

**Evaluación de la Remoción de la Turbidez del Agua del Rio Fucha por Medio  
del Fruto de la Planta Arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como Coagulante  
Natural.**

**Autor:**

**Leidy Mayerlin Cuadros Pulido**

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial Para Optar por el  
Título de Ingeniera Ambiental**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD**

**Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Ingeniería Ambiental**

**Bogotá D.C.**

**2020**

**Evaluación de la Remoción de la Turbidez del Agua del Rio Fucha por Medio del Fruto de la Planta Arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como Coagulante Natural.**

**Autor:**

**Leidy Mayerlin Cuadros Pulido**

**Directora:**

**Sonia Ruiz Balaguera**

**Msc. Ingeniera Química**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD**

**Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Ingeniería Ambiental**

**Bogotá D.C.**

**2020**

NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bogotá, 2020.

## Dedicatoria

### **A mi Madre**

Rosario por apoyarme de manera incondicional y brindarme tanto amor en cada uno de mis proyectos.

### **A mis Hermanos**

Por siempre estar para mí en los momentos más difíciles en la vida y por brindarme tanto cariño.

## **Agradecimientos**

*A mi familia por apoyarme en cada uno de los proyectos que inicio en mi vida, por su cariño, confianza y por tanto amor.*

*A la ingeniera Sonia Ruiz por su acompañamiento durante la investigación.*

*Al ingeniero Carlos Carranza y Bernardo Castro por brindarme los espacios y el tiempo para la realización de las prácticas de laboratorio.*

*Al Doctor Jordano Salamanca por estar pendiente de mi proceso durante la investigación y por animarme siempre.*

*Al ingeniero Daniel Andrés Rodríguez por apoyarme desde el inicio de la investigación*

*A todas las personas que se involucraron de alguna manera en el proyecto de investigación y que siempre me desearon éxito.*



## Tabla de contenido

Resumen .....	13
Abstract.....	15
Introducción.....	17
Objetivos.....	19
Objetivo general .....	19
Objetivos específicos .....	19
Marco teorico.....	20
Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) .....	20
Antecedentes .....	21
El Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) y su importancia en Colombia.....	25
Coagulación .....	26
Fases de la Coagulación .....	28
Factores que Influyen en la Coagulación .....	29
Influencia del pH.....	30
Influencia de las Sales Disueltas .....	31
Influencia de la Temperatura del Agua .....	32
Influencia de la Turbiedad .....	32
Influencia de la Dosis del Coagulante.....	32

Influencia de Mezcla.....	33
Mezcla Rápida.....	33
Mezcla Lenta.....	33
Tipos de Mezcladores.....	34
Ventajas y Desventajas de los Mezcladores Hidráulicos y Mecánicos.....	34
Coagulantes utilizados en los procesos de clarificación de agua.....	35
Sistema de Aplicación del Coagulante.....	35
Mecanismo de la Coagulación.....	36
Adsorción y Puente.....	37
Atrapamiento de Partículas dentro de un Precipitado.....	38
Floculación.....	39
Definición.....	39
Objetivo de la Floculación.....	40
Tipos de Floculación.....	40
Floculación Ortocinética.....	41
Parámetros de la Floculación.....	41
Ensayos de Pruebas de Jarra.....	41
Objetivo.....	41
Materiales y Equipos Necesarios.....	42
Metodología.....	43
Diseño experimental al azar para determinación del intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales en la cuenca media del Rio Fucha.....	46

Diseño experimental Factorial para análisis del comportamiento de los coagulantes Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ , Cloruro Férrico $FeCl_3$ y el Fruto (en polvo) de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) .....	47
Recolección de la muestra de agua residual.....	48
Manejo de pH en muestra de agua residual .....	49
Temperatura de la muestra de agua.....	50
Proceso dosificación de coagulantes y Test de Jarras .....	50
Sitio de estudio.....	52
Equipos utilizados en el laboratorio .....	52
Modelo Estadístico .....	55
Análisis y Discusión .....	56
Conclusiones.....	65
Recomendaciones .....	67
Referencias Bibliográficas.....	68



## Listado de figuras

<b>Figura 1.</b> Planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ).....	21
<b>Figura 2.</b> Adición de un coagulante que neutraliza las cargas produciendo un colapso de la nube de iones que rodean los coloides de modo que pueden aglomerarse.....	28
<b>Figura 3.</b> Fases de la Coagulación.....	29
<b>Figura 4.</b> Condiciones de mezcla: se observa que la mejor mezcla es cuando el coagulante adicionado cae en su totalidad a la masa de agua.....	36
<b>Figura 5.</b> Efecto de puente de las partículas en suspensión.....	38
<b>Figura 6.</b> Atrapamiento de las partículas en un floc.....	39
<b>Figura 7.</b> Proceso de floculación: se presenta la agitación de la masa coagulada permitiendo el crecimiento y aglomeración de floc.....	40
<b>Figura 8.</b> Fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ).....	43
<b>Figura 9.</b> Pequeñas tiras extraídas del fruto del Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ).....	44

<b>Figura 10.</b> Bandejas con las tiras extraídas del fruto del Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) antes del secado a 60° C durante 48 horas.....	44
<b>Figura 11.</b> Pequeñas tiras del fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) después de secado en horno a 60° durante 48 horas.....	45
<b>Figura 12.</b> Polvo fino extraído del fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ).....	46
<b>Figura 13.</b> Rio Fucha, Cuenca Media, a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sede Jose Celestino Mutis, Bogotá D.C.....	49
<b>Figura 14.</b> Equipos utilizados en laboratorio para tomar parámetros de Conductividad, pH, Temperatura y Turbiedad.....	52
<b>Figura 15.</b> Equipo Floculador, se utilizó para realizar la prueba Test de Jarras.....	53
<b>Figura 16.</b> Determinación del intervalo de hora con mayor concentración de solidos suspendidos totales en la cuenca media del Rio Fucha.....	53
<b>Figura 17.</b> Determinación del intervalo de hora con mayor concentración de solidos suspendidos totales en la cuenca media del Rio Fucha.....	56
<b>Figura 18.</b> Porcentaje de remoción de los coagulantes: fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ), Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.....	58

<b>Figura 19.</b> Porcentaje de remoción del coagulante 1 (COA1) fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ).....	59
<b>Figura 20.</b> Porcentaje de remoción coagulante 2 (COA2) Sulfato de Aluminio.....	60
<b>Figura 21.</b> Porcentaje de remoción coagulante 3 (COA3) Cloruro Férrico.....	61

## Listado de tablas

<b>Tabla 1</b> Diseño experimental al azar para determinación del intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales en la cuenca media del Rio Fucha.....	47
<b>Tabla 2</b> Diseño experimental factorial para análisis del comportamiento de los coagulantes.....	48
<b>Tabla 3</b> Anova, diferencias significativas entre los tres coagulantes: fruto de la planta arbustiva Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ), Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.....	57
<b>Tabla 4</b> Anova two-way, influencia de la velocidad y la dosis por cada coagulante.....	58
<b>Tabla 5</b> Condiciones iniciales y finales de las variables analizadas en el laboratorio.....	62

## Resumen

El Cactus (*Opuntia ficus indica*) es poco utilizado en Colombia como coagulante natural debido a la eficiencia de químicos como el Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  y Cloruro Férrico  $FeCl_3$ , estos coagulantes tienen gran poder de coagulación pero poseen diferentes deficiencias como presencia de iones de aluminio, hierro y cloro en el agua, dificultades para mantener estable el pH óptimo de coagulación e incidencia en la aparición de enfermedades neurodegenerativas. Evidenciando los daños que generan los coagulantes de síntesis química se evaluó el fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como alternativa para el tratamiento de la turbidez del agua, teniendo en cuenta que es una planta natural y de bajo costo. Por tal motivo en el presente proyecto se planteó como objetivo general Evaluar la actividad coagulante del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) en el tratamiento de la turbidez en la cuenca media del Río Fucha. Como objetivos específicos se plantearon: 1) Determinar experimentalmente en intervalo de hora de mayor concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en la cuenca media del Río Fucha 2) Comparar la actividad coagulante del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como coagulante natural respecto a coagulantes comerciales como Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  y Cloruro Férrico  $FeCl_3$  y 3) Identificar las variables más adecuadas para la remoción de la turbidez empleando coagulantes comerciales como Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , Cloruro Férrico  $FeCl_3$  y un coagulante natural, el fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) en la cuenca media del Río Fucha. El sector elegido para estudio y muestreo es el Río Fucha en la Cuenca media a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Sede José Celestino Mutis en la ciudad de Bogotá, el

rio presenta contaminación por descargas industriales y domésticas. A cada una de las muestras de agua residual se les tomo la turbidez inicial y turbidez final mediante la utilización de un turbidímetro, con el fin de estudiar el comportamiento de los sólidos suspendidos en cada muestra y determinar la eficacia de los coagulantes, este proceso es apoyado mediante test de jarras, para cada polímero se trabajó con un pH de remoción óptima en un rango de 6.0 a 8.0, utilizando temperatura ambiente, se emplearon beaker con 800 ml de agua residual agregando  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$  y el fruto (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) en concentraciones de 0.0627 g/ml, 0.0771 g/ml y 0.0910 g/ml, extraídos de una muestra madre con una concentración de 0.9 g/ml, en donde se agregaron 90 gramos de cada coagulante en presentación sólida en 1000 ml de agua destilada, posteriormente se dejó agitar durante 20 minutos en una plancha con agitación magnética y finalmente se realizó 6 réplicas por tratamiento.

**Palabras claves:** Agua, Coagulación, Floculación, Test de jarras, Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico.

## Abstract

Cactus (*Opuntia ficus indica*) is little used in Colombia as a natural coagulant due to the efficiency of chemicals such as Aluminum Sulfate  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and Ferric Chloride  $\text{FeCl}_3$ , these coagulants have great coagulating power but have different deficiencies such as the presence of aluminum, iron and chlorine ions in water, difficulties in keeping the optimal coagulation pH stable and incidence in the appearance of neurodegenerative diseases. Evidence of the damage generated by chemical synthesis coagulants, the fruit of the Cactus shrub (*Opuntia ficus indica*) was evaluated as an alternative for the treatment of water turbidity, taking into account that it is a natural and low-cost plant. For this reason, in this project, the general objective was to evaluate the coagulant activity of the fruit of the Cactus shrub (*Opuntia ficus indica*) in the treatment of turbidity in the middle basin of the Rio Fucha. As specific objectives were raised: 1) Experimentally determine in the hour interval with the highest concentration of total suspended solids (TSS) in the middle basin of the Rio Fucha 2) Compare the coagulating activity of the fruit of the Cactus shrub (*Opuntia ficus indica*) as a natural coagulant compared to commercial coagulants such as Aluminum Sulfate  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and Ferric Chloride  $\text{FeCl}_3$  and 3) Identify the most suitable variables for the removal of turbidity using commercial coagulants such as Aluminum Sulfate  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , Ferric Chloride  $\text{FeCl}_3$  and a natural coagulant, the fruit of the Cactus shrub plant (*Opuntia ficus indica*) in the middle basin of the Rio Fucha. The sector chosen for study and sampling is the Rio Fucha in the middle basin at the height of the Universidad Nacional Abierta and at UNAD Distance, Headquarters José Celestino Mutis in the city of Bogotá, the river is contaminated by industrial and domestic discharges. The initial turbidity and final

turbidity were taken from each of the residual water samples by using a turbidimeter, in order to study the behavior of the suspended solids in each sample and determine the efficiency of the coagulants. This process is supported by jar test, for each polymer we worked with an optimal pH of removal in a range of 6.0 to 8.0, using room temperature, beaker with 800 ml of residual water were used, adding  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and  $\text{FeCl}_3$  and the fruit ( powder) from the shrub Cactus (*Opuntia ficus indica*) in concentrations of 0.0627 g / ml, 0.0771 g / ml and 0.0910 g / ml, extracted from a mother sample with a concentration of 0.9 g / ml, where 90 were added grams of each coagulant in solid form in 1000 ml of distilled water, then it was allowed to stir for 20 minutes on a plate with magnetic stirring and finally 6 replicates were made per treatment.

**Keywords:** Water, Coagulation, Flocculation, Jug test, Aluminum Sulfate.



## Introducción

La turbiedad mide la concentración de las partículas suspendidas en un líquido a partir de la dispersión de los sólidos suspendidos al paso de la luz, en función de número, tamaño y forma de las partículas. La norma de calidad de agua para consumo humano indica que la turbiedad debe estar en un rango de 0 a 2 NTU (**Resolución 2115, 2007**) y para tratamiento de aguas domesticas debe estar en un rango de 0 a 10 NTU (**Decreto 1594 De 1984**). Al descargar el agua residual sin el debido tratamiento de remoción de turbiedad se adquiere una temperatura más alta reduciendo el oxígeno en el agua por lo cual los organismos no pueden sobrevivir (**Contreras 2007**). Para remover la turbidez en las plantas de tratamiento de agua residual y potable se manejan químicos como Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  y Cloruro Férrico  $FeCl_3$  que al ser utilizados traen falencias como presencia de iones de aluminio, hierro y cloro en el agua (**Quintana, 2000**) dejando residuos en las estructuras, además de presentar dificultades para mantener estable el pH óptimo de coagulación durante la operación y su posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas (**Nordberg, 1990**). De igual manera (**Cogollo, 2011**) Afirma que el  $Al_2(SO_4)_3$  requiere regulación, ya que de no ser así los procesos de clarificación son deficientes y el Aluminio solubilizado causa alteraciones en la calidad del agua, este fenómeno se genera por la reestabilización de las partículas cargadas en el recurso hídrico. Asimismo según (**Farina et al, 2002**) se demostró que el  $Al_2(SO_4)_3$  reduce la hemoglobina y el hematocrito en Ratas causando Anemia en esta especie de animales. De igual forma estudios epidemiológicos afirman que al exponerse al  $Al_2(SO_4)_3$  se acrecienta la actividad inflamatoria del cerebro de los seres humanos provocando la enfermedad conocida como Alzheimer, adicionalmente

incrementa la posibilidad de envejecimiento cerebral que representaría la aparición de la enfermedad neurológica ligada con la edad avanzada (**Bondy, 2014**) un estudio muy parecido al de (**Gurdián y Coto, 2011**) quien asevera que el alumbre puede ser asimilado por el hombre con consecuencias negativas a largo plazo con efectos asociados a cáncer y enfermedades óseas. (**Parra et al., 2011**) afirma que una concentración de aluminio mayor a 0,1 mg/L en el agua de consumo humano puede ser un factor en la incidencia de la aparición de Alzheimer. (**Miller et al., 2008; Yin, 2010**) aseguran que el aluminio genera lodos que no pueden ser utilizados como biosólidos ya que impactan de manera negativa el suelo y el agua debido a su ecotoxicidad. Según (**Polizzi et al, 2003**) el  $Al_2(SO_4)_3$  produce un tipo de encefalopatía que genera la pérdida de control muscular, degeneración espinocerebrogenica y temblor. (**Mendoza, Fernández, & Ettiene, 2000**) reportan problemas con pacientes que sufren de enfermedades como insuficiencia renal crónica y con tratamiento de hemólisis. (**Singley, 1986**) afirma que los compuestos químicos utilizados en plantas de tratamiento para remoción de turbidez dejan residuos en los lodos convirtiéndose en un problema ambiental debido a que contienen residuos de químicos como  $Al_2(SO_4)_3$  y  $FeCl_3$ . Con la finalidad de garantizar abastecimiento de agua en cuanto a salubridad, accesibilidad y calidad para agua residual y potable se hace necesario la implementación de nuevas formas de tratamiento de la turbidez en el recurso hídrico (en este caso un coagulante natural, el fruto de la planta arbustiva *Cactus Opuntia ficus indica*), ya que aunque en el planeta existen grandes cantidades de agua solo el 0.02% se utiliza para consumo humano, por tal razón la purificación del recurso hídrico permite que sea utilizada nuevamente (**Day, 1996**).

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la actividad coagulante del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) en el tratamiento de la turbidez en la cuenca media del Rio Fucha.

### Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente el intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST) en la cuenca media del Rio Fucha.
- Comparar la actividad coagulante del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como coagulante natural respecto a coagulantes comerciales como Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  y Cloruro Férrico  $FeCl_3$ .
- Identificar las variables más adecuadas para la remoción de la turbidez empleando coagulantes comerciales como Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , Cloruro Férrico  $FeCl_3$  y un coagulante natural, el fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) en la cuenca media del Rio Fucha.

## Marco Teórico

### Cactus (*Opuntia ficus indica*)

El Cactus (*Opuntia ficus indica*) es de la familia Cactaceae, es oriunda de América del Sur, puede encontrarse también en Asia, Europa, Australia y África. Las principales características de la (*Opuntia ficus indica*), son las siguientes; arbustivas, con forma simple, tienen tronco leñoso con ramificaciones en forma de copa, con ramas y tallos entrelazados, (**Warner, 1972**). Están constituidos por proteínas y polisacáridos, estos coagulantes tienen propiedades de coagulación y floculación (**Vásquez, 1994**). Miden 5 metros de alto, las pencas tienen de 30 a 50 centímetros de ancho y 2 centímetros de espesor, tienen color verde opaco, poseen espinas, flores y frutos de color rojo, amarillo y naranja (**Rivas, 1998**). Es una planta que no requiere tierra de calidad, crece en terrenos que no son tan fértiles y que tienen escasa humedad, se ven afectadas por bajas temperaturas, esta planta es procedente de América, cuenta con 258 especies, 100 están en México, para consumo humano se estima una producción de 400.000 toneladas anuales, en Colombia se utiliza en ornamentación.

El Cactus es una de las plantas arbustivas con más estudios realizados gracias a que es fuente alimentaria dietética y cuenta con propiedades medicinales (**Saravanakumar et al, 2015**). El Cactus ha sido investigado como coagulante para descontaminar agua residual con colorantes, DBO, turbidez, y altos niveles de iones de metales pesados. La *Opuntia ficus* cuenta con capacidad de coagulación alta ya que su estructura tiene carbohidratos complejos presentes en los cladodios estos cuentan con buena capacidad de retención de agua. Por lo tanto las partes que se utilizan para clarificación del agua son cladodios y mucílagos. (**Bustillos, 2013**)

sugiere que las partes secas y frescas presentan coagulación debido a polielectrolitos naturales viscosos con cargas bajo condiciones ácidas, considerándose como biodegradable, económico y natural para tratamiento de agua, de igual manera los elementos activos del Cactus extraído de los cladodios preliminarmente secado y molido hasta obtener finalmente un polvo son la base para la coagulación. La caracterización de *ficus indica* se realiza mediante FTIR identificando de esta manera grupos funcionales activos en la coagulación de metales pesados. Según (**Jadhav & Mahajan 2014**) el ácido Poligalacturónico proporciona actividad de coagulación de metales pesados.

En la figura 1 se observa la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*)



**Figura 1.** Planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) (Fuente: el Autor)

### **Antecedentes**

La capacidad que tienen los cladodios para coagular han sido probados en iones de metales pesados como  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$  de aguas residuales (**Nharingo, 2015**). Los autores sugieren dosis de 1,8 g/l de polvo, 10 mg/l de

concentración en metales pesados a pH de 5 y 35°C obteniendo remoción del 100% para coagulación de iones Pb II, valores de 86%, 84 % y 93.02 % para reducción de los iones Zn<sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup> y Cu<sup>+2</sup>, las diferencias en coagulación se deben a propiedades químicas y físicas de metales pesados (**Nharingo & Ngwenya, 2013**). En otros estudios realizados en polvo del cladodio se utilizó en el tratamiento de agua de curtiembres, optimizando las dosis y pH utilizando test de jarras. A dosis de 0,4 g/L y pH de 5,5 porcentajes de turbidez y DQO son de 78% y 80% (**Kazi & Virupakshi, 2013**) del mismo modo el mucílago de cactus reporta eficacia de coagulación en agua residual. La extracción del mucílago por ebullición de cladodios, secado y molido para obtención de polvo (**Bustillos, 2013**), extracción de mucílago con dosis de 40 mg / L con pH de 5 muestra eliminación de 91% de turbidez y de 88% de la DQO, es importante tener en cuenta el método de extracción de los coagulantes, es fundamental entender que la coagulación y floculación se realiza mediante; parche electrostático, floculación de barrido, adsorción entre puentes de partículas, adsorción y neutralización de carga, compresión de doble capa (**Miller 2008 & Renault et al 2009**), el mecanismo óptimo para tratamiento de turbidez es adsorción y de puente (Mecanismo de coagulación en el que se forma un puente entre las partículas coloidales) , para iones de metales pesados como Cu<sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup>, Zn<sup>+2</sup>, Pb<sup>+2</sup> se realiza adsorción y neutralización de cargas y adsorción de puente se utilizan estos mecanismos por la naturaleza aniónica y la macromolécula del ácido galacturónico desprotonado en el coagulante (**Nharingo, 2015**).

Los parámetros químicos y físicos que se deben tener en cuenta son pH, concentración de los metales pesados y dosis del coagulante, ya que pueden interferir en la coagulación y floculación. El pH varía de acuerdo a la remoción de iones de metales pesados como Cu, Cd, Zn, Pb probando intervalos de pH 2 – 8 aumentando

la coagulación de metales pesados, un pH 8 no se utilizó ya que hay formación de precipitación de  $Pb(OH)_2$ . (**Vijayaragharan, Sivakumar & Kumar, 2011**) afirma que aniones positivos metálicos y carga negativa del floculante da como resultado coagulación del metal a medida que sube el pH.

El polvo de la *Opuntia Ficus indica* se ha probado en diferentes dosis (2 y 8) g / L, afirmando que la dosis óptima es 8 g / L, la dosis óptima está relacionada con aumento de la eliminación de metales pesados, dosis superiores de 8 g / L genera disminución de coagulación. La concentración de metales pesados puede ser alterada por aumento de concentraciones de iones y tamaño de partículas de *Opuntia ficus indica*. En Concentraciones bajas los iones metálicos interactúan con lugares activos de floculante, generando porcentaje alto de eliminación de iones metálicos (**Nharingo, 2015**).

El cactus es conocido por presentar púas con tejido pulposo conservando así tallos, hojas y raíces, resistiendo periodos de sequía (**Sáenz, 2006**), es de las pocas plantas arbustivas capaces de ser versátiles y ser útiles para consumo humano, la utilización de esta planta industrialmente las hace interesantes para explotación y cultivo (**Sáenz, 2006**). (**Mendoza, 2008**) comprobó la eficacia de *Hylocereus lemairei* como coagulante-floculante en el tratamiento de agua con turbidez de 30 y 70 NTU, este análisis se realizó en un laboratorio con aguas de Zulia, Venezuela, con dosis entre 218 ppm a 1090 ppm de *Hylocereus lemairei* con turbidez de (30-70 NTU) con óptimas dosis de 218 ppm, 437 ppm, 437 ppm, 873 ppm y 1090 ppm, con remoción de turbidez de 94,53 a 98,20%.

La tuna es de la familia Cactaceae son endémicas de América crecen en regiones semiárida y áridas, se adaptan a condiciones secas, suelos pobres, lluvias erráticas. Esta especie es una de las más estudiadas por su rendimiento en la

coagulación demostrando buena eficiencia. **(Villabona, 2013)** evaluó la *Opuntia ficus indica* como coagulante para eliminar turbidez y color en agua cruda con valores de 171 NTU. Obteniendo remoción de color de 54 % y de turbidez de 72% con dosis de 90 mg/L. **(Olivero, Mercado & Montes, 2013)** estudio la *Opuntia ficus indica* y alumbre en tratamiento de agua potable, con concentraciones de 35 y 40 mg/L en el Río Magdalena en Gambote, Bolívar Colombia.

En varios países de Latinoamérica como opción para reemplazar coagulantes de síntesis química en los años setenta se utilizaron coagulantes naturales que fueron extraídos de vegetales y animales **(Antov, Šćiban & Petrović, 2010; Beltrán, Sánchez & Gómez 2010; Díaz et al, 1999; Patel & Vashi, 2012; Šćiban, Klašnja, Antov & Škrbic, 2009)**. Los coagulantes naturales se forman por reacciones bioquímicas generadas en plantas, su estructura química es compleja, están constituidos por proteínas y polisacáridos, estos coagulantes tienen propiedades de coagulación y floculación, muchas comunidades los utilizan para quitar la turbidez del agua obteniendo buenos resultados **(Vásquez, 1994)**. Las sustancias que poseen propiedades de coagulación son de origen vegetal, obtenidos del tallo o las semillas de las plantas, algunas de ellas son; Maíz, Frijol, Moringa Oleifera, estos presentan buena eficiencia en aguas industriales y son ideales para tratar agua con baja turbidez.

**(Parra et al, 2011)** estudio tuna *Opuntia wentiana* para clarificar agua, recolectó muestras de Zulia, Venezuela, con turbiedad de (100-200 UNT). Y dosis de (300, 400, 500, 600 y 700 ppm), obteniendo como dosis óptimas 600 y 700 ppm remoción de 85,25 y 94,84%. **(Fuentes et al, 2012)** estudio *Opuntia cochinellifera* en aguas diluidas, con turbidez (20, 40, 60 y 80 NTU) y dosis de 1000 a 10000 ppm, con turbiedad 20, 40, 60 y 80 NTU, con óptimas dosis de coagulantes de 4500, 8000,



8000 y 6000 ppm, La turbidez osciló entre 3,15 y 17,13 NTU, con % de remoción de (86,10- 93,90%). (**Jiménez, 2012**) evaluó la tuna *Opuntia cochenillifera* para remoción de color en agua de Rio, se comparó sulfato de aluminio y un floculante catiónico, con remoción de color del 94% en agua artificial, aplicando tratamiento único (45 mg/l), remoción del 89%. como observación dejó un valor de DQO residual del doble (21 mg/l). (**Almendárez, 2004**) estudio Tuna (*Opuntia Cochinellífera*) realizó test de jarras, con turbidez de (49 NTU), 199 UPC y un pH de 9,14, mostrando alta eficiencia con los coagulantes metálicos, eficiencia media de coagulante natural y baja eficiencia con el coagulante sintético.

### **El Cactus (*Opuntia ficus indica*) y su importancia en Colombia**

Según la Fundación para la Innovación Agraria (**FIA, 2010**) Varios países del mundo producen tuna, dentro de los que se encuentra Colombia, Italia, Sudáfrica, Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Estados Unidos de América, Marruecos, Algeria, Libia, Túnez, Egipto, Jordania, Pakistán, Israel, Grecia, España y Portugal. La tuna es considerada como subproducto de plantas usadas para la conservación de suelos que sufren de degradación. Existe un rango de aplicaciones de la tuna, como: producción de carmín, biogenericos y cosméticos, harina de cladodios, mermeladas, jugos, usos medicinales, consumo como hortalizas y fruta fresca, cultivo como suplemento forrajero.

En países productores, el nopal se presenta en zonas áridas y semiáridas (**Inglese et al., 1995b; Russell y Felker, 1987b**). Es un producto secundario en los mercados de frutas, los cultivos de cactus se localizan en zonas rurales, es sembrado por pequeños productores con poca tierra, lo que lo hace atractivo desde un punto estratégico, siendo considerado como parte de las políticas públicas de desarrollo.

En Colombia la cordillera de los andes se caracteriza por presentar amplia diversidad de Cactus, la presencia de esta especie de planta arbustiva hace que el país represente uno de los centros mundiales de biodiversidad, actualmente el país cuenta con cerca de 258 especies de cactus presentes en diferentes regiones como cañones del río Chicamocha, Dagua y Patía, región de villa de Leiva, sur de la sabana de Bogotá, región del alto de Magdalena, valle del río Cauca, cuenca alta del río Sucio en Dabeiba y Uramita, Antioquia, cuenca alta del río Catatumbo en Norte de Santander.

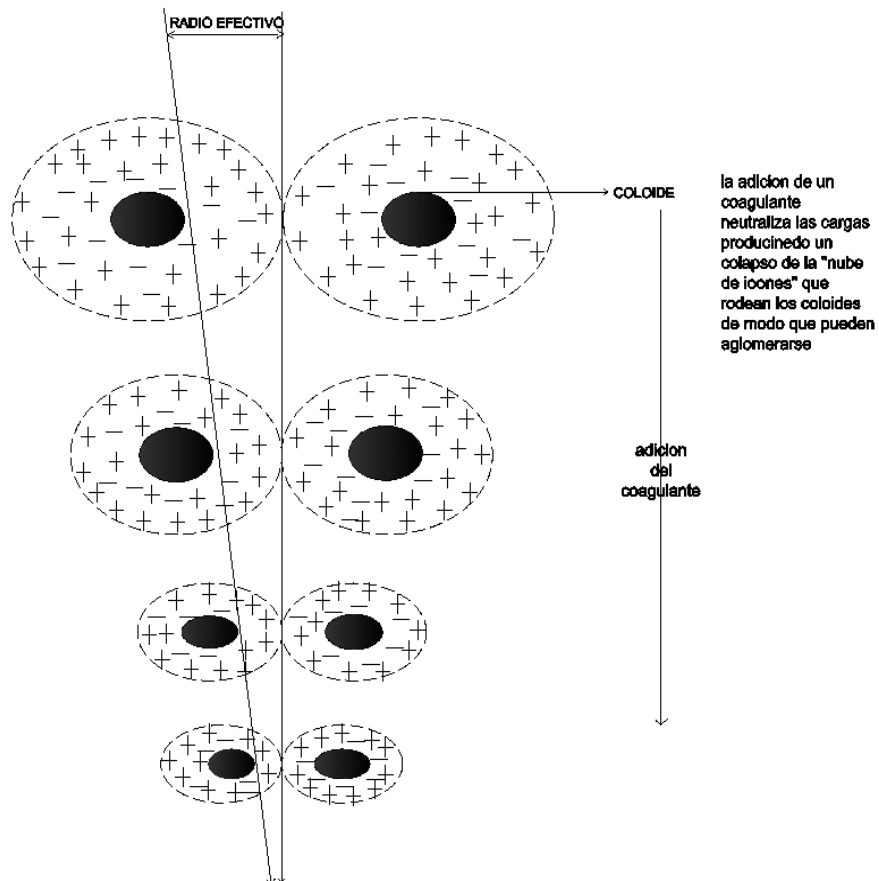
El cactus cobra especial importancia en zonas como Tequendama ya que en esta región se siembra y produce cactus a partir de semillas, que al crecer son utilizadas como plantas ornamentales con la finalidad de comercializarlas, generando de esta manera empleo a los habitantes de la zona (ICA, 2018)

### **Coagulación**

Según (Andia, 2000) la coagulación es el proceso en donde las partículas (aniones) se desestabilizan, se genera neutralización de las fuerzas que mantienen separados a los coloides gracias a la adición de coagulantes de síntesis química y naturales (la remoción depende del agua a tratar y del compuesto) y la energía de mezclado, un punto en común compartido con (Singley, 1986) quien resalta que la coagulación puede conseguirse por adición de un coagulante generando neutralización de cargas electrostáticas de coloidales presentes en el agua, este proceso permite formar partículas que se puedan sedimentar. Hoy en día los coagulantes de síntesis química que más se utilizan son el Aluminio y las Sales minerales de Hierro, estos compuestos dejan residuos en los lodos convirtiéndose en un problema ambiental ya que dosis altas resultan tóxicas para el ser humano. Igualmente al ser de demanda comercial tienen un costo alto, asimismo (Arboleda,

**2000)** indica que la coagulación es la desestabilización de partículas por medio de sustancias químicas llamadas “coagulantes” efectuándose en tanques de mezcla rápida agitando el agua de manera intensa creando una sustancia homogénea de los polímeros con la solución en poco tiempo. En el proceso unido a la floculación se usa para; eliminación de olores y sabores desagradables generados por precipitados químicos suspendidos, eliminación de algas y plancton, destrucción de bacterias, virus y organismos patógenos, eliminación de color, remoción de turbiedad inorgánica y orgánica difícilmente sedimentable, otro aporte importante lo plantea **(Galvin, 2003)** quien afirma que los procesos de coagulación-floculación tienen la finalidad de extraer sustancias coloidales del agua cuya estabilidad no permiten que sean eliminadas por el proceso de decantación, concluyendo que los tiempos son inviables en el proceso industrial. La sedimentación de un metro de profundidad de una partícula coloidal de 1  $\mu\text{m}$  a 0,1  $\mu\text{m}$  de tamaño sería aproximadamente de 2 años, para el caso de partículas coloidales de diámetros entre 0,1 a 0,01  $\mu\text{m}$  sería de 20 años, finalmente **(Masters & Ela, 2008)** afirma que la mezcla y coagulación rápida utiliza sustancias químicas y el proceso de agitación para ayudar a las partículas a colisionar y adherirse, de forma que crea partículas mayores, los cinco autores concluyen que el proceso de coagulación tiene la finalidad de desestabilizar las partículas presentes en el agua (aniones) mediante la utilización de coagulantes de síntesis química.

En la figura 2 se observa el proceso de coagulación, esta es una técnica que se aplica en el agua que presenta turbidez con la finalidad de la eliminación de partículas suspendidas en el recurso hídrico.



**Figura 2.** Adición de un coagulante que neutraliza las cargas produciendo un colapso de la nube de iones que rodean los coloides de modo que pueden aglomerarse

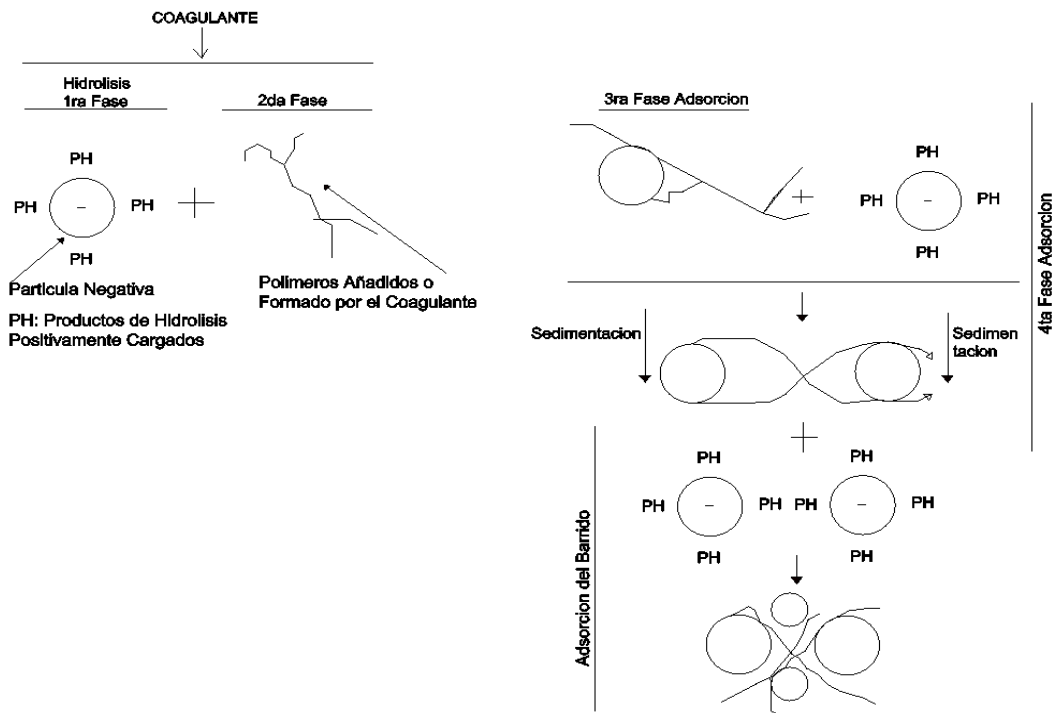
(Fuente: Andia, 2000).

### Fases de la Coagulación

Según (Andia, 2000) el proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas; Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión, formación de Compuestos químicos poliméricos, adsorción de cadenas poliméricas por los coloides, adsorción mutua de coloides y acción de barrido, otro aporte importante lo realizó (Acosta, 2006) quien afirma que cuando se adiciona coagulante al agua se genera hidrólisis y se produce desestabilización de partículas (aniones) por el proceso de adsorción, por carga positiva en la capa de los coloides negativamente cargados,

también puede producirse por interacción química con grupos ionizables que se encuentran en la parte superior de la masa de agua.

En la figura 3 se observa las fases de la coagulación, en este caso se presentan diferentes etapas que permiten la unión de las partículas suspendidas en el agua generando floculación y posteriormente sedimentación.



**Figura 3.** Fases de la Coagulación (Fuente: Andia, 2000)

### Factores que Influyen en la Coagulación

Según (Andia, 2000) para la optimización de los procesos de coagulación es necesario conocer los siguientes factores; tipos de mezcla, sistemas de aplicación de los coagulantes, condiciones de mezcla, tipo de coagulante utilizado, temperatura del agua, turbiedad y pH, la relación de estos parámetros permite prever la cantidad de coagulante que se debe adicionar al agua.

## **Influencia del pH**

El pH de una disolución se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno (en mol/L)

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] \text{ o } \text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Así a 25° C se tienen:

Disoluciones ácidas  $\text{pH} < 7.00$

Disoluciones básicas  $\text{pH} > 7.00$

Disoluciones Neutras  $\text{pH} = 7.00$  (**Chang, 2007**)

En su investigación titulada “evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable” resalta que el pH para cada coagulante de síntesis química tiene una zona óptima en la cual ocurre una adecuada floculación en un tiempo corto y con una dosis de coagulante ya estimada, asimismo destaca que el sulfato de aluminio tipo B, es óptimo para proceso de coagulación con la regla de tener una alcalinidad apropiada (**Restrepo, 2009**), otro aporte significativo es el de (**Andia, 2000**) quien afirma en su investigación titulada “evaluación de plantas y desarrollo tecnológico tratamiento de agua, coagulación-floculación”. Resalta que el pH en función del coagulante y dependiendo del agua a tratar; si el proceso de coagulación se realiza fuera del parámetro indicado de pH, se debe aumentar la cantidad de polímero, en sales de aluminio se debe utilizar un pH óptimo de 6.5 a 8.0 y para sales de hierro un pH de 5.5 a 8.5, asimismo (**Guerra, 2008**) en su investigación titulada “prueba de coagulación – floculación” realizada en la universidad iberoamericana en el laboratorio de ingeniería ambiental, resalta la relación entre el pH y la remoción de turbiedad, guerra realizo pruebas de test de jarras a pH en un rango de 7.5 a 10.0 obteniendo una remoción en un rango de

68.93% a 98.76%, presentando un porcentaje de remoción óptimo con un pH de 7.5 asimismo destaca un trabajo óptimo con un pH cercano al neutral, igualmente **(Castro de esparza & Perez 1981)** en su investigación titulada “determinación de variables químicas” como parte del programa regional de mejoramiento de calidad de agua para consumo humano. OPS/EHP/CEPIS. Resalta que mediante la utilización de la prueba de test de jarras se demuestra la influencia de pH cuando se utiliza una dosis de coagulante de 20 mg/l de sulfato de aluminio, trabajando con una turbiedad de 65 UT de una muestra del Rio Rímac, que cuenta con una alta concentración de dureza y que fue tratada en la planta de Artajea Lima, finalmente **(Arboleda, 2000)** indica que existe un rango de pH de 0 a 14, siendo 7 neutral, menor de 7 es ácido y mayor de 7 es básico, con respecto a la definición dice que es la medición relativa de iones de hidróxido y de hidrogeno, en aguas crudas y tratadas debe estar en un pH de 6.5 a 8.5, influyendo de manera directa en la coagulación, los valores que no están por debajo o por encima de lo establecido generan ineficiente coagulación. Los autores concluyen que cada compuesto utilizado en el proceso de coagulación debe tener un pH adecuado con la finalidad de obtener un porcentaje de remoción de solidos suspendidos óptimo.

### **Influencia de las Sales Disueltas**

Las sales que se encuentran dentro del agua tienen influencia sobre la coagulación y floculación:

- Modificación en el 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. se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

## **Influencia de la Temperatura del Agua**

Cuando hay variación de 1°C se produce corrientes de densidad en el agua afectando la energía cinética de las partículas que están en suspensión, generando coagulación lenta, las temperaturas altas desfavorecen la coagulación, las temperaturas bajas producen viscosidad, esto explica que no se genere sedimentación del floc y existan dificultades en el proceso. (Cardenas, 2000)

## **Influencia de la Turbiedad**

La turbiedad mide la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide la dispersión de las partículas al paso de la luz, en función de número, tamaño y forma de las partículas. La turbiedad del agua superficial se debe a los lodos de sílice con diámetros de 0.2 a 5 um. Cuando el pH es el adecuado la coagulación es óptima: la concentración de partículas permite realizar las siguientes predicciones:

- Es más fácil coagular aguas de turbiedad baja (desagües domésticos industriales) requieren una cantidad mayor de coagulante.
- Cuando existe presencia de turbiedad alta se debe realizar pre sedimentación forzada (polímero aniónico)
- Cuando aumenta la turbiedad se debe adicionar coagulante, no en gran cantidad ya que existe probabilidad de colisión entre las partículas presente en la masa de agua.
- Cada turbiedad tiene una dosis de coagulante, con el que se logra turbiedad residual baja (dosis óptima).

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

La dosis de coagulante tiene influencia en la eficiencia de la coagulación, así:



- ° Selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación (test de jarras)
- ° Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula.
- ° Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula.

### **Influencia de Mezcla**

La mezcla se ve afectada por la agitación que se genere en la masa de agua durante la adición del coagulante, lo que determina si la coagulación es completa en primer lugar son las turbulencias desiguales, lo que hace que ciertas porciones de agua tengan más o menos concentración de coagulantes, la agitación debe ser intensa y uniforme en toda la muestra de agua para asegurar la reacción química de neutralización de cargas, el proceso de coagulación y floculación tiene dos etapas **(Cardenas, 2000)**

En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg., máx.) llamado mezcla rápida.

### **Mezcla Rápida**

Tiene la finalidad de dispersar el coagulante dentro del agua a tratar, la segunda etapa consiste en una mezcla lenta, en esta fase se desarrollan los microfloculos, la mezcla rápida inyecta productos químicos en la zona de fuerte turbulencia.

### **Mezcla Lenta**

Después de la coagulación ocurre la floculación, en esta etapa se presenta una mezcla lenta, en donde se aumenta el tamaño de las partículas suspendidas visibles en la muestra de agua, se forman floculos que se unen entre sí mediante la mezcla lenta, el choque entre partículas genera unión para producir floculos más grandes.

## **Tipos de Mezcladores**

Las unidades que se utilizan para producir la mezcla son: existen 2 grupos los mezcladores mecánicos y los hidráulicos: en línea, estos son difusores, dentro de este grupo encontramos tuberías y canales, resalto hidráulico: encontramos las conocidas canaletas parshall y los vertederos rectangulares, retro mezcladores: en este grupo encontramos los agitadores.

- **Mezcladores Mecánicos:** la mezcla rápida es más eficiente cuando se utiliza agitadores de tipo turbina, estos agitadores están conformados por un disco que imparte movimiento al líquido por medio de la rotación del disco. La potencia que ejerce las turbinas en el agua depende de la forma y el volumen de la cámara de mezcla además de la geometría del impulsor y la velocidad de rotación, las variables están relacionadas de forma que el diseño de la cámara de mezcla depende del tipo de turbina, estos mezcladores se pueden utilizar en cualquier tipo de agua, pero se recomienda para aguas claras que coagulen por mecanismo de barrido.
- **Mezcladores Hidráulicos:** entre los mezcladores de este tipo se pueden mencionar por su simplicidad y eficiencia: de resalto hidráulico y en línea, este tipo de mezcladores es recomendado para todo tipo de agua, tanto para las que coagulan por barrido, neutralización y absorción.

## **Ventajas y Desventajas de los Mezcladores Hidráulicos y Mecánicos**

Los mezcladores mecánicos tienen como ventajas: no varía con el caudal, controla el grado de agitación, generando la velocidad de rotación del impulsor, tiene como límite depender de energía externa, al existir una falla el proceso se perjudicaría. Los mezcladores hidráulicos presentan poca flexibilidad en cuanto a variaciones de caudal, una de sus ventajas es no depender de la energía externa, en

general se utilizan como mezcladores rápidos los vertederos y las canaletas de parshall. (Cardenas, 2000)

### **Coagulantes utilizados en los procesos de clarificación de agua**

Según (Andia, 2000) los principales coagulantes para desestabilización de partículas son; polielectrolitos, sulfato ferroso, sulfato férrico, cloruro férrico, cloruro de aluminio, aluminato de sodio, sulfato de aluminio. Los más utilizados son el hierro y las sales de aluminio, estas sales reaccionan con la alcalinidad generando hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

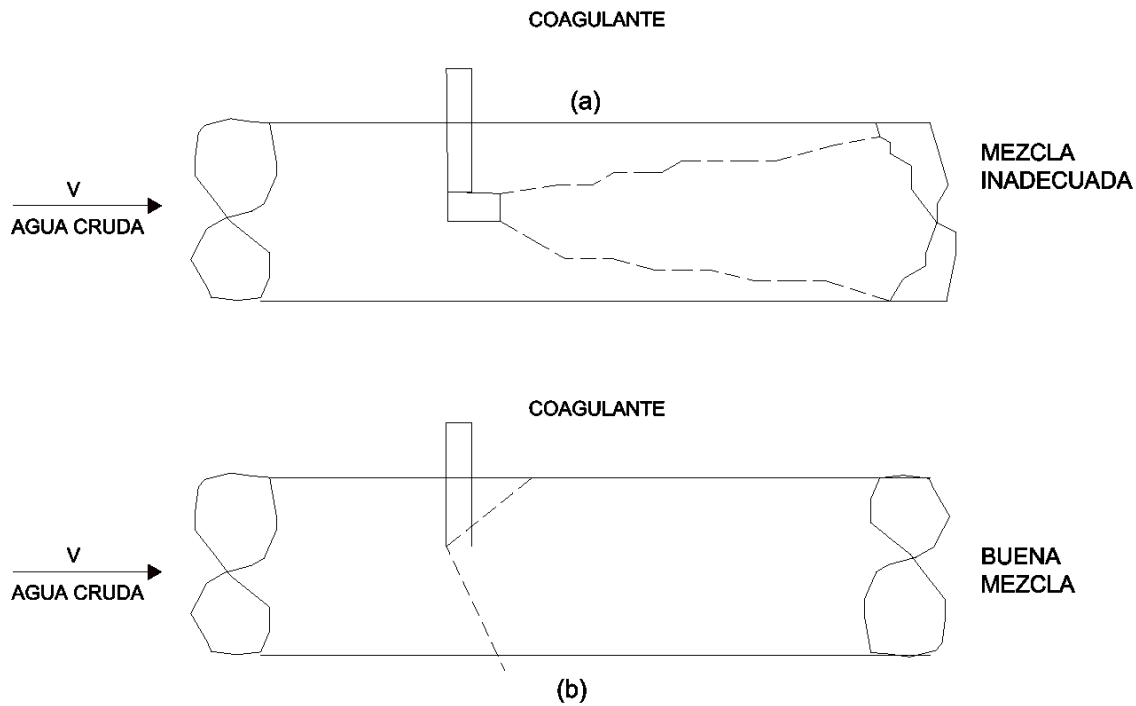
### **Sistema de Aplicación del Coagulante**

La reacción óptima del coagulante en el agua se genera cuando:

- La dosis de coagulante adicionado debe ser uniforme y constante en la mezcla rápida, con la finalidad de dispersar completamente el polímero en la masa de agua.
- En la dosificación del coagulante se debe suministrar caudal constante y regulable; en las siguiente fig. 5 se observan las condiciones de mezcla del coagulante con el agua; se observa que la mejor mezcla es cuando el coagulante adicionado cae en su totalidad a la masa de agua.

Esta condición se obtiene por medio de los equipos de dosificación tanto para los coagulantes al estado sólido y estado líquido, que deben encontrarse calibrados y comprobados en la práctica por medio de las pruebas de aforamiento. (Cardenas, 2000)

En la figura 4 se observa las condiciones de mezcla adecuada e inadecuada para el proceso de coagulación y posteriormente floculación en agua residual.



**Figura 4.** Condiciones de mezcla: se observa que la mejor mezcla es cuando el coagulante adicionado cae en su totalidad a la masa de agua (Fuente: Cardenas, 2000)

### Mecanismo de la Coagulación

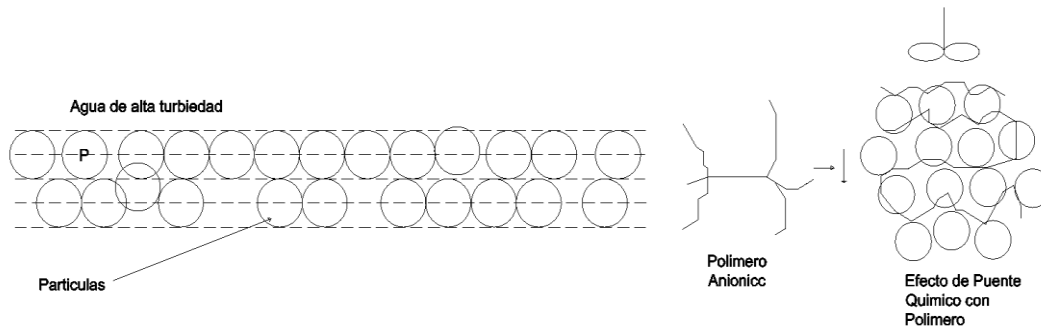
Según (Andia, 2000) la desestabilización se puede producir por procesos fisicoquímicos como; adsorción y puente, atrapamiento de partículas en un precipitado, adsorción y neutralización de cargas y compresión de doble capa, un concepto muy parecido al de (Galvin, 2003) quien afirma que existen cuatro mecanismos fisicoquímicos que intervienen en el proceso de coagulación, estos son: compresión de doble capa eléctrica, neutralización de cargas, agregación de partículas coloidales y del coagulante añadido al agua, precipitación o sedimentación final de los agregados coloide-coagulante, finalmente (Barrenechea, 2004) afirma que en el tratamiento de agua es necesario alterar las fuerzas iónicas agregando sales de hierro o de aluminio o de polímeros que permitan el proceso de coagulación, para

este autor existen 4 mecanismos de coagulación: adsorción y formación de puente, barrido, adsorción y neutralización, comprensión de capa difusa.

### **Adsorción y Puente**

Según (**Andia, 2000**) es más económico utilizar (ya que se aprovechan los lugares libres en la cadena, bajando costos en compra de coagulantes de síntesis química) un polímero aniónico cuando las partículas están cargadas negativamente, podemos explicar lo anterior con la teoría del puente, en este proceso las moléculas con cadenas largas contienen grupos químicos que absorben las partículas coloidales, el polímero atrae las partículas a las extremidades, aprovechando también los lugares libres para absorber otras partículas, por tal razón se dice que forman puente, se puede generar reestabilización de la suspensión por alta carga de polímero, un concepto similar al de (**Barrenechea, 2004**) quien indica que el proceso de coagulación puede ejecutarse con compuestos orgánicos sintéticos y naturales siendo caracterizados por largas cadenas moleculares que tienen sitios ionizables en la cadena asimismo actuar como coagulante. Los polímeros son clasificados de la siguiente manera: catiónicos (sitios ionizables positivos) aniónicos (sitios ionizables negativos) no iónicos (sin sitios ionizables) anfóteros (sitios ionizables negativos y positivos).

En la figura 5 se observa el efecto del mecanismo de puente en la coagulación de agua, en este proceso las moléculas con cadenas largas contienen grupos químicos que absorben las partículas coloidales, el polímero atrae las partículas a las extremidades, aprovechando también los lugares libres para absorber otras partículas, por tal razón se dice que forman puente.

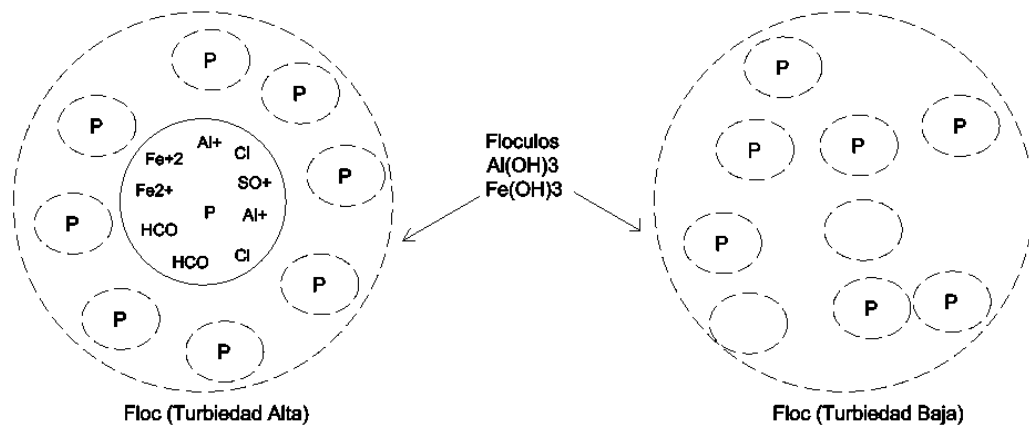


**Figura 5.** Efecto de puente de las partículas en suspensión (Fuente: Andia, 2000)

### **Atrapamiento de Partículas dentro de un Precipitado**

Dentro de un floc están atrapadas partículas coloidales desestabilizadas, al adicionar coagulantes como cloruro férrico y sulfato de aluminio se forman moléculas de  $Al(OH)_3$  o de  $Fe(OH)_3$ . Los aniones aceleran la formación de precipitado. La formación de floc se genera al formarse un anillo gracias a las partículas coloidales, teniendo una formación inversa entre el coagulante y la turbiedad, es decir la concentración de partículas requiere menos cantidad de coagulante. (Cárdenas, 2000)

En la figura 6 se observa el atrapamiento de las partículas en un floc, el proceso consiste en adicionar coagulantes para atrapar partículas formando un anillo y generando sedimentación, esta transformación ocurre después de la coagulación.



**Figura 6.** Atrapamiento de las partículas en un floc (Fuente: Cardenas, 2000)

## Floculación

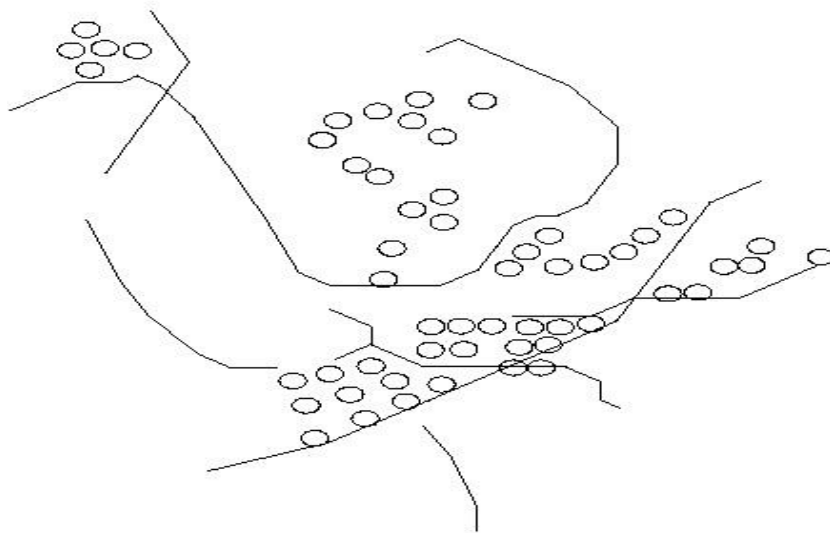
### Definición

Según (Andia, 2000) la floculación es el proceso que le sigue a la coagulación, se presenta la agitación de la masa coagulada permitiendo el crecimiento y aglomeración de floc aumentando el peso y tamaño para la sedimentación, una definición muy parecida a (Arboleda, 2000) quien indica que la floculación ocurre cuando las partículas que ya están desestabilizadas chocan formando así flóculos más grandes, asimismo (Rodríguez, 1995) indica que la floculación es la aglomeración que se genera por agitación de agua, interviniendo las partículas que se desestabilizaron durante el proceso de coagulación formando flóculos, el fin de la floculación es formar microflóculos creando partículas de peso específico mayor al que ya tiene en la masa de agua, compactando el floculo disminuyendo de esta manera la hidratación para bajar la concentración volumétrica la cual produce alta sedimentación y filtración.

## Objetivo de la Floculación

Según (Andia, 2000) corresponde a una mezcla lenta que permite el contacto entre los flóculos, el color y la turbiedad, la mezcla debe permitir diferencias de velocidad pero no muy grande, ya que se puede generar destrucción de flóculos; aun cuando la duración es no más del tiempo óptimo de floculación.

En la figura 7 se observa el proceso de floculación en el cual se presenta agitación del agua con presencia de turbidez, a este tipo de agitación se le conoce como mezcla lenta en la que se aglomeran las partículas suspendidas en al agua para formar floc.



**Figura 7.** Proceso de floculación: se presenta la agitación de la masa coagulada permitiendo el crecimiento y aglomeración de floc (Fuente: Andia, 2000)

## Tipos de Floculación

Según (Andia, 2000) Hay 2 tipos de floculación: pericinetica y ortocinética, para el estudio de investigación se utilizará la floculación ortocinética.



## **Floculación Ortocinética**

En este proceso se genera colisión de partículas debido al movimiento del agua, inducido por energía exterior a la muestra, puede ser de origen hidráulico o mecánico.

Cuando los coloides son coagulados es necesario la producción de aglomeración de microfloculos; para que esto ocurra primero se debe producir la floculación pericinetica (Movimiento natural de las moléculas de agua, esta inducida por la energía térmica) luego la floculación ortocinética (**Andia, 2000**)

## **Parámetros de la Floculación**

Los parámetros que caracterizan la floculación son: floculación ortocinética, gradiente de velocidad, número de colisiones, tiempo de retención, densidad, tamaño del floc y volumen de lodos.

## **Ensayos de Pruebas de Jarra**

El test de jarras simula la coagulación y floculación a pequeña escala es decir en un laboratorio, esto nos permite obtener agua de buena calidad, que sea separable por decantación; su finalidad es utilizar diferentes dosis de coagulante que dan como resultado la formación de flóculos permitiendo estudiar diferentes valores de turbiedad. (**Cardenas, 2000**)

## **Objetivo**

Establecer parámetros químicos y físicos de coagulación; floculación y sedimentación como: eficiencia de remoción, correlación de las velocidades de sedimentación, floculación, tiempos de mezcla rápida, selección de pH óptimo y selección de coagulante.

## **Materiales y Equipos Necesarios**

Se describen detalladamente los equipos utilizados en cada uno de los procesos:

### **Elaboración del polvo extraído del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*):**

Frutos de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*), 1 cortador, 2 bandejas de acero inoxidable, 1 horno, 1 mortero, 1 desecador.

### **Recolección de la muestra de agua residual:**

1 balde, 1 frasco plástico, guantes, mascarilla.

### **Manejo de pH en muestra de agua residual:**

Ácido Clorhídrico HCL, Carbonato de Sodio.

### **Temperatura de la muestra de agua:**

1 termómetro

### **Proceso dosificación de coagulantes y Test de Jarras:**

6 beaker, cinta de enmascarar, 1 turbidímetro, 1 termómetro, 1 conductímetro, 1 potenciómetro, Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, fruto de la planta arbustiva (*Opuntia ficus indica*) en polvo, equipo Floculador.

## Metodología

### Elaboración del polvo extraído del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*)

Inicialmente se lavó con agua el fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*), la pulpa libre de cáscara se cortó en pequeñas tiras, las cuales de inmediato fueron sometidas a un proceso de secado en un horno durante 48 horas continuas a una temperatura de 60 °C, después de desecadas las tiras se retiraron del horno se colocaron en un mortero y se maceraron hasta obtener un polvo fino en seguida se almacenó en un desecador a temperatura ambiente hasta ser utilizado en las pruebas de test de jarras.

En la figura 8 se observa el fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*), estas muestras fueron tomadas en la localidad de Soacha en el departamento de Cundinamarca.



**Figura 8.** Fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) (Fuente: el Autor)

En la figura 9 se observan tiras extraídas del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) para posterior secado en un horno de laboratorio.



**Figura 9.** Pequeñas tiras extraídas del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*)

(Fuente: el Autor)

En la figura 10 Se observan bandejas con las tiras extraídas del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) antes del secado a 60° C durante 48 horas. La finalidad de esta fase fue realizar un proceso de secado del fruto del cactus para convertirlo mediante un mortero en polvo fino con el propósito de utilizarlo como coagulante en las mismas condiciones del Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.



**Figura 10.** Bandejas con las tiras extraídas del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) antes del secado a 60° C durante 48 horas. (Fuente: el Autor)

En la figura 11 se observa pequeñas tiras del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) después de secado en horno a 60° durante 48 horas, estas tiras se llevaron a un mortero para convertirlas en un polvo fino.



**Figura 11.** Pequeñas tiras del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) después de secado en horno a 60° durante 48 horas. (Fuente: el Autor)

En la figura 12 se observa el polvo fino extraído del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) que se utilizó finalmente para test de jarras en el equipo Flocculador.



**Figura 12.** Polvo fino extraído del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) (Fuente: el Autor)

**Diseño experimental al azar para determinación del intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST) en la cuenca media del Rio Fucha**

Para determinación del intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST) en la cuenca media del Rio Fucha se realizó un diseño experimental al azar con la finalidad de saber la hora con mayor turbidez en el agua residual en un intervalo de 7 horas durante 3 días en temporada seca teniendo en cuenta el porcentaje de humedad del día en el cual se tomó la muestra de agua, en la **tabla 1** se observa las variables que se tuvieron en cuenta:

**Tabla 1. Diseño experimental al azar para determinación del intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST) en la cuenca media del Rio Fucha**

Hora	Variables			
	Turbiedad (NTU)	Temperatura °C	pH	Conductividad (S/m)
H1- 10 am	+	-	-	+
H2- 11 am	+	+	+	-
H3- 12 am	-	-	-	-
H4- 1 pm	+	-	+	-
H5- 2 pm	+	-	+	-
H6- 3 pm	-	+	+	+
H7- 4 pm	+	-	-	+

Después de realizar el diseño experimental al azar se procedió a recolectar muestras de agua residual de 1 litro durante 7 intervalos de tiempo durante tres días, divididos de la siguiente manera: 10 am, 11 am, 12 pm, 1 pm, 2 pm 3 pm y 4 pm. Las muestras tomadas se llevaron al laboratorio se analizaron parámetros como: Turbiedad, Temperatura, pH y Conductividad.

**Diseño experimental Factorial para análisis del comportamiento de los coagulantes Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , Cloruro Férrico  $FeCl_3$  y el Fruto (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*)**

En la tabla 2 se observa el diseño experimental factorial utilizado para análisis del comportamiento de los coagulantes.

**Tabla 2 Diseño experimental Factorial para análisis del comportamiento de los coagulantes.**

COAGULANTES	VARIABLES					
	Concentración	Velocidad	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	pH	Conductividad (S/m)
1-Fruto del Cactus ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) en polvo	0.0627 g/ml	30-40-50 RPM	+	-	+	-
	0.0771 g/ml		-	-	+	+
	0.0910 g/ml		+	-	-	-
2-Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$	0.0627 g/ml	30-40-50 RPM	+	-	+	-
	0.0771 g/ml		-	+	-	+
	0.0910 g/ml		+	-	-	+
3-Cloruro Férrico $FeCl_3$	0.0627 g/ml	30-40-50 RPM	-	+	-	-
	0.0771 g/ml		-	+	-	-
	0.0910 g/ml		+	-	+	+

### Recolección de la muestra de agua residual

Se colecto una muestra total de agua residual de 129.6 litros en la cuenca media del rio Fucha, a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sede Jose Celestino Mutis, Bogotá D.C, en el caso de la selección de puntos para la recolección de la muestra se tuvo en cuenta un punto específico (Coordenadas 4°35'05.3"N 74°05'43.9"W), el tipo de muestra a tomar fue puntual, este tipo de muestra se tomó de la siguiente manera; se rotulo un frasco de plástico transparente con fecha y hora exacta en que se tomó la muestra, se utilizó elementos de protección personal como guantes y mascarilla, se lavó el frasco antes de tomar la muestra, se tomó la muestra en dirección contraria al flujo del recurso hídrico, de preferencia en la zona central del Rio, las muestras fueron llevadas directo al laboratorio sin necesidad de almacenar en nevera de icopor con hielo ya que se analizaron los parámetros inmediatamente.

En la figura 13 se observa el Rio Fucha, Cuenca Media, a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sede José Celestino Mutis, Bogotá D.C, de este rio se tomó las muestras de agua para determinación del



intervalo de hora de mayor concentración de solidos suspendidos totales (SST) y muestras de agua para realizar test de jarras.



**Figura 13.** Rio Fucha, Cuenca Media, a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sede José Celestino Mutis, Bogotá D.C (Fuente: el Autor)

### **Manejo de pH en muestra de agua residual**

Cuando se hace referencia a manejo de pH en la muestra de agua residual, es importante tener en cuenta que el pH se modificara cuando en cada beaker ya esté lista la muestra de agua procedente del Rio Fucha, es decir se tomaron datos iniciales de Turbiedad, Conductividad, pH y temperatura, se trabajó a temperatura ambiente, en el caso de que la muestra de agua tenga un pH inadecuado se procederá a modificar el pH de la siguiente manera: Muestras con pH altos con ácido clorhídrico HCL diluido a 0,1 M, muestras con pH bajos se utilizara carbonato de sodio, cada muestra debe ser titulada. Se trabajó en un rango de pH de 6.0 a 8.0 para los 3 coagulantes, Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico y el Fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*). (En el proyecto no fue necesario modificar el pH)

## **Temperatura de la muestra de agua**

Las muestras fueron analizadas a temperatura ambiente, ya que al trabajar con temperaturas más altas o bajas la realización del proyecto sería muy costoso en el caso de proyectar su aplicación en una planta de agua residual o potable.

## **Proceso dosificación de coagulantes y Test de Jarras**

1. Se llenaron 6 beaker con 800 ml de agua residual procedente del agua del río Fucha cuenca media.

2. Se tomó parámetros como: turbiedad, temperatura, conductividad, pH.

3. En el caso de un pH inadecuado se procede a realizar el procedimiento descrito en el numeral 12.5

4. Se enumeraron los beaker de 1 a 6.

5. Las concentraciones para los coagulantes Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  Cloruro Férrico  $FeCl_3$  y el Fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) fueron de 0.0627 g/ml, 0.0771 g/ml y 0.0910 g/lm, respectivamente, extraídos de una muestra madre en donde se agregaron 90 gramos de cada coagulante en presentación sólida en 1000 ml de agua destilada, en cada beaker enumerado se agregaron las concentraciones estimadas, repitiendo el procedimiento 6 veces por cada concentración, se evaluaron 3 niveles de agitación 30, 40 y 50 revoluciones por minuto (RPM).

- En el caso del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) previamente secado y macerado se agregó 90 gramos a una muestra de 1000 ml de agua destilada se agito por 20 minutos en una plancha con agitación magnética, la muestra agitada se filtró, la muestra filtrada fue la que se utilizó finalmente en el test de jarras.

Después de tener en cada beaker la dosis estimada se procede a:

6. Conectar el equipo (Test de Jarras) a una red eléctrica, con polo a tierra.
7. Tomar los beaker con las dosis estimadas y colocarlos en el equipo test de jarras.
8. Ajustar la altura de cada paleta (sentido contrario de las manecillas del reloj).
9. Levantar paletas para acceso a las jarras.
10. Ajustar las paletas tratando de que queden en la mitad del beaker.
11. Encender el programa secuencial: los tiempos que se manejaron en este ítem fueron los siguientes: mezcla rápida para todos los coagulantes de 100 RPM en un tiempo de 60 segundos, esta mezcla se realizó para que el coagulante se mezcle homogéneamente en toda la muestra de agua residual. Mezcla lenta para todos los coagulantes de 20 minutos, en este ítem se trabajó para cada dosis con **30,40 y 50 RPM** en 6 réplicas.
12. Se apagó el equipo y se procedió a retirar los beaker.
13. Se extrajo una muestra de agua (10 ml) de los beaker que previamente pasaron por el test de jarras, agregándolos en las celdas del turbidímetro.
14. De las celdas en donde se encuentran los 10 ml se tomó nuevamente el dato de turbiedad, y parámetros como: temperatura, conductividad y pH.

## Sitio de estudio

El sitio de estudio fue la cuenca media del Río Fucha ubicada en la ciudad de Bogotá a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, sede José Celestino Mutis, coordenadas: 4°35'05.3"N 74°05'43.9"W

En la figura 14 se observa la zona de estudio en donde se tomaron las muestras de agua residual para análisis en el laboratorio.

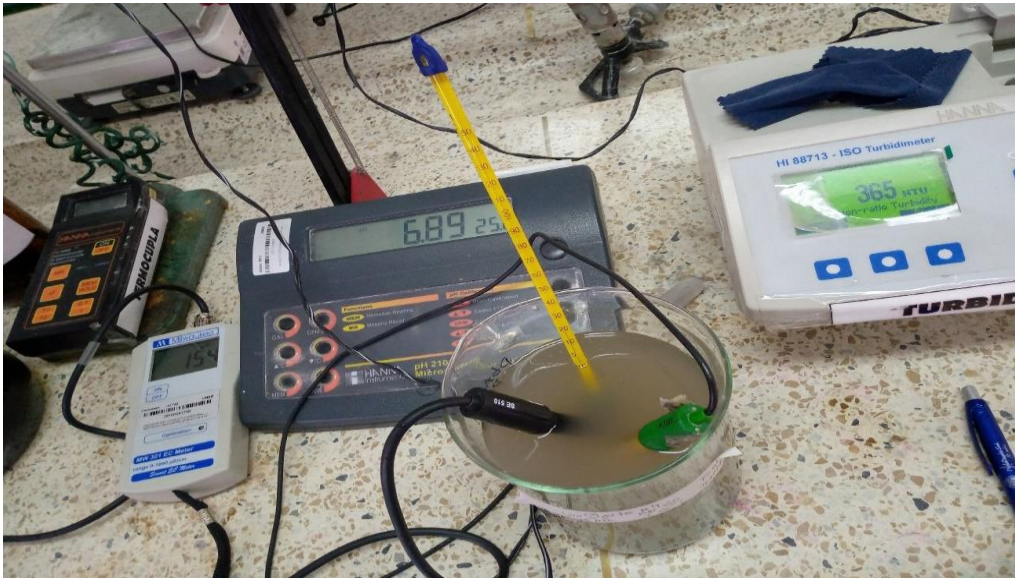


**Figura 14.** Río Fucha a la altura de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sede Nacional José Celestino Mutis, Bogotá D.C (Fuente: Google Maps)

## Equipos utilizados en el laboratorio

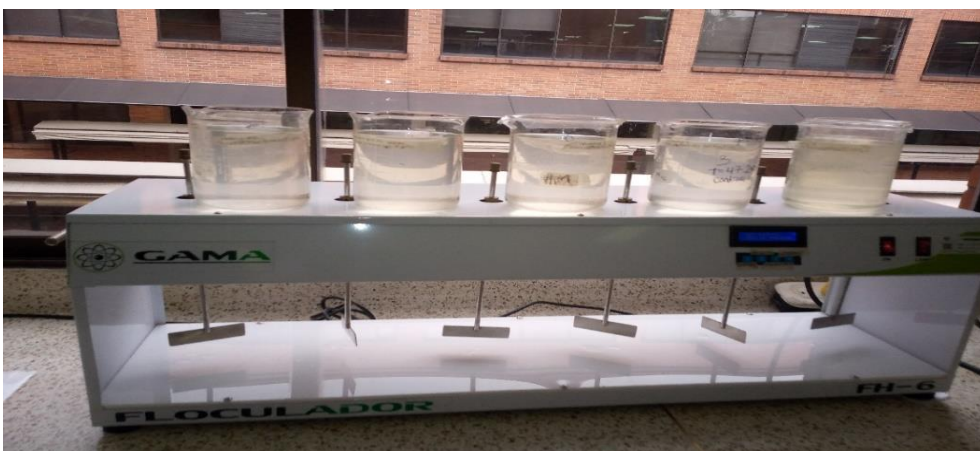
Fue necesario utilizar Agitador Múltiple o Flocculador, equipo provisto de 6 agitadores planos (Marca Gama FH-6), Un Potenciómetro (Marca Hanna), un turbidímetro (Marca Hanna hi 88713-iso), un conductímetro (Marca Milwaukee) y un termómetro (marca Brixco).

En la figura 15 se observan los equipos utilizados en el laboratorio para tomar parámetros como turbiedad, conductividad, pH y temperatura antes y después de la aplicación de coagulantes.



**Figura 15.** Equipos utilizados en laboratorio para tomar parámetros de Conductividad, pH, Temperatura y Turbiedad. (Fuente: el Autor)

En la figura 16 se observa el equipo Floculador, en el que se realizó pruebas test de jarras para determinar el comportamiento de los sólidos suspendidos en el agua después de la aplicación de los coagulantes.



**Figura 16.** Equipo Floculador, se utilizó para realizar la prueba Test de Jarras

(Fuente: el Autor)

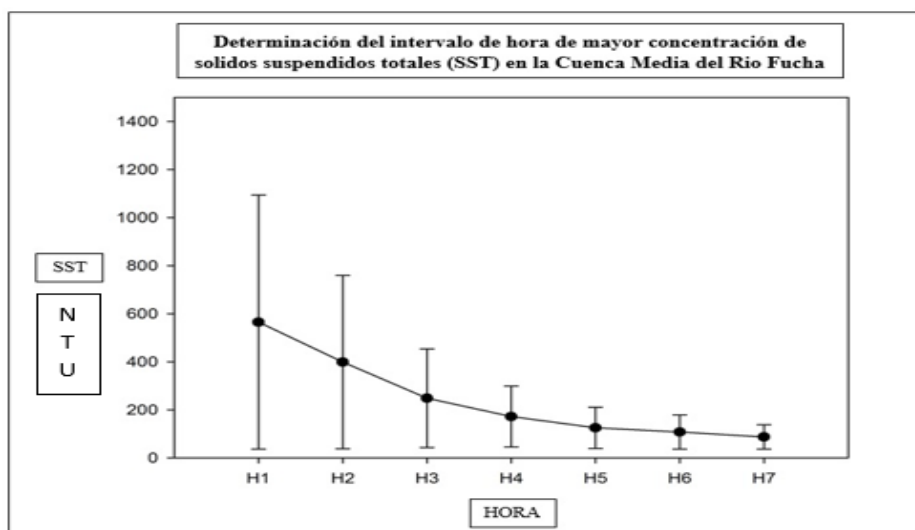
Finalmente los datos arrojados en el diseño experimental al azar y factorial fueron analizados en el programa estadístico R versión 3.3.1 (R Development Core Team 2016).

### **Modelo Estadístico**

Los datos fueron sometidos a tres test, el primero es el test de Shapiro–Wilk para determinar si hay o no hay distribución normal de los datos, después se realizó una Anova para ver la diferencia entre los coagulantes independiente de la velocidad y la dosis, a continuación se ejecutó un Anova two-way para ver la influencia de la velocidad y la dosis por cada coagulante y finalmente se realizó el test de tukey para ver la diferencia entre la velocidad de las dosis, todos los análisis se realizaron con el programa estadístico R versión 3.3.1 (R Development Core Team 2016).

## Análisis y Discusión

En la figura 17 se muestran los resultados de la determinación de intervalo de hora de mayor concentración de sólidos suspendidos totales en la cuenca media del Rio Fucha, se encontró que no hay efecto significativo de las horas sobre la turbiedad sin embargo se observa que a las 10 am la turbiedad es 6.5 veces mayor que a las 4 pm por lo tanto se tomó la muestra de agua para análisis en laboratorio a las 10 am en las mismas condiciones de tiempo, seco, las variables que interfirieron fueron temperatura en un rango de 12 y 27 ° C y humedad de 50-60%. Los datos arrojados sobre turbiedad muestran mayor concentración de sólidos suspendidos a las 10 am este parámetro obedece a la presencia de indigentes y zorreros que viven en el cauce quienes hacen sus necesidades fisiológicas de aseo y de alimentación dentro de la zona de estudio además de las descargas domesticas e industriales que se realizan en el lugar como vertimientos de origen residencial e institucional, igualmente se depositan residuos sólidos como colchones sofás, escombros, papeles, plásticos etc. (Quintero, Acevedo & Aristizabal, 2007)





**Figura 17.** Determinación del intervalo de hora con mayor concentración de sólidos suspendidos totales en la cuenca media del Río Fucha. (Fuente: el Autor)

**Tabla 3. Anova, diferencias significativas entre los tres coagulantes: Fruto del cactus extraído de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*), Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico.**

<b>Variable</b>	<b>gl</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Coagulante	2	406.4	<0.001

*gl*: Grados de libertad, es decir (n-1), número de veces que se realizó el experimento menos 1.

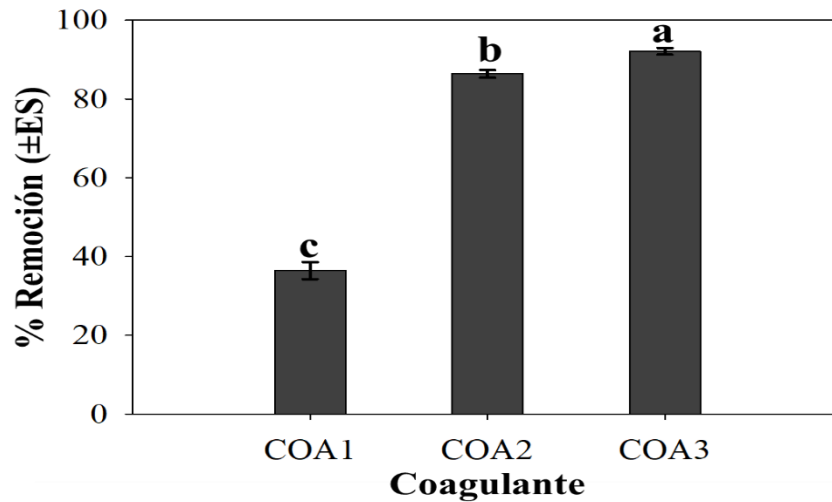
*F*: F calculado, a mayor F, mayor probabilidad de que sea significativo el experimento, a menor F no hay significancia.

*P*: Probabilidad: probabilidad significativa. La velocidad, concentración y la interacción entre las dos variables son significativas.

En la Tabla 3. Se observa una Anova, la finalidad es ver la diferencia significativa entre los tres coagulantes como la probabilidad es menor de 0.001 entonces hay diferencias significativas por lo cual se realiza un test de Tukey y se procede a realizar una gráfica (figura 19)

En la figura 18 se observa diferencias significativas, donde el Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico son más eficientes que el Fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) en polvo. En el caso de la turbiedad el coagulante que cumplió con la norma para agua doméstica fue el Cloruro Férrico con 1.37 UNT y el Sulfato de Aluminio con 5.43 UNT (Valor máximo 10 UNT) (Decreto 1594 de 1984). El fruto del Cactus

no cumplió con la norma de remoción de sólidos suspendidos totales, los datos arrojados muestran que después de la aplicación del coagulante se removió un 76 %.



**Figura 18.** Porcentaje de remoción de los coagulantes: Fruto de Cactus (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*), Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico (COA1: Fruto de Cactus (en polvo) COA2: Sulfato de Aluminio COA3: Cloruro Férrico) Tukey HSD test ( $<0.05$ ). (Fuente: el autor)

**Tabla 4. Anova two-way, influencia de la velocidad y la dosis por cada coagulante**

	Variable	gl	F	P
Coagulante 1	Velocidad	2	113.08	<0.001
	Concentración	2	69.83	<0.001
	Velocidad × Concentración	4	119.48	<0.001
	Velocidad	2	14.4	<0.001
Coagulante 2	Concentración	2	9.58	<0.001
	Velocidad × Concentración	4	4.14	<0.01
	Velocidad	2	4.56	<0.05
	Concentración	2		

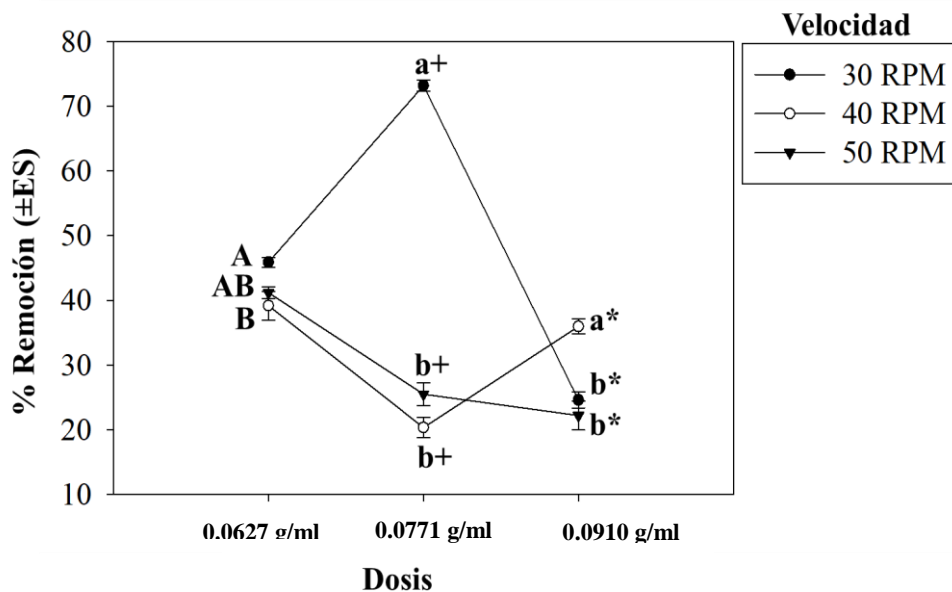
Concentración	2	21.08	<0.001
Velocidad × Concentración	4	6.23	<0.001

**gl:** Grados de libertad, es decir (n-1), número de veces que se realizó el experimento menos 1.

**F:** F calculado, a mayor F, mayor probabilidad de que sea significativo el experimento, a menor F no hay significancia

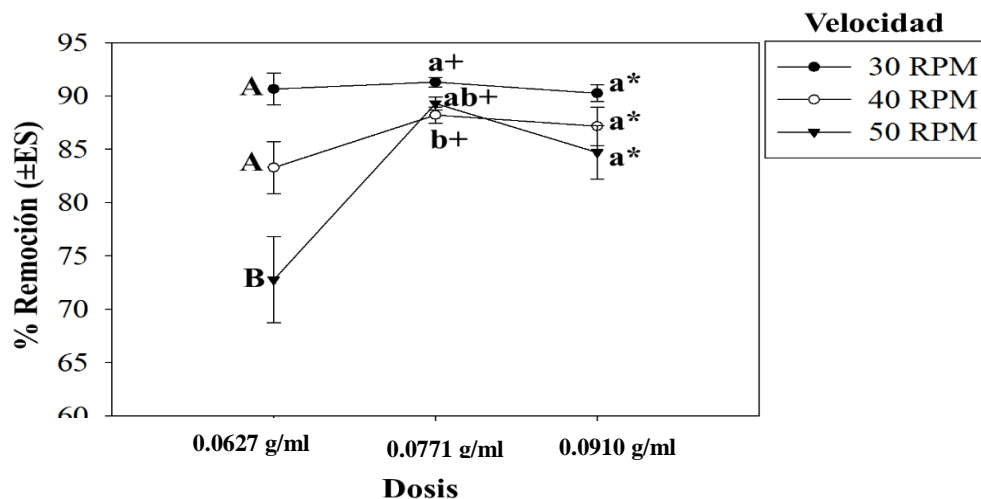
**P:** Probabilidad: probabilidad significativa. La velocidad, concentración y la interacción entre las dos variables son significativas.

En la figura 19 se observa que la velocidad, la concentración y la interacción entre las dos variables son significativas. La concentración más adecuada es 0.0771 g/ml a 30 RPM, lo que indica que podría implementarse como coagulante natural, logrando ser utilizado como un coagulante primario, porque el porcentaje de remoción de turbidez es superior a 70% que es el indicador (Parra et al., 2011).



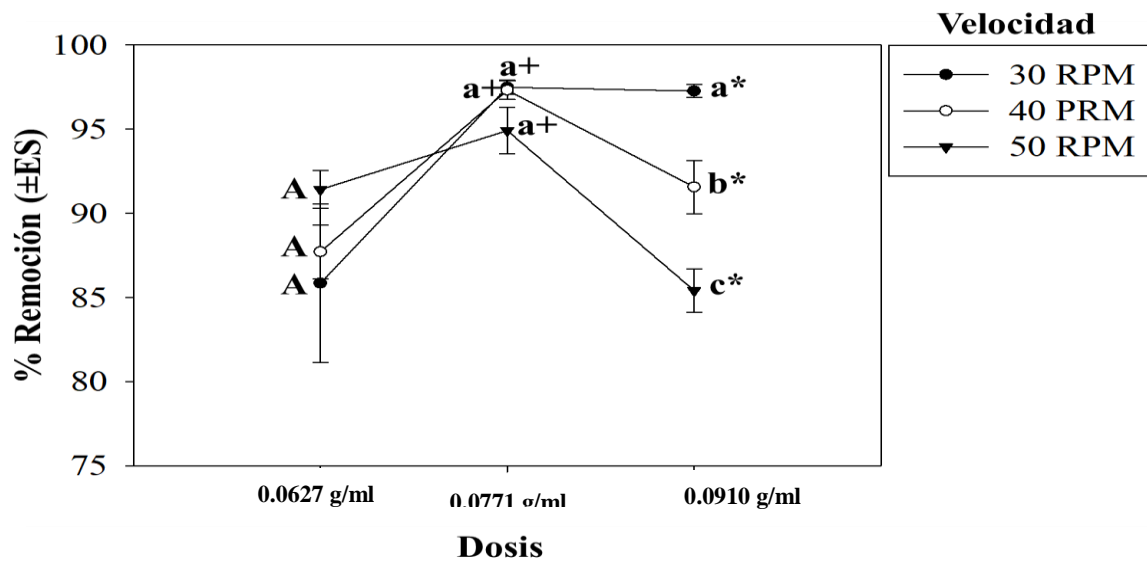
**Figura 19.** Porcentaje de remoción del coagulante 1 (COA1) Fruto de Cactus (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*). Letras diferentes indican diferencias significativas entre las dosis (letras mayúsculas: 0.0627 g/ml; letras con +: 0.0771 g/ml; letras con \*: 0.0910 g/ml). Tukey HSD test (<0.05). (Fuente: el autor)

En la figura 20. Se observa que en 0.0910 g/ml no hay diferencias significativas, lo que indica que la concentración adecuada para coagulación-floculación es de 0.0627 g/ml y 0.0771 g/ml.



**Figura 20.** Porcentaje de remoción coagulante 2 (COA2) Sulfato de Aluminio. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las dosis (letras mayúsculas: 0.0627 g/ml; letras con +: 0.0771 g/ml; letras con \*: 0.0910 g/ml). Tukey HSD test (<0.05). (Fuente: el autor)

En la figura 21 se observan diferencias significativas para 0.0910 g/ml, lo que indica un buen funcionamiento de la concentración frente a la coagulación-floculación, las concentraciones de 0.0627 g/ml, 0.0771 g/ml no se recomiendan para proceso de remoción de sólidos suspendidos totales.



**Figura 21.** Porcentaje de remoción coagulante 3 (COA3) Cloruro Férrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las dosis (letras mayúsculas: 0.0627 g/ml letras con +: 0.0771 g/ml: letras con \*: 0.0910 g/ml). Tukey HSD test (<0.05). (Fuente: el autor)

### Identificación de variables adecuadas para la remoción de la turbidez

En la tabla 5 se muestran las condiciones iniciales y finales de las variables analizadas en el laboratorio, se analiza que para el caso del Fruto de Cactus (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) se presentó un porcentaje de remoción de 76 %, las variables fueron pH de 7.21, conductividad de 179  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 18° C, el Sulfato de Aluminio presentó un porcentaje de remoción de 94%, las variables fueron pH de 7.61, conductividad 76  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 19° C, el Cloruro Férrico presentó un porcentaje de remoción de 98%, las variables fueron pH de 7.28, conductividad de 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura 16°C. El (Decreto 1594 De 1984) especifica que el valor de pH en el agua para este propósito deberá estar comprendido entre 6.5 a 8.5, también presenta el valor máximo aceptable para la conductividad del agua doméstica que puede ser hasta 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el pH y la

conductividad obtenidos del análisis del agua residual del río para Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico fueron 6.82-75  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 6.53 y 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; respectivamente, cumpliendo con la normativa vigente. El Fruto de Cactus (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) no cumplió con la norma de remoción de sólidos suspendidos totales, sin embargo cumple con el parámetro de pH que indica la norma con un valor de 7.21 igual que la conductividad 179  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Se presentan los valores de conductividad y pH medidos en el agua del río Fucha después de haber sido tratada con el Fruto (en polvo) de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*), Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, se observa un aumento en la conductividad eléctrica en el caso Fruto del Cactus (en polvo), Sin embargo, la conductividad se mantiene por debajo del valor máximo aceptable para agua domestica que puede ser hasta 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Teniendo en cuenta que el pH influye en la clarificación del agua ya que determina las condiciones adecuadas para la formación de floc capaz de sedimentarse (Gurdián y Coto,2011) asimismo el Sulfato de Aluminio es efectivo como coagulante cuando tiene un rango de pH entre 5,5 y 8 (Rodríguez, 2008) y la *Opuntia ficus indica* es eficaz para tratar el agua cuando presenta un rango de pH entre 7 y 10 (Yin, 2010) Se observa que los valores de pH dados a conocer en la tabla 5 favorece una mejor clarificación del agua del río al emplear Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico y el Fruto del Cactus.

**Tabla 5. Condiciones iniciales y finales de las variables analizadas en el laboratorio**

Coagulante	Concentración de Coagulante	Velocidad	Velocidad RPM	Turbiedad inicial (UNT)	Turbiedad final (UNT)	% de remoción	pH inicial	pH final	Conductividad inicial	Conductividad final	Temperatura °C
Fruto del cactus	(0.0627 g/ml)	V1	30 RPM	393	93,9	76	7,21	7,12	179	190	18

Sulfato de Aluminio	(0.0771 g/ml)	*S D S	*S D S	60, 4	3,2 8	94	7.6 1	6.8 2	76	75	19
Cloruro Férrico	(0.0910 g/ml)	*S D S	*S D S	11 7	1,6 1	98	7.2 8	6.5 3	41	41	16

\*SDS: Sin diferencias significativas.

Los coagulantes de síntesis química como Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico producen Problemas reportados por diferentes autores como presencia de iones de aluminio, hierro y cloro en el agua (Quintana, 2000) dejando residuos en las estructuras, además de presentar dificultades para mantener estable el pH óptimo de coagulación durante la operación y su posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas (Nordberg, 1990). De igual manera (Cogollo, 2011) afirma que el  $Al_2(SO_4)_3$  requiere regulación, ya que de no ser así los procesos de clarificación son deficientes y el Aluminio solubilizado causa alteraciones en la calidad del agua, este fenómeno se genera por la reestabilización de las partículas cargadas en el recurso hídrico. Según (Farina et al, 2002) se demostró que el  $Al_2(SO_4)_3$  reduce la hemoglobina y el hematocrito en Ratas causando Anemia en esta especie de animales. De igual forma estudios epidemiológicos afirman que al exponerse al  $Al_2(SO_4)_3$  se acrecienta la actividad inflamatoria del cerebro de los seres humanos provocando la enfermedad conocida como Alzheimer, adicionalmente incrementa la posibilidad de envejecimiento cerebral que representaría la aparición de la enfermedad neurológica ligada con la edad avanzada (Bondy, 2014) un estudio muy parecido al de (Gurdián y Coto, 2011) quien asevera que el alumbre puede ser asimilado por el hombre con consecuencias negativas a largo plazo con efectos asociados a cáncer y enfermedades óseas. (Parra et al., 2011) afirma que una concentración de aluminio mayor a 0,1 mg/L en el agua de consumo humano puede

ser un factor en la incidencia de la aparición de Alzheimer. (Miller et al., 2008; Yin, 2010) aseguran que el aluminio genera lodos que no pueden ser utilizados como biosólidos ya que impactan de manera negativa el suelo y el agua debido a su ecotoxicidad. Según (Polizzi et al, 2003) el  $Al_2(SO_4)_3$  produce un tipo de encefalopatía que genera la pérdida de control muscular, degeneración espinocerebrogenica y temblor. (Mendoza, Fernández, & Ettiene, 2000) reportan problemas con pacientes que sufren de enfermedades como insuficiencia renal crónica y con tratamiento de hemolisis. (Singley, 1986) afirma que los compuestos químicos utilizados en plantas de tratamiento para remoción de turbidez dejan residuos en los lodos convirtiéndose en un problema ambiental debido a que contienen residuos de químicos como  $Al_2(SO_4)_3$  y  $FeCl_3$ . Teniendo en cuenta las complicaciones generadas por el Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico se hace necesario implementar coagulantes naturales como la (*Opuntia ficus indica*), la cual mediante la investigación realizada demostró una remoción de turbidez de 76 %, diferentes autores respaldan porcentajes similares, (Kazi & Virupakshi, 2013) realizo estudios con polvo del tallo de la *Opuntia ficus indica* para el tratamiento de agua de curtiembres, optimizo las dosis y pH utilizando test de jarras a dosis de 0,4 g/L y pH de 5,5 con porcentajes de turbidez 78% y DQO 80%. (Miller 2008 & Renault et al 2009) realizo extracción de mucílago con dosis de 40 mg / L con pH de 5.0, mostrando eliminación de 91% de turbidez y de 88% de la DQO.



## Conclusiones

Se determinó que el intervalo de hora de mayor concentración de sólidos suspendidos totales en la cuenca media del Río Fucha fue sobre las 10 am.

Se realizó una Anova que determinó diferencias significativas entre los tres coagulantes, encontrando una probabilidad menor de 0.001 lo que indica diferencias significativas entre el coagulante Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico, al ejecutar una Anova two-way para indagar la influencia de la velocidad y la concentración de cada coagulante, se halló que el fruto del cactus en polvo presenta diferencias entre la velocidad, la concentración, asimismo entre las dos variables, para el Sulfato de Aluminio se concluyó que la concentración de 0.0910 g/ml no tiene diferencias significativas, pero 0.0627 g/ml y 0.0771 g/ml sí las tienen, finalmente el Cloruro Férrico tiene diferencias significativas para una concentración de 0.0910 g/ml.

Se analizaron los parámetros más adecuados para la Coagulación-Floculación en el caso del fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) se presentó un porcentaje de remoción de 76 %, las variables que permitieron esta remoción fueron pH de 7.21, conductividad de 179  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 18° C, el Sulfato de Aluminio presentó un porcentaje de remoción de 94%, las variables que permitieron esta remoción fueron pH de 7.61, conductividad 76  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 19° C, el Cloruro Férrico presentó un porcentaje de remoción de 98%, las variables que permitieron esta remoción fueron pH de 7.28, conductividad de 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura 16°C.

Se concluye que el fruto de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) podría implementarse como coagulante natural a una concentración de 0.0771 g/ml a

30 RPM, logrando ser utilizado como un coagulante primario, porque el porcentaje de remoción de turbidez es superior a 70%.

El uso de la planta arbustiva Cactus (*Opuntia ficus indica*) como coagulante natural es una alternativa de bajo costo ya que el proceso de extracción no es complejo, se requiere los tallos libres de la cascara de la planta cortados en pequeñas tiras, dejándolos secar durante 48 horas a 60 grados centígrados en un horno.

## **Recomendaciones**

Se recomienda analizar que componente del fruto de la planta arbustiva cactus (*Opuntia ficus indica*) tiene el poder de coagular los sólidos suspendidos en la muestra de agua residual.

Se recomienda trabajar con concentraciones más altas en próximos estudios de coagulación-floculación para tratamiento de turbidez en agua con el fruto del cactus (*Opuntia ficus indica*). Con el presente estudio se trabajó con una concentración de 0.9 g/ml, removiendo 76 % de turbiedad.

Se recomienda investigar cuanto material en presentación solido es decir en polvo del fruto del Cactus (*Opuntia ficus indica*) es necesario para ser implementado como tratamiento alternativo en el proceso de coagulación floculación a nivel de una planta de tratamiento de agua residual.

## Referencias Bibliográficas

- Acosta 2006 Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación  
recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Ada Barrenechea Marte 2006, Coagulación, (Online)
- Almendárez N. 2004. Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del lago de Managua "Piedras Azules". Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente, Universidad Nacional de Ingeniería "Campus Simón Bolívar", Managua (Nicaragua), 5(1):46-54.
- Andía, Y. (2000). Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación- floculación. Lima Perú.
- Antov, M., Šćiban, M., Petrović, N. (2010). Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for water turbidity removal. *Bioresour. Technol.*, 100 pp. 2167–2172.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá: Mc Graw Hill y ACODAL.
- Beltrán-Heredia, J; Sánchez-Martín, J; Gómez-Muñoz M. C. 2010. New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimization studies. *Chemical Engineering Journal*. 162: 1019–1025.
- Bondy, S.C., Prolonged exposure to low levels of aluminum leads to changes associated with brain aging and neurodegeneration. *Toxicology*, 315, pp 1-7, 2014. DOI: 10.1016/j.tox.2013.10.008

Bustillos, L.G.T., Carpinteyro, S., Orozco, C., (2013). Production and characterization of Opuntia ficus-indica mucilage and its use as coagulant-flocculant aid for industrial wastewaters. *Int. J. Biotechnol. Res.* 1, 38e45.

Cardenas (2000), evaluación de plantas y desarrollo tecnológico, tratamiento de agua, coagulación y floculación, recuperado de:  
[http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)

Castro, M. y Pérez, J. (1981). Programa Regional de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano. Sub Módulo “Determinación de Variables Químicas”. Perú.

Cogollo, J.(2011).Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclорuro de aluminio. *Dyna*, 78(165),18-27.

Contreras 2007, turbiedad del agua, calidad del agua, recuperado de  
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6164/11/turbiedad.pdf>

Chang 2007, Química. (9na Ed.) México: McGraw – Hill Interamericana.

Day DG. How Australian social `policy neglects environments. *Austr. J. Soil Water. Conserv.* Noviembre de 1996;9(4):3-9.

Decreto 1594 De 1984 Usos del agua y residuos líquidos, recuperado el 11 de febrero de 2020  
[http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec\\_1594\\_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f](http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f)

Díaz, A; Rincón, N; Escorihuela, A; Fernández, N; Chacín, E; Forster, C. F. 1999. A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry.* 35: 391–395.

F. Renault, B. Sancey, P.M. Badot, G. Crini, Chitosan for coagulation/flocculation processes – an eco - friendly approach, *Eur. Polym. J.* 45 (2009) 1337–1348.

Farina, M., Lara, F.S., Brandão, R., Jacques, R. and Rochab, J.B.T., Effects of aluminum sulfate on erythropoiesis in rats. *Toxicology Letters*, 132(2), pp 131-139, 2002. DOI: 10.1016/S03784274(02)00077-2.

FIA (Foundation for Agrarian Innovation).2010. Estudio de la cadena productiva de la tuna. Study commissioned to the University of Chile by FAI, Ministry of Agriculture Chile. 165 pp.

Fuentes L, Mendoza I, Diaz P, Fernandez Y, Zambrano A, y Villegas Z. 2012. Potencial coagulante de la tuna *Opuntia Cochinelifera* (L.) Mill. (Cactaceae) en aguas para consumo humano. *Centro de investigaciones biológicas*. 46(2): 173-187.

Galvin 2003 *fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos, tratamiento y control de calidad de aguas*.

Guerra, F. (2008). Universidad Iberoamericana Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Prueba de Coagulación –Floculación. México.

Gurdián, R. y Coto, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*, 24 (2), 18-26.

ICA 2018, El cultivo del cactus otro producto agrícola que trabaja para generar divisas al país, Recuperado el 25 de enero de 2020 <https://www.ica.gov.co/noticias/cultivo-cactus-tequendama>.

- Inglese, P., Barbera, G. & La Mantia, T. 1995b. Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *J. Arid Environ.*, 29: 455–468.
- Jadhav MV, Mahajan YS (2014) Assessment of feasibility of natural coagulants in turbidity removal and modeling of coagulation process. *Desalin Water Treat* 52:5812–5821.
- Jiménez 2012 evaluación de la tuna (*Opuntia cochenillifera*) para la remoción del color en agua potable. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835667.pdf>
- Kazi, T., Virupakshi, A., (2013). Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* 2, 4061e4068
- Masters, ela 2008, introducción a la ingeniería medio ambiental.
- Mendoza 2008 eficiencia de *Hylocereus lemairei* como coagulante floculante en aguas para consumo humano, recuperado de [produccioncientificaluz.org/index.php/impacto/article/download/6612/6600](http://produccioncientificaluz.org/index.php/impacto/article/download/6612/6600)
- Mendoza, I., Fernández, N., & Ettiene, G. (2000). Uso de la *Moringa oleifera* como coagulante en la potabilización de las aguas Use of *Moringa oleifera* as coagulant in the water treatment. *Ciencia* 8, 8(August), 235-242.
- Miller, S.M., Fugate, E.J., Craver, V.O., Smith, J.A., Zimmerman, J.B., (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. As a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environ. Sci. Technol.* 42, 4274e4279
- Nharingo, T., Ngwenya, T.J., 2013. Single and binary sorption of lead (II) and zinc (II) ions onto *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) ash. *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.* 2, 419e426.

- Nharingo, T., Zivurawa, M.T., Guyo, U., 2015. Exploring the use of Cactus *Opuntia ficus-indica* in the biocoagulation-flocculation of Pb (II) ions from wastewaters. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*
- Nordberg, s.f. Human health effects of metals in drinking water: relationship to cultural acidification. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9 (7), 887-894, 1990.
- Olivero R, Mercado I, y Montes L. 2013. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus indica*. *Producción + Limpia*, 8: 19-27.
- Parra Y, Cedeño M, Garcia M, Mendoza I, Gonzalez Y, y Fuentes L. 2011. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae), 1(1): 27-33. *REDIELUZ* ISSN 2244-7334.
- Patel, H; Vashi, R. T. 2012. Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants. *Journal of Saudi Chemical Society*. 16: 131 - 136.
- Polizzi, S., Pira, E., Ferrara, M., Bugiani, M., Papaleo, A., Albera, A. and Palmi, S., Neurotoxic effects of aluminum among foundry workers and Alzheimer's disease. *Neurotoxicology*, 23, pp 761-774, 2003. DOI: 10.1016/S0161-813X(02)00097-9
- Quintana, r. Cómo tratar el agua. Documento técnico. Coca Cola de Colombia, Bogotá D.C., 2000.
- Quintero T, Acevedo B, Aristizabal, O, (2007) Estudio hídrico del canal río fucha y análisis de los impactos generados por la construcción de la ciclo ruta paralela al canal en la localidad de puente Aranda.



Restrepo, H. (2009). Evaluación del Proceso de Coagulación –Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín Facultad De Minas. Colombia

Resolución 2115 del 22 de Junio del 2007, características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Recuperado el 11 de febrero de 2020  
[https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)

Rivas, M. 1998. Cactáceas de Costa Rica. San José, Costa Rica: EUNED. p 33.

Rodríguez, Carlos. 1995 Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 115 p.

Rodríguez, C. (2008). Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable. Tesis para optar el título de ingeniero Civil. Universidad de Sucre, Sincelejo.

Russell, C.E. & Felker, P. 1987b. The prickly-pears (*Opuntia* spp., Cactaceae): a source of human and animal food in semiarid regions. *Econ. Bot.*, 41(3): 433–445.

Sáenz C. (2006). Boletín de servicios agrícolas de la FAO 162: Utilización agroindustrial del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

Saravanakumar, A., Ganesh, M., Peng, M.M., Aziz, A.S., Jang, H.T., (2015). Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of *Opuntia ficus-indica* fruit extracts from summer and rainy seasons. *Front. Life Sci.* 8, 182 e 191.

- Šciban, M; Klačnja, M; Antov, M; Škrbic, B. 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*. 100: 6639 – 6643.
- Singley, J. 1986. Revisión de la teoría de coagulación del agua. Gainesville, Estados Unidos: Universidad de la Florida. p. 9-26.
- Vásquez, O. 1994. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales [tesis]. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. pp. 28-57.
- Vijayaraghavan, G., Sivakumar, T., Kumar, A.V., (2011). Application of plant based coagulants for waste water treatment. *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.* 1, 88e92
- Villabona A, Paz I, y Martínez. 2013. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Rev. Colomb. Biotecnol*, 15: 137-144.
- Warner, E. 1972. Impacto Económico de los Nuevos Procesos de Tratamiento de Agua. Asunción, Paraguay: Memorias Simposio Nuevos Métodos de Tratamiento de Agua. 527 – 536.
- Yin, Chun Yang (2010). Emergind usage of plant based coagulants for water and wasterwater treatment. *Process Biochem.*, 45 pp. 1437–1444.