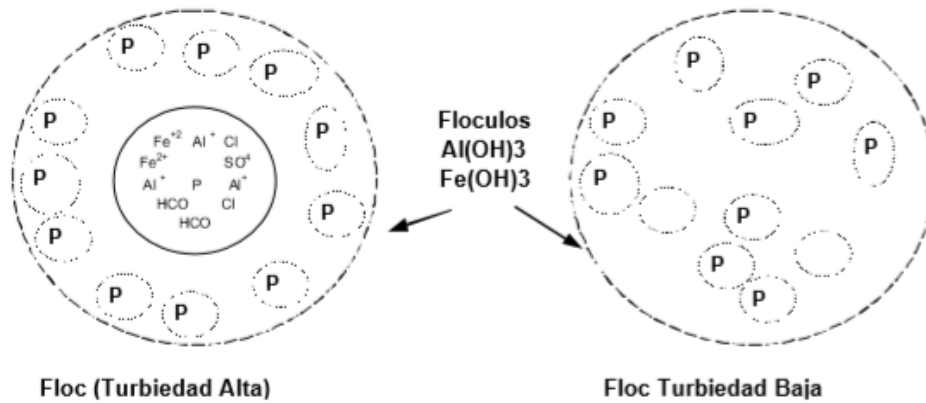


Figura 4. Atrapamiento de partículas en el floculo. Fuente: (Andía, 2000).

6.4.3 Compresión de doble Capa

Al aproximarse dos partículas semejantes, se genera una fuerza de repulsión que tiene un potencial de difusión dependiente de la distancia que las separa, esta fuerza disminuye con la adición del coagulante, ya que este proporciona iones de carga contraria que los atrae (Fuerzas de Van der Waals) y que depende de la densidad, de la partícula y de los átomos que la constituyen. (Andía, 2000)

6.4.4 Adsorción y puente interparticular

En este tratamiento se utiliza como agente coagulante moléculas poliméricas de peso molecular grande, que interactúan con la superficie del coloide (proceso de adsorción). El polímero forma puente con las partículas coloidales, ya que debido a su tamaño puede absorber varias partículas.

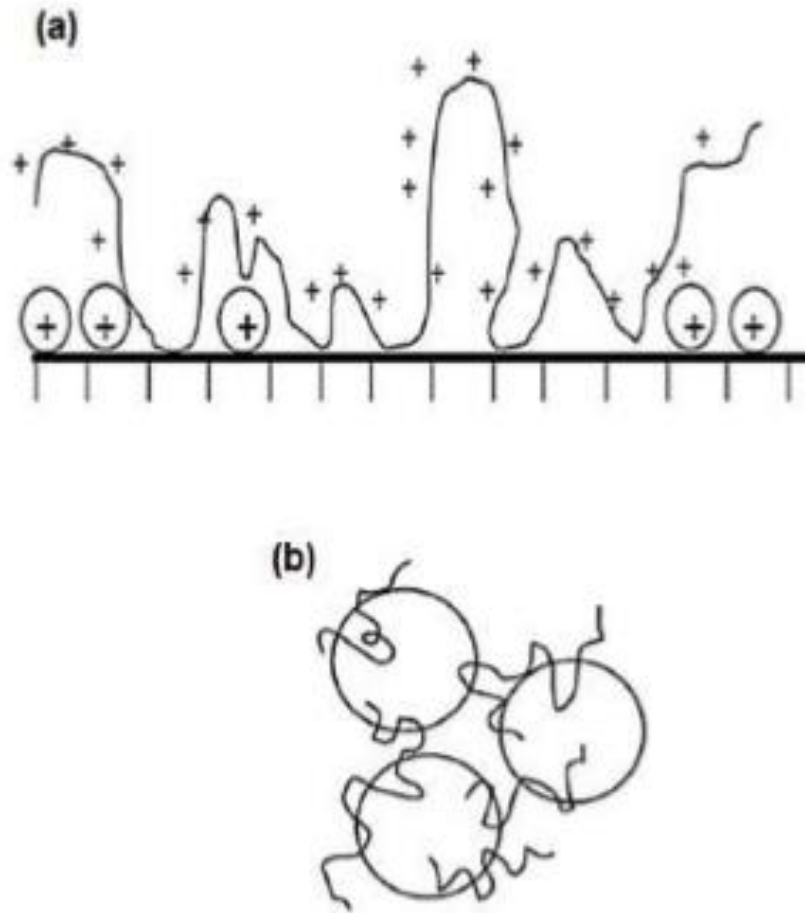


Figura 5. Adsorción de polímeros para la formación del floc (a) y formación del puente polimérico (b) Fuente: (Bravo, 2017)

6.4.5 Absorción y Neutralidad de Cargas

Los coloides poseen cargas primarias negativas en su superficie que atraen cargas positivas de compuestos pertenecientes o que se encuentren en el agua; estas se adhieren formando la capa del coloide. Al adicionar el coagulante que generalmente es inorgánico y se encuentra en exceso, ocurre una inversión de carga a la original y se re estabiliza la partícula. (Andía, 2000).

6.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACION Y LA FLOCULACION

Existen algunos factores físicos y químicos que afectan el proceso, obteniendo un resultado óptimo o deficiente en la desinfección, lo que generaría mayores gastos de proceso.

Dentro de estos factores podemos encontrar la temperatura, donde se ha encontrado que entre más fría sea el agua se necesita más tiempo para que el floculo se forme y no existirá una reacción rápida; (Restrepo Osorno, 2009) ; el tamaño de partícula es otro factor que influye pues estas deben ser menores a una micra; si sobrepasan las 5 micras son demasiado grandes para el aglutinamiento del floculo, otro factor es el pH el cual depende del coagulante a elegir y de la alcalinidad presente en el agua. Por otro lado, se ha encontrado que, al reemplazar cationes de baja valencia por otros de mayor, permiten la formación del floc a mayor velocidad.(Hernán Alonso, 2009).

La formación del floculo está influenciada por la concentración y el tamaño de las partículas presentes en el agua, además del gradiente de velocidad, puesto que si este se sobrepasa conlleva al que el floculo se rompa.

6.5.1 DECANTACION

Es un proceso físico, por el cual las partículas en suspensión se depositan al inferior, por acción de la gravedad. Este proceso depende del tamaño de la partícula y de la forma que esta tiene, favoreciendo su forma homogénea y ovalada en el proceso; además al aumentar la temperatura se optimiza la sedimentación.(Lozano-Rivas, n.d.)

Generalmente, existen tres zonas de sedimentación (Figura 7), en donde se encuentra en primera instancia la entrada donde se homogeniza el flujo que luego es ingresado a la zona de sedimentación, en donde se acentúan las partículas al interior del tanque, con una zona de lodos al inferior del tanque, los cuales son eliminados posteriormente y la zona de salida que controla

el grado de profundidad del agua en el tanque de forma que los sólidos no salgan del tanque antes de su sedimentación. (Alvarado & Rocha, 2018)

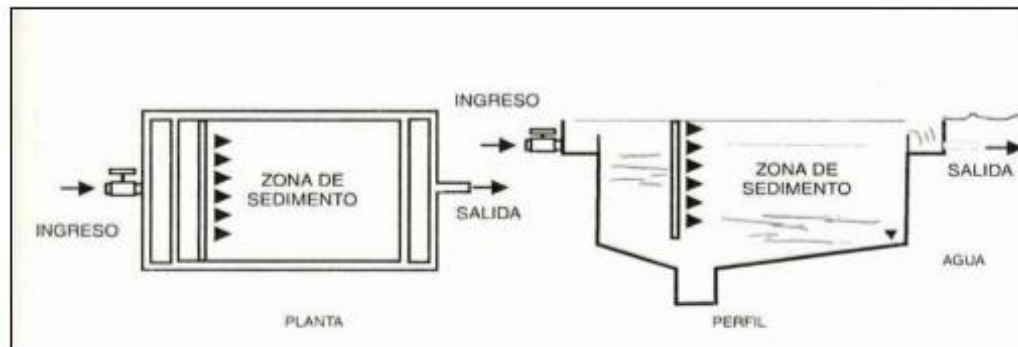


Figura 6. Sedimentador convencional. Fuente: (Alvarado & Rocha, 2018)

6.5.2 FILTRACION

Constituye la última barrera en la remoción de material particulado suspendido en el agua, (Montoya, Loaiza, Torres, Cruz, & Escobar, 2011). La remoción se lleva a cabo a través de un medio poroso que retiene las partículas, dependiendo de su densidad y tamaño. Las características del medio filtrante también influyen en el proceso de filtración (Alvarado & Rocha, 2018).

Fundamentalmente, se realiza la adsorción, en partículas que se adhieren a la superficie de los granos del filtro a través de interacciones de Van der Waals y fuerzas eléctricas. La “Water Research Association”, en Inglaterra, publicó estudios relacionados con que las filtraciones con medios filtrantes dobles (de antracita y arena) son más eficientes comparados a los que están constituidos por uno. (Arena) (Alvarado & Rocha, 2018).

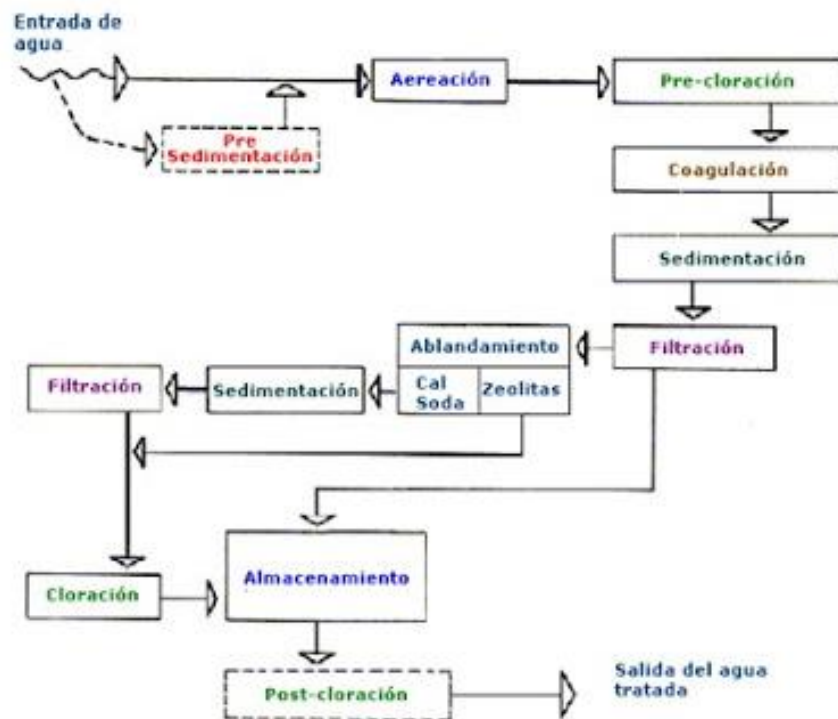
6.5.3 DESINFECCION

El mayor porcentaje de remoción de microorganismos patógenos, se realiza a través de los procesos anteriormente descritos, pero para lograr una eficiencia más alta se complementa con el proceso de desinfección, el cual se encarga de inyectar un desinfectante, que generalmente

es cloro, al cuerpo de agua logrando esta finalidad. Existen dos tipos de cloro, el cloro libre, compuesto por HClO y HCl que se forma y que actúa como desinfectante de forma eficaz a pH bajo en el agua; y el cloro combinado, el cual es conformado por las cloraminas, que se forman a partir del amoníaco presente en el agua. Generalmente para disminuir la formación de subproductos no deseados se utilizan oxidantes mixtos. (Alvarado & Rocha, 2018)

6.6 PROCESOS UNITARIOS DE POTABILIZACION

Dependiendo de las necesidades sanitarias y de las características del agua a potabilizar, se realizan varios procesos unitarios, que cumplen con los criterios necesarios para el suministro de agua de calidad. De acuerdo a los estudios del agua cruda, los procesos que generalmente se encuentran son la pre cloración, aireación, coagulación y floculación, decantación, filtración y desinfección.



Esquema 1. Proceso de potabilización general Fuente: (Univ, 2018)

6.6.1 PRE CLORACION

Este proceso se realiza para la remoción inicial de microorganismos y de hierro presente en el agua cruda, siendo efectivo en cuerpos de agua que no contengan altas cantidades de sólidos suspendidos y materia orgánica. Puede generar productos halogenados, como trihalometanos o ácidos acéticos halogenados que repercuten en la salud. Es recomendable realizar este proceso posterior a la clarificación y coagulación del agua. (Alvarado & Rocha, 2018).

6.6.2 AIREACION

Este proceso se realiza por métodos de burbujeo y aspersión por adición del gas al cuerpo de agua y a través de caídas de agua, como en la utilización de bandejas de aireación las cuales permiten el paso del agua por bandejas perforadas facilitando su ventilación. Se aplica en aguas con exceso de algunos gases como dióxido de carbono (CO_2) o ácido sulfhídrico (H_2S). El área de contacto entre el agua y el aire es un factor relevante en la optimización del proceso, además de la influencia de la temperatura ya que se ha encontrado que al ser más baja la temperatura del agua, esta puede contener una mayor cantidad de oxígeno. Cabe aclarar que un exceso de oxígeno puede generar problemas en la infraestructura de la planta al producir corrosión. (Alvarado & Rocha, 2018).

6.7 DOSIFICACION DE COAGULANTE Y ACONDICIONADOR DE PH

Dependiendo de las características fisicoquímicas del agua cruda, se requiere la adición o no de un acondicionador de pH, el cual debe seleccionarse atendiendo requerimientos de fácil manejo, solubilidad completa y economía. Las dosificaciones adecuadas de coagulante y acondicionador de pH se determinan mediante la realización de “pruebas de jarras” dependiendo principalmente, de las condiciones de turbiedad del agua.

La dosis óptima se obtiene cuando para cada muestra de agua con un valor de turbiedad determinado se logran los valores más bajos de esta característica y el aluminio residual en el agua es mínimo

Turbiedad agua cruda (NTU)	Dosis hidroxiclورو de aluminio (ppm)	Dosis soda cáustica (ppm)
0.87	24	5
1.28	25	5
2.15	26	5
2.87	27	6
4.32	28	6
7.25	29	6

Tabla 7: dosis óptima para hidróxido de aluminio y soda caustica (alcalinizante), a diferentes valores de turbiedad. Fuente: (Villabona & paz, 2013)

La dosis es un parámetro de importancia dado que si este se adiciona por debajo de la cantidad requerida, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, la formación de microfloculos es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada; si se adiciona en exceso de coagulante, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas lo que acarrea un aumento elevado de la turbiedad. (andia, 2000)

6.8 PARAMETROS FISICOS, QUIMICOS Y MICROBIOLOGICOS DEL AGUA

El agua potable es un recurso no renovable indispensable para la vida, que presenta una serie de características o parámetros que la hacen consumible por el ser humano. Según Polanco, estos parámetros son propiedades que se miden y se observan, indicando además, que la OECD (organización para la cooperación y el desarrollo económicos), realiza estudios sobre información ambiental articulada a los aspectos socioeconómicos; (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz, & D., 2014) por otra parte, el sistema de protección del agua potable en Colombia se encuentra legisladas por el decreto 2115 de 2017, el cual regula el cumplimiento de la calidad del agua que utilizamos para nuestras actividades y que es obtenida con unos parámetros específicos que se deben evaluar. Estos parámetros que son evaluados a partir de esta

resolución y aprobados por entidades como el IDEAM, permite determinar los valores permitidos en el agua para que sea confiable, sirviendo como indicadores de control y de monitoreo de las características químicas, físicas y microbiológicas del agua, (EPM GROUP), demostrando los valores máximos permitidos de algunas propiedades de los recursos hídricos y proporcionando información necesaria de estos sistemas de caudales.

6.8.1 PARAMETROS FISICOS

Los parámetros físicos a evaluar están relacionados con las propiedades organolépticas del agua, en este caso, algunas características que se valoran con más frecuencia son el olor, el cual es un indicador cualitativo que puede significar la presencia de agentes biológicos en el agua, aunque no es muy relevante en la determinación de la presencia de sustancias tóxicas; este se debe a la presencia de compuestos fenólicos y el cloro que contiene; otro parámetro es la temperatura la cual no debe encontrarse en mayor grado ya que esto influye en la solubilidad en el agua de sales y gases, aumentando la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y disminuyendo el oxígeno disuelto presente; y por último el estudio de la transparencia o el color del agua que está estrechamente relacionado con el grado de turbidez presente. (Catalán Lafuente, 1990).

La turbidez refleja el contenido de materias coloidales, orgánicas y minerales que pueden dar indicios de algún tipo de contaminación, (Fernández-Crehuet, 1999).

En las plantas de tratamiento de agua potable, los altos niveles de turbidez podrían proteger los microorganismos patógenos de los procesos de limpieza y desinfección del agua, además los ácidos húmicos y otras partículas orgánicas pueden unirse a compuestos peligrosos y tóxicos, como metales pesados y compuestos clorados. Es posible que debido a esto se aumente el empleo de cloro en el proceso de desinfección, lo que puede conllevar a la formación de compuestos tóxicos como trihalometanos y cloraminas; por esta razón es indispensable que la

turbidez no supere los 5 NTU, preferiblemente con un valor de 2 NTU evitando este tipo de problemas. (Marco, Azario, & L. Metzler, 2004). La Resolución 2115 de 2017 del decreto 1575 de 2007, establece los valores nacionales permitidos para estos parámetros.

Característica física	Definición	Expresada como	Valor máximo permisible
Color aparente	Color de la muestra antes que se asienten las partículas en suspensión (color debido al material suspendido)	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor aparente	Se debe a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición, que pueden generar el rechazo del consumidor.	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Capacidad que tiene el material suspendido en el agua para obstaculizar el paso de la luz.	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT)	2

Tabla 1. Características físicas según Resolución 2115 de 2007. Fuente: (MINAMBIENTE, 2007)

6.8.2 PARAMETROS QUIMICOS

El IDEAM, evalúa el agua a partir de cinco variables, ofreciendo valores estándar como indicador de calidad. (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz, & D., 2014). Dentro de estos indicadores se encuentra los sólidos totales, los cuales abarca la medición de sólidos disueltos en el agua que deben ser tratados por osmosis inversa y los sólidos suspendidos, que son eliminados por métodos físicos como la filtración. La demanda química de oxígeno, como la cantidad de oxígeno que se consumen en la oxidación de sustancias reductoras en el agua, nos da un índice de la cantidad de materia orgánica contaminante presente en el agua, así mismo la demanda bioquímica de oxígeno cuantifica el oxígeno capaz de oxidar compuestos orgánicos biodegradables.

El pH también es una propiedad relevante en la regulación del agua potable, midiendo la acidez, la cual puede ser de tipo mineral ocasionada por ácidos fuertes generados de la

contaminación industrial o acidez ocasionada por CO₂. (Alvarado & Rocha, 2018) Además, durante los procesos de coagulación para la descontaminación del agua, se utilizan coagulantes que aumentan el grado de acidez por lo tanto, es necesario adicionar una sustancia alcalinizante como cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)₂) en el agua para la regulación de pH. Por último, encontramos la conductividad eléctrica, que sirve como indicador de sales disueltas presentes. Los valores de estas propiedades, son estipulados por el IDEAM resolución 2115 de 2007 (Tabla 2), de acuerdo a estos se realiza su seguimiento.

VARIABLES	UNIDAD DE MEDIDA	PONDERADO
Oxígeno Disuelto	mg/L	3-4
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L O ₂	3-5
pH	Unidad de pH	6,5 y 9,0
Conductividad eléctrica	μS/cm	1000

Tabla2. Variables y ponderaciones de algunos parámetros de calidad. Fuente: (IDEAM, 2012)

Elemento, compuesto químico	Definición	Expresado como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	Este parámetro es el más conveniente y directo para determinar la cantidad total de materia orgánica presente en el agua.	COT	5,0
Nitritos	Son relativamente inestables y fácilmente oxidables a nitratos. Tienen gran toxicidad para la fauna piscícola y demás especies acuáticas.	NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	Son las formas más oxidadas del nitrógeno que se pueden encontrar en el agua. Se forman en la descomposición de las sustancias orgánicas nitrogenadas, principalmente proteínas.	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	Procede de cenizas y rocas de formación ígnea. Se demostró que en concentraciones excesivas produce fluorosis.	F ⁻	1,0

Tabla 3. Características químicas del agua con su valor aceptable frente a la regulación Nacional. Fuente: (Alvarado & Rocha, 2018)

Elemento o compuesto	Descripción	Expresado como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Uno de los principales causantes de la dureza. Representa más un problema económico por las incrustaciones en cañerías, que un problema de salud.	Ca	60
Alcalinidad Total	Capacidad del agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad del agua es debida principalmente a sales de ácidos débiles, también contribuyen las bases.	CaCO ₃	200
Cloruros	Son una medida de contaminación de origen orgánico humano, así como de la presencia de sales ionizables.	Cl ⁻	250
Aluminio	Los minerales principales asociados a este son la bauxita y óxidos de aluminio. El sulfato de aluminio se usa en la potabilización del agua como floculante.	Al ³⁺	0,2
Dureza Total	Las aguas duras imposibilitan el efecto adecuado de jabones en las aguas de uso doméstico. Sus valores altos ocasionan incrustación y corrosión en las tuberías, equipos metálicos o redes de acueducto.	CaCO ₃	300
Hierro Total	Altas concentraciones de este originan sólidos sedimentables y coloración de las aguas. Su presencia posibilita el taponamiento en las tuberías.	Fe	0,3
Magnesio	El contenido de dureza está asociado al contenido de magnesio, la formación de incrustaciones y propiedades corrosivas del agua.	Mg	36

Tabla 4. Características de algunos elementos y/o compuestos químicos en el agua con su valor aceptable frente a la regulación Nacional. Fuente: (Alvarado & Rocha, 2018)

6.8.3 PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS

Otro aspecto importante a evaluar en el agua de consumo, es la prevención y eliminación de fuentes patógenas, como las bacterias, protozoos, virus, entre otros, que causen riesgos a la

salud; generalmente la causa más preocupante en este aspecto es debido a la contaminación fecal humana y animal que existe dentro de los diversos recursos hídricos. (Organización Mundial de la Salud, 2001).

Los análisis microbiológicos, son considerados indicadores de sanidad para la determinación de la concentración de patógenos específicos, encontrando como indicador general la presencia de la bacteria *Escherichia Coli*, la cual se produce por desechos fecales presentes. (Organización Mundial de la Salud, 2001) Cabe resaltar, que este no es el único análisis a realizar y no asegura que no haya presencia de agentes microbianos generadores de enfermedades patógeno-infecciosas; un ejemplo de este tipo de bacterias son la bacteria *Legionella* y la *Burkholderia pseudomallei*, las cuales se proliferan a través del agua y el suelo.

La magnitud representativa de este parámetro es la Unidad Formadora de Colonia (UFC) ó 1 microorganismo en 100 cm³ de muestra, (MINAMBIENTE, 2007), la cual debe ser de 0.

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	< de 1 microorganismo en 100 cm ³
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm ³	0 microorganismo en 100 cm ³
Presencia – Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

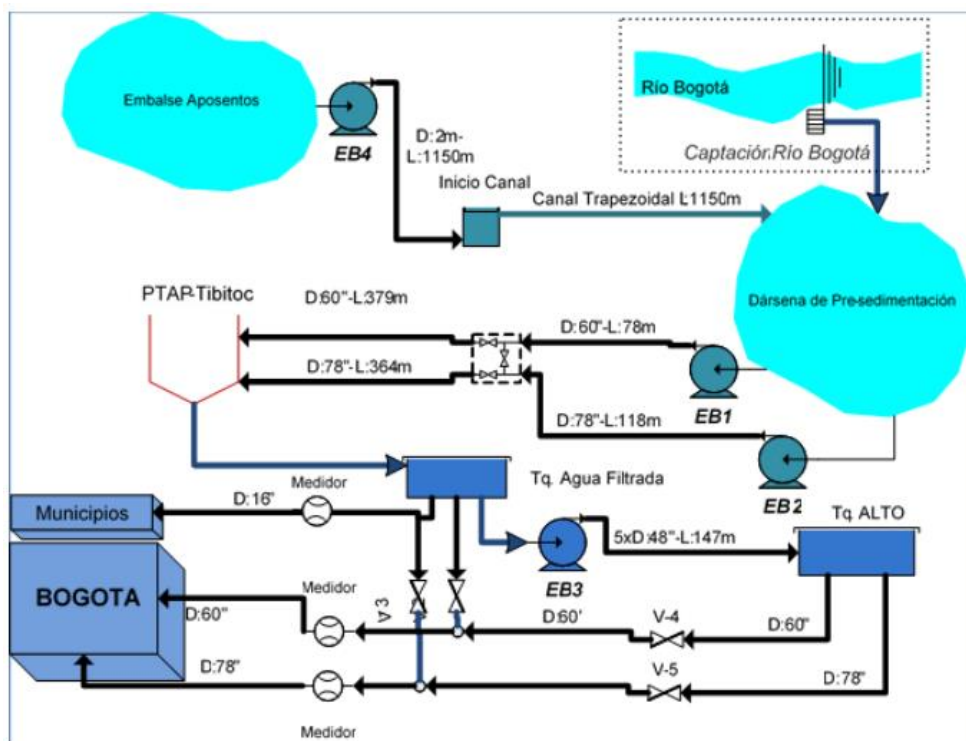
Tabla 5. Características microbiológicas del agua, según Resolución 2115 de 2007. Fuente: (MINAMBIENTE, 2007)

6.9 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TIBITOC

Desde el año 1997 opera la planta de tratamiento de agua potable Tibitóc, la cual tiene un contrato con la empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá, suministrando agua en la

zona norte y occidental de la ciudad de Bogotá por sectores como Engativá, Fontibón, Tintal Central y Suba; y a los municipios aledaños como Gachancipá, Sopó, Tocancipá, Chía, Cajicá, Funza, Mosquera, Madrid y Soacha. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015).

Esta planta realiza tratamientos de agua provenientes de los ríos Teusacá y Bogotá y los embalses Sisga, Neusa (reguladas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR) y Tominé (Empresa de Energía de Bogotá S.A. ESP). (Acueducto, Agua y Alcantarillado y Aseo de Bogotá, 2015). Además, el agua ingresa del río Bogotá por una zona conocida como El Espino, y la que se toma del río Teusacá, lo hace por el Embalse Aposentos (Esquema 2) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015).



Esquema 2. Funcionamiento de la PTAP Tibitóc. Fuente: (Acueducto, Agua y Alcantarillado y Aseo de Bogotá, 2015)

6.10 PROCESO DE POTABILIZACION EN LA PTAP TIBITOC

La PTAP Tibitóc, realiza un tratamiento convencional a partir de procesos de coagulación, floculación, filtración sedimentación y desinfección, con capacidad de tratamiento de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua.

El proceso comienza con la captación del agua proveniente de los ríos Bogotá y Teusacá, se almacena en una dársena para realizar la pre sedimentación. Para el bombeo del agua, la planta utiliza el agua que ingresada del rio Bogotá dos estaciones de bombeo; además cuenta con 3 subestaciones eléctricas en caso de que llegue a faltar energía.

Al realizar el bombeo de agua, se miden los parámetros fisicoquímicos, específicamente la alcalinidad, turbidez y pH, el agua prosigue a un canal de abducción, por donde se realiza el proceso de coagulación, aplicándose coagulantes como cloruro férrico, PAC (Policloruro de Aluminio) o sulfato líquido, con lo que se prosigue a la floculación y luego pasando a los sedimentadores para remover la turbidez.

En el cuarto de floculación se monitorea la calidad del agua obtenida en estos procesos. Enseguida de la sedimentación el agua entra a unos canales de agua clarificada y a los filtros. Para finalizar el proceso con la desinfección a partir de cloro y su posterior transporte a las zonas de abastecimiento. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015)

7. METODOLOGÍA

7.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información para la elaboración de esta monografía se obtuvo a través de recursos electrónicos en el periodo de tiempo comprendido entre años 2000 a la actualidad de la biblioteca virtual de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, consultando diversas bases de datos como lo son Web of Science, Science Direct, Scopus y Springer Link, etc.; en la cual se recolectan trabajos de tesis, artículos científicos, secciones de libros, e investigaciones relacionadas con los procesos de coagulación y floculación del agua, además de documentos encontrados por plataformas virtuales.

7.2 DISEÑO, ESTRUCTURACION Y ESCRITURA DE LA MONOGRAFIA

Los artículos encontrados se organizaron de acuerdo al tema principal que abarca esta monografía, recopilando información sobre agentes coagulantes y floculantes utilizados en diferentes estudios para la optimización de los procesos de coagulación-floculación en las plantas de tratamiento de agua potable. En primer lugar la información se fundamenta, dando a conocer los parámetros físicos y químicos que deben evaluarse en el agua para que se encuentre en óptimas condiciones y sea apta para consumo humano; luego se evidencia los tipos de tratamientos que se realizan en las plantas de tratamiento de agua potable en Bogotá, enfocando esta revisión en los procesos de coagulación y floculación, a partir de una explicación del fundamento químico y mecánico de estos procesos, para finalmente evaluar las condiciones y los agentes coagulantes que se utilizan en estos procesos y que han mostrado eficiencia en la limpieza y desinfección del agua.

8. RESULTADOS

8.1 COAGULANTES Y FLOCULANTES QUIMICOS

8.1.1 Cloruro Férrico

Las Sales de Hierro 3+ (Sales Férricas) han sido siempre conocidas como coagulantes. Éstas no han sido tan populares como los químicos a base de Aluminio por el hecho que el color del hidróxido de Hierro es oscuro. El proceso generalmente se ve más sucio y los problemas en el proceso son más visibles que cuando se usa Aluminio o un PAC. Sin embargo, el Hierro (III) es un coagulante muy eficiente con dos rangos de trabajo de pH. El rango más bajo empieza en aproximadamente 3.5 y termina en pH 7.0 para un agua con alcalinidad alta. El rango más alto es de 8.0 hasta por lo menos 9.5. Es posible obtener un rango de pH para la coagulación dependiendo de las necesidades de purificación. En un PH bajo la remoción de las sustancias orgánicas y del color es buena, así como la remoción de bacterias y plancton. Para la remoción de Hierro y Manganese se requiere el rango alto de pH. También se pueden usar las Sales de Hierro 2+ (Sales Ferrosas) como coagulantes, aunque generalmente tienen menor eficiencia que las Sales Férricas

8.1.2 Sulfato de Aluminio hidratado

Las sales de aluminio inducen iones positivamente cargados a la muestra de agua, produciendo reducciones en la repulsión electrostática existente entre los coloides a partir de su desestabilización aniónica; lo que permite que las fuerzas de atracción puedan superar las de repulsión, para que finalmente ocurra el proceso de floculación rompiendo la dispersión. (Gilpavas E.; 2018).

Una investigación realizada en aguas de industria textil en la ciudad de Medellín, evalúa el proceso de remoción de turbidez y DQO a partir de un proceso de coagulación, oxidación y foto-Fenton (UV/H₂O₂/Fe²⁺) el cual utiliza radiación de ondas de ultrasonido (US) de baja frecuencia. (E., P., & J., 2018). Se determinó mediante el test de jarras que una dosificación de

800mg/L de $(Al_2[SO_4]_3)$ en el proceso de coagulación puede lograr una remoción del 99% de turbidez y un 53% de DQO.

Estudios realizados en la universidad Santo Tomas, realizado por Claudia Barajas y Andrea León (2015) determina la dosis óptima de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) en el proceso de coagulación - floculación para el tratamiento de agua potable.

En primera instancia se definen los parámetros fisicoquímicos como el pH que mide el nivel de acidez o basicidad del agua; la alcalinidad, como la capacidad de reaccionar con los iones hidrógenos del agua, provocada mayoritariamente por los iones carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) e hidróxidos; otro parámetro importante como la turbidez, la cual mide la pérdida de transparencia del agua debido a partículas en suspensión, conductividad como medida indirecta de la presencia de sólidos disueltos, color, como indicativo de presencia de humus, metales iónicos, y materia orgánica; y por último la temperatura siendo este un parámetro que mide la rapidez de reacción ya que mientras más fría se encuentre el agua más lenta será la reacción y formación de floc.

Realiza un análisis a través de test de jarras y analiza estos datos a través de Redes Neuronales Artificiales (RNA), que son programas computacionales que predicen un comportamiento o una característica de acuerdo a diferentes comportamientos a través de modelos matemáticos; partiendo de esta metodología se encontró que los valores de pH con los que se obtuvieron los mejores resultados varían en un rango entre 7-8, rango dentro del cual se encontró la mayor cantidad de valores de bajos en turbidez, indicando que el pH influye con la efectividad del proceso de coagulación y floculación, puesto que contribuye a que se obtenga una turbidez final más baja si se lleva a cabo su ajuste en el agua a tratar dentro del rango mencionado, el cual en comparación con el rango óptimo de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, es un poco más específico, ya que este varía entre 5.5 y 8. (Barajas & León, 2015).

Un estudio realizado en la ciudad de Londres por Su Zhaoyang et al., (2017) indica que la presencia de biopolímeros en fuentes de agua influye en la formación del floc durante los procesos de coagulación-floculación, esta investigación realizada en dos fuentes hídricas de la ciudad anteriormente nombrada, realizó procesos de filtración para la disminución de tamaño de partículas y posteriormente un proceso de coagulación, utilizando como agente coagulante sulfato de aluminio hidratado ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$) el cual fue evaluado con una dosis óptima de 0,1 mM. Facilitando la formación de precipitado de $Al(OH)_3$. (Su Zhaoyang, 2017)

8.1.3 PAC (coagulantes alternativos)

En los últimos años se ha desarrollado una serie de coagulantes inorgánicos pre polimerizados tales como el PAC (Policloruro de aluminio), los cuales se comportan diferente a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación, coagulación de aguas potables debido a sus características (Romero C, 2007). Los PAC son producidos adicionando un base de cloruro de aluminio hasta lograr una fórmula empírica $Al(OH)_\eta Cl_{3-\eta}$ donde η toma valores que van de 1 a 2,5. Los diferentes PAC se tipifican por su contenido de aluminio (porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (porcentaje de SO_4) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad), refiriéndose al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PAC llamado índice de grado de polimerización. Los PAC's tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas respecto a los coagulantes convencionales; los flóculos tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25mm. Las ventajas de un coagulante de Policloruro de Aluminio (PAC) son muchas. El pH óptimo de la coagulación puede ser más alto que cuando se usa derivados de Aluminio directamente. El pH de la coagulación puede ser el mismo de la distribución en aguas con alcalinidad alta. Mu0063has veces es posible usar el PAC sin alcalinización en el proceso de

coagulación. La remoción de las sustancias orgánicas es mejor con el PAC en comparación con derivados de Aluminio. Algunos Problemas relacionados a la temperatura del agua y con un proceso demasiado lento en la formación de flóculos pueden ser resueltos con el PAC porque reacciona más rápido que el Aluminio. Varios grados de coagulantes de PAC han sido desarrollados durante las últimas décadas. Los productos pueden tener una basicidad diferente, pueden tener presentación líquida o sólida o parte del grupo de cloruros puede ser sustituido por sulfatos. Si se adiciona un floculante con el coagulante polimerizado generando una floculación muy rápida y en ciertas condiciones posible con una muy baja dosis de químicos (coagulante, alcalinizante y floculante), adicionalmente la producción mucho menor en la cantidad de lodos y menor dependencia de temperatura y pH (J, 1987)

criterio	Sulfato de Aluminio	PAC's
<i>Temperatura</i>	La temperatura afecta la hidrólisis y, por ende, la producción de complejos hidróxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación.	Menor efecto de la temperatura por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
<i>pH</i>	El rango de pH controla cuál especie de hidróxilo de aluminio se produce.	Se espera menor impacto del pH por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
<i>Especie de aluminio</i>	La mayoría de especies de aluminio son complejos hidróxilo monoméricos con una carga catiónica de +1 a +3.	Presencia de formas de aluminio monoméricas y poliméricas.
<i>Cinética</i>	Más lenta	Más rápida

Tabla 8: comparación de características entre sulfato de aluminio y policloruro de aluminio (PAC).

Se considera que un PAC es más eficiente que el sulfato de aluminio dada su mayor capacidad de remoción de sólidos suspendidos y por tanto, requiere menos dosis; dependiendo del tipo de agua, ya que se puede sustituir de 1.5 a 2.0 partes de sulfato. (cartwright, 2009)

8.2 COAGULANTES ORGANICOS

Los coagulantes orgánicos son polímeros solubles en agua que están basados en unidades repetidas de varios monómeros tales como acrilamida y ácido acrílico. En la mayoría de los casos, se derivan de materias primas basadas de petróleo y no renovables (Suopajarvi et al., 2013). Generalmente, los polímeros sintéticos se clasifican en catiónico, aniónico, anfótero y no iónico. La capacidad coagulante es principalmente influenciada por parámetros como la naturaleza de las cargas, seguida por el peso molecular y la densidad de carga (Bolto y Gregory, 2007). Los tipos de floculantes más efectivos son las poliacrilamidas ligeramente aniónicas con masas moleculares muy elevadas que se aplican en muy bajas concentraciones, lo que compensa su alto precio (Arboleda 2000). Actualmente se emplea una gran variedad de polímeros orgánicos sintéticos, sin embargo, la toxicidad de estos productos es un factor de importancia en tanto que en ocasiones los monómeros que los componen pueden ser tóxicos, como lo son los monómeros acrílicos.

Se consideran una fuente alternativa con un gran potencial, debido a que son biodegradables y no generan daños al medio ambiente en comparación con coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos (Renault et al., 2009, Yin, 2010, Antov et al., 2010, Fatombi et al., 2013). En su mayoría son de origen vegetal, con presencia de agentes coagulantes activos como carbohidratos, taninos y proteínas. Algunas especies vegetales que presentan estudios realizados son las semillas de una enorme variedad plantas como las semillas de maíz y Nirmali (Raghuwanshi et al., 2002), *Jatropha curcas* (Abidin et al., 2011), el frijol común (Antov et al., 2010), *Cassia obtusifolia* (Sanghi et al., 2002) entre otros. El material que ha recibido mayor grado de atención son las semillas de *Moringa oleífera* (Ndabigengesere et al., 1995, Okuda et al., 1999, NKurunziza et al., 2009, Antov et al., 2010 y Madrona et al., 2011) gracias a sus componentes activos, los cuales son proteínas catiónicas de diferentes pesos moleculares, además de poseer capacidad antimicrobiana (Gassenschmidt et al., 1995y Okuda et al., 2001)

8.3 COAGULANTES Y FLOCULANTES EN COLOMBIA

Algunos autores han sugerido el uso de agentes coagulantes naturales extraídos del mucilago y el polvo de los cladodios de *Opuntia Ficus Indica* (cactus) pertenece a la familia Cactaceae en el tratamiento de aguas superficiales. Esta especie es una de las más investigadas porque presenta óptimo rendimiento en el proceso de la coagulación. Para evaluar la eficacia del extracto de *Opuntia ficus indica*, se han trabajado con dosis de 40 mg/L del coagulante y se trataron muestras de agua provenientes de ríos con una turbidez inicial de 276 NTU. De acuerdo a los reportes, los componentes coagulantes presentan actividad de coagulación con porcentajes de remoción de turbidez hasta 93,25%. La efectividad de este coagulante da lugar a diversos beneficios, desde el punto de vista medioambiental, la producción de lodos residuales con Aluminio y de hierro se eliminarían, mayor biodegradabilidad, por lo tanto genera menor riesgo de toxicidad (Olivero et al., 2013). En otros estudios, han utilizado extractos acuosos de las semillas de *Moringa oleífera* como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales. Mediante dosis de 300 mg/L del coagulante y concentraciones de turbidez con 230 NTU, la actividad de coagulación de turbidez es de 84,34%, estos valores ofrecen una posibilidad viable y eficiente para las fuentes hídricas contaminadas en nuestro país (Melo y Turriago, 2012).

8.4 ELECTROCOAGULACION

La electrocoagulación a diferencia de la coagulación, adiciona fuentes eléctricas y celdas electrolíticas con metales de alta valencia como agentes coagulantes. Este mecanismo se fundamenta en la adición de iones metálicos a través de una celda electrolítica donde ocurre la remoción de partículas finamente dispersas (materia orgánica, metales pesados entre otras sustancias) en el residuo líquido. Posteriormente se lleva a cabo la electrofloculación y electro precipitación, formándose el floc con las partículas ya desestabilizadas que finalmente sedimentan. (Avila, D. 2003).

8.4.1. ESTUDIOS SOBRE ELECTROCOAGULACION EN COLOMBIA

Para el proceso de electrocoagulación, se realizó un estudio en la Universidad de los Llanos utilizó una celda electrolítica con electrodos de aluminio dicha elección debido a que no se oxidan con facilidad, este dispositivo fue alimentado de una fuente directa de 12 V. Javier Vargas en la Universidad de los Llano (2018) estudia la purificación de agua a partir de tres etapas, las cuales utilizaron procesos de electrocoagulación, ozonización (1,6mg/L de O₃) y posterior implementación de radiación UV , utilizando una cantidad de agua de 30 L tratados durante un lapso de tiempo de 60 minutos, los resultados evidenciados en la purificación de agua se mostraron eficientes alcanzando un nivel de turbidez final de 1 NTU y con la utilización de radiación UV el pH pasó de 8.9 a 7.3. (Vargas J. , 2018).

Deisy Avila (2003), estudia la remoción de lixiviados en el Relleno sanitario La Esmeralda en la Universidad Nacional , sede Medellín, a través de electrocoagulación por medio de sistema Bach (voltaje, tiempo de operación y tipo de electrodo), aquí se encontró como las mejores condiciones para la purificación de lixiviados , la implementación de corriente con un voltaje de 3.0 V por un tiempo determinado de 15 minutos utilizando electrodos de aluminio (Avila, 2003), además se utilizaron electrodos de cobre los cuales no fueron eficientes en el tratamiento. Por otro lado, Juan Nicolás Ríos, de la misma universidad, en el año 2005 realiza un estudio más específico para la remoción de amonio y metales pesados en este Relleno sanitario, encontrando los mismo resultados anteriores, a diferencia de la implementación de mayor cantidad de electrodos en el reactor para obtener un tiempo más reducido, además la eficiencia en la eliminación de compuestos altamente solubles y difícilmente de remover depende de elección de los electrodos y de la formación de reacciones de precipitación. (Ríos, 2005)

Estudiantes de la universidad militar nueva granada, realizaron análisis sobre un Sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales galvánicas (2010) las cuales sirven para ser reutilizadas. Se realizaron análisis a muestras de agua residual con alto contenido de metales pesados medidos en Cu, Cr, Cr⁺⁶, Ni, Pb y Zn), análisis llevados a cabo por un proceso de electrocoagulación obteniéndose una reducción final de Cr del 51.65%, Ni del 18.09%, Pb del 50%, y Zn del 47.37% además en parámetros de pH 3.18, conductividad 21.83 mS/m y temperatura: 48.5 °C, destacándose efectiva la reducción de Cr según los estándares normativos de vertimientos por otro lado, se encontró que los valores de los parámetros y variables no se encuentran dentro de los rangos generalmente evidenciados por la literatura en sistemas de electrocoagulación con aguas residuales, se concluye que hubo una reducción importante en metales pesados. (Morales, G., et.al, 2010).

8.4.2. OTROS ESTUDIOS SOBRE ELECTROCOGULACION

Se estudia el comportamiento de la electrocoagulación y la coagulación en Ciudad Unida (España) en efluentes con contaminantes de tipo coloidal, (caolinita - $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, mineral de arcilla), modelo de contaminantes de materia orgánica soluble (Negro de Etiocromo T - NET) y emulsiones O/W o emulsión de aceite en agua. Se realiza una comparación entre el proceso de electrocoagulación y coagulación convencional, ya que, aunque los dos realizan una disminución de la turbidez, son relevantes dos variables en cada proceso de operación: el pH y la concentración de aluminio, en este caso es relevante la dosis y no el sistema o la adición de una disolución de sal de aluminio o disolución electroquímica de superficie de aluminio, aunque no difieren significativamente en la dosificación del agente coagulante (Martínez F., 2008).

Una diferencia evidente encontrada en este trabajo, es el cambio de pH en cada sistema; en el proceso de electrocoagulación se forma como producto final hidróxido de aluminio, por ende surge una alcalinización del agua debido a altas dosis de aluminio, por el contrario al sistema convencional el cual agrega sales de aluminio, que por hidrolisis tienden a acidificar el agua; por ende, uno de los parámetros para la elección del sistema se verá influenciado por el pH inicial del agua contaminada y el movimiento del fluido.

Definiendo los costos operacionales para el sistema ambos sistemas de dosificación, se encuentra que los costos de tratamiento de aguas a partir de proceso electroquímico y químico (policloruro de aluminio y sulfato de aluminio como coagulantes), son del mismo orden de magnitud. Al adicionar un poco dosis de coagulante la electrocoagulación con PAC presenta menores costos de operación que el tratamiento convencional, por el contrario, si necesitamos dosis altas de coagulante será más económico el proceso convencional, aunque se prevé que una mejor aireación podría disminuir estos costos en el proceso. (Martínez, F., 2008).

En la región de Culiacán Sinaloa, (México) se realizó un trabajo de remoción de turbidez en tres fuentes de agua (rio Tamazula, un estanque, y agua residual de la Planta Dgremont), a partir de un proceso electroquímico con la utilización de un reactor de placas paralelas y uno con flujo continuo, en la que se utiliza como cátodo una malla de hierro y como ánodo la placa de aluminio. Se concluyó, una óptima remoción de turbidez en el agua, mayormente en el rio Tamazula, aplicando una corriente de 0,2 A y diferentes concentraciones de electrolito, cumpliendo los valores aceptados por la normatividad del presente país (Valor máx. permitido 5 NTU). (Pérez, S., et.al.; 2011).

Por otro lado, se realizaron estudios a escala de laboratorio en Buenos Aires, de electrocoagulación con diversas distribuciones cátodo - ánodo utilizando electrodos de hierro,

aluminio y acero inoxidable que generaron como coagulantes hidróxido de aluminio e hidróxido y se implementaron celdas electrolíticas con capacidad de 1 L. (Perozo, J. et. al. 2017). Los resultados se analizaron a través de un software estadístico Insfostat/Profesional, y determinaron que la remoción de turbidez y color del agua utilizando como ánodo aluminio fue de un 40% a un 80% y utilizando hierro de 10% a 50%, (Perozo, 2017) lo que nos indica la importancia de la elección del metal o metales en las celdas electrolíticas en las condiciones adecuadas para una remoción eficiente.

Se estudia también el tratamiento de agua en el lago Ipê (Sao Paulo, Brasil), para su potabilización y eliminación de color, para este análisis se agregaron sustancias húmicas para evaluar distintos niveles de color (1 g/L de NaCl y de TiO₂). Se tomaron muestras de agua del reactor cada 10 minutos por una hora. Para agua con color aparente inicial de 25 Unidad Hounsfield (uH) por un tiempo de 30 min. De reacción, se redujo su valor hasta 15 uH, (valor máximo permitido para el agua potable en la normatividad de Brasil) para agua con 66 uH de color aparente, con adición de sal, se redujo hasta 13 uH en el término de una hora (Moreida & Pereira, 2016). Se concluye en este trabajo, que utilizar sales como tratamiento de agua potable es efectivo, además de alcanzar los valores de color aparente permitidos según la legislación vigente.

Finalmente, se expone un estudio realizado en Nicaragua (2019), que realiza una comparación entre el proceso de electrocoagulación y coagulación química a muestras de agua sintética y real (natural y residual textil) para la eliminación de contaminantes en el agua variando parámetros como el tiempo de tratamiento (min) la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y la intensidad eléctrica (A), En agua natural las condiciones adecuadas fueron de 0,1 A de intensidad de corriente, 15 min. de tratamiento y 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica, y en

agua residual textil una intensidad de corriente de 1 A, 5 min de tratamiento y 5 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica. (Pavón & Chevez, 2019). Con estas condiciones en el proceso de electrocoagulación, el porcentaje de remoción fue mayor al 90% e indica ser este el proceso adecuado para el eliminar contaminantes a escala de laboratorio comparado con el método convencional. Además de esto se evidencian algunas ventajas de la electrocoagulación en comparación con la coagulación convencional, encontrando que este método utiliza una dosificación menor de coagulante generando menores lodos con aluminio, la estabilización del pH luego del tratamiento sin ser necesaria la utilización de alcalinizantes o agentes químicos que lo estabilicen, y tiempos de tratamiento más cortos evidentes en aguas residuales y que en una planta industrial puede reducir los costos de inversión inicial para la infraestructura.

En la comparación de electrodos en el proceso de electrocoagulación, se hicieron análisis de aguas en Veracruz con diferentes configuraciones de electrodos (Al-Al, Al-Fe, Fe-Fe) (Maldonado, Landa, & Castillo, 2018) en condiciones variadas, encontrándose que los electrodos Al-Fe presenta mayor porcentaje de remoción, aunque no es un valor tan diferenciado; por otro lado, la distribución Al – Al se considera una elección efectiva puesto que no se requiere un mantenimiento constante ya que la oxidación de este metal es muy lenta comparado con los otros metales, además los electrodos de Fe tienen mayor precio.

9. ANALISIS DE RESULTADOS

En la investigación hasta la fecha, sobre el uso de coagulantes y floculantes de origen inorgánico e orgánico para el tratamiento de aguas residuales y superficiales, se han sugerido el uso de diversas especies vegetales y químicas que por su eficaz actividad coagulante facilita los procesos de descontaminación de recursos hídricos, aunque esto acarrea la contaminación del mismo en la utilización no apropiada del mismo. Generalmente, se resume que los resultados de la actividad de coagulación y floculación de los compuestos en cuestión poseen una definida dosificación la cual es usada en diferentes estudios para la eliminación de turbidez, color y sólidos suspendidos. En los estudios en la clarificación del agua, uno de los parámetros más estudiados es la reducción de la turbidez. Diferentes trabajos experimentales sobre coagulantes y floculantes de origen natural, han informado a los extractos acuosos de semillas de Moringa oleífera como uno de los más investigados por su eficacia en el tratamiento de aguas y aguas residuales. Los reportes encontrados en las bases de datos, presentan eficiencias de alto rendimiento hasta más del 98% en la eliminación de diversos contaminantes, generalmente turbidez, sólidos suspendidos y metales pesados presentes en muestras de aguas crudas y residuales, por lo cual es una especie viable para utilizar a escala industrial.

La evaluación entre la calidad del agua y los productos químicos usados en la potabilización de las plantas de tratamiento de aguas, comprueba que existe varias correlaciones significativas entre las cantidades (dosificación), con los parámetros indicadores; por ejemplo, se observa que la turbiedad es inversamente proporcional al sulfato de aluminio, ya que es utilizado como coagulante, indicando que a medida que la turbiedad del agua de entrada es alta indica que es necesario invertir una alta concentración de los reactivos para el cumplimiento de los parámetros de calidad de agua potable.

La prueba de jarras es una etapa importante en el proceso de tratamiento de aguas y requiere de especial seguimiento, ya que es una prueba de corta duración y permite mediante

observación identificar el comportamiento de los coagulantes empleados, lo que complementa los resultados de los parámetros de calidad, su desarrollo correcto y cálculos adecuados permite establecer la dosis óptima.

10. CONCLUSIONES

1. Los procesos de potabilización de agua cruda son fundamentales ya que su correcta implementación depende en gran medida de la cantidad de impurezas removidas presentes en la muestra.
2. En la selección bibliográfica analizada se encontró que existen gran variedad de coagulantes convencionales y/o modificados que se han venido utilizando en sistemas tradicionales en la desestabilización de partículas (floc), sin embargo con el creciente número de contaminantes arrojados a los sistemas hídricos se ha dado mayores exigencias en cuanto especificaciones en la remoción de diversas partículas (sólidos suspendidos, metales pesados, microorganismos, etc.) que afectan significativamente la calidad del agua de ahí la importancia de optimizar estos procesos y considerar nuevas alternativas para mejorar el índice de potabilidad del agua cruda.
3. La elección de coagulantes se puede considerar como un proceso de toma de decisión a partir de una serie de criterios para dar una óptima condición de operación en las plantas de tratamiento de aguas potables ya que es un hecho de que la dosificación correcta garantiza un resultado que cumple con los estándares vigentes para nuestro país.
4. En el estudio se evaluaron las variables como (agente coagulante, floculante y pH), a través de una recopilación de información en un período de tiempo el cual permitió identificar una marcada tendencia a la implementación de nuevos procesos de tratamiento de aguas pensados en el acoplamiento de compuestos orgánicos derivados de fuentes naturales ya que los convencionales son poco amigables con el medio ambiente.

11. RECOMENDACIONES

Diversidad de agentes coagulantes y floculantes se han utilizado para el tratamiento de muestras de aguas residuales y potables, los cuales han sido desarrollados eficientemente para remover sólidos suspendidos, ajustar pH, disminuir turbidez y mantener los DQO y DBO con porcentajes de eliminación por encima del 90%. Sin embargo, a pesar de la actividad coagulante que presentan estas fuentes no se ha evaluado a fondo su impacto ambiental e industrial, adicionalmente de investigar a fondo en Fuentes naturales (derivados de plantas); por lo tanto, para investigaciones posteriores se recomienda trabajar en estos procesos para la reducción de contaminantes tóxicos y nuevas tecnologías para tratamiento de aguas provenientes de actividad industrial.

12. BIBLIOGRAFIA

- Acueducto agua y alcantarillado Bogota. (2015). *Sistema Tibitoc*.
https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/captacion/sistema-tibitoc/!ut/p/z0/fY8xDsIwDEWvkqVzQoUqGKELYgAKQoIslZsGZEiTkjgIbo_FwMj433-2ZanlSWoPT7wCYfDgOJ911VZNRsYzVW7UtKx
- Aldana, M. J. (2017). Integral Network Management: A Case Study of Bogotá and the Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB ESP. *Procedia Engineering*, 186, 654–665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.282>
- Aldana, M. J., & López, F. S. (2017). Water Distribution System of Bogotá City and Its Surrounding Area, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAB E.S.P. *Procedia Engineering*, 186, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.281>
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. *Sedapal*, 1–44.
http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Asesora, J. N. D. C. (2014). “COAGULANTES-FLOCULANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS ELABORADOS DE PLANTAS Y DEL RECICLAJE DE LA CHATARRA, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS.” *Lincoln Arsyad*, 3(2), 1–46.
<http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>
- Barraque . Ch ., y otros. (1979). *Manual técnico del agua . Barraque . Ch ., y otros.*
- Bravo, M. A. (2017). Coagulantes Y Floculantes Naturales Usados En La Reducción De Turbidez, Sólidos Suspendidos, Colorantes Y Metales Pesados En Aguas Residuales. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5609/1/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf>
- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A., & Ramos-Pacheco, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298–309. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2018.2>
- Fernández-Crehuet, E. G. (1999). *Calidad del agua para consumo público.: Universidad de Granada.*
- Flórez, J. M. C. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio. *DYNA (Colombia)*, 78(165), 18–27.
- Hernán Alonso, R. O. (2009). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.*
- Jhon Sebastián, Alvarado Bohórquez ; Mónica Alejandra, R. S. (2018). Análisis multitemporal mediante modelos ARIMA de la calidad del agua en la Potabilizadora Potabilizadora “Francisco Wiesner” y el Embalse “San Rafael” (Bogotá D.C., Colombia). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 10(2), 1–15.
- Lozano-Rivas, W. A. (n.d.). *APÉNDICE-9 PLANTAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES. III*, 35. <https://www.researchgate.net/publication/298354134>
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Garcia, M. C., Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Del, M., & Garcia, C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72–82.
- Martinez Navarro, F. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales Mediante Electrocoagulación y Coagulación Convencional.*
<https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251> Tratamiento de aguas

residuales industriales.pdf?sequence=1

- Romero, C., Solórzano, R., Abreu, O., Brizuela, L., & Pérez, Z. (2007). Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua Synthesis of an aluminum inorganic polymer and its use for water clarification. *Revista de Ingeniería UC*, 14(3), 16–23.
- Sillanpää, M., Ncibi, M. C., Matilainen, A., & Vepsäläinen, M. (2018). Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere*, 190, 54–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>
- Vargas, J. (2018). Desarrollo de un sistema electrónico que aporta a la potabilización de agua mediante electrofloculación , ozonificación y radiación ultravioleta. *Espacios*, 39(39), 1. https://www.researchgate.net/publication/327988131_Desarrollo_de_un_sistema_electronico_que_aporta_a_la_potabilizacion_de_agua_mediante_electrofloculacion_ozonificacion_y_radiacion_ultravioleta