

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO  
( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE POR MEDIO DEL USO DE UNA  
RED NEURONAL ARTIFICIAL.**

**CLAUDIA LORENA BARAJAS GARZÓN**

**ANDREA JULIANA LEÓN LUQUE**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**DIVISIÓN DE INGENIERIAS**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**Bogotá**

**2015**

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO  
( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE POR MEDIO DEL USO DE UNA  
RED NEURONAL ARTIFICIAL.**

**CLAUDIA LORENA BARAJAS GARZÓN**

**ANDREA JULIANA LEÓN LUQUE**

**Trabajo como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental**

**Director: Ing. M.Sc. CARLOS ANDRÉS PEÑA GUZMAN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**DIVISIÓN DE INGENIERIAS**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**Bogotá**

**2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

**DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO  
(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 18H<sub>2</sub>O) EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE POR MEDIO DEL USO DE UNA  
RED NEURONAL ARTIFICIAL.**

**Presentado por:**

**CLAUDIA LORENA BARAJAS GARZÓN**

**ANDREA JULIANA LEÓN LUQUE**

**Los suscritos director y jurado del presente trabajo de grado, una vez revisada la versión escrita y presenciando la sustentación oral decidimos otorgar:**

**La nota de: \_\_\_\_\_**

**Con la connotación de: \_\_\_\_\_**

**Para constancia firmamos en la ciudad de Bogotá hoy \_\_\_\_\_**

**Director: \_\_\_\_\_**

**Carlos Andrés Peña Guzmán**

**Jurado: \_\_\_\_\_ Jurado: \_\_\_\_\_**

**Juan Carlos Torres Fernández**

**Nidia Helena Ortiz Penagos**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PROBLEMÁTICA.....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
4. MARCO DE REFERENCIA.....	17
4.1 MARCO CONCEPTUAL.....	18
4.1.1 Agua Potable.....	18
4.1.2 Planta de Tratamiento de Agua Potable.....	18
4.1.3 Inteligencia Artificial.....	28
4.1.4 Redes Neuronales.....	30
4.1.5 Matlab.....	35
4.1.6 Optimización.....	35
4.2 ANTECEDENTES.....	36
4.3 MARCO LEGAL.....	39
5. DESARROLLO CENTRAL.....	40
5.1 METODOLOGÍA.....	40
5.1.1 Determinación de los parámetros fisicoquímicos más representativos para el cálculo de la dosis óptima de coagulante.....	41

5.1.2 Evaluación de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) para diferentes escenarios mediante Ensayo de Jarras .....	42
5.1.3 Determinación de la dosis óptima para diferentes escenarios de turbidez inicial a través de la RNA teniendo en cuenta los parámetros de entrada establecidos..	53
5.1.4 Comprobar la efectividad de los datos arrojados por las regresiones y la RNA implementada.....	61
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	64
6.1. RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS CON LA DOSIS DE COAGULANTE....	64
6.2. RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO DE JARRAS .....	65
6.2. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE COLOR Y ALCALINIDAD .....	67
6.2.1 Color.....	67
6.2.2 Alcalinidad.....	68
6.3 RESULTADOS DE LOS TRIPLICADOS DEL AFINE DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE .....	69
6.3.1 Remoción para los triplicados del afine de la dosis de ( $\text{Al}_2\text{SO}_4$ ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O .....	70
6.4 REGRESION LINEAL Y POLINOMIAL DE LA DOSIS ÓPTIMA INICIAL.....	72
6.4.1 Regresión lineal de los triplicados del primer Ensayo de Jarras. ....	72
6.4.2 Regresión polinomial para los triplicados del primer Ensayo de Jarras .....	73
6.5 DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO PARA LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE .....	75
6.5.1 Porcentaje de remoción en los triplicados de pH .....	76
6.6 RESULTADOS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS REGRESIONES Y LA RNA..	79
6.6.1 Resultados de la efectividad de la regresión Lineal y Polinomial .....	79
6.6.2 Resultados de la RNA.....	81
7. CONCLUSIONES.....	92
8. RECOMENDACIONES.....	94

9. BIBLIOGRAFÍA .....88

**LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Clasificación de RNA	34
Tabla 2: Antecedentes	38
Tabla 3: Valores máximos aceptables de los parámetros relevantes para agua potable según la Res. 2115 del 2007	40
Tabla 4: Niveles de turbidez utilizados en el Ensayo de Jarras.	43
Tabla 5: Composición del agua base	43
Tabla 6: Volumen de agua base necesario para cada nivel de turbidez	44
Tabla 7: Dosis de coagulante para los últimos nueve ensayos	49
Tabla 8: Dosis de coagulante para comprobación de las Regresiones Lineal y Polinomial.	62
Tabla 9: Turbiedades iniciales para la comprobación de las regresiones	62
Tabla 10: Porcentaje de remoción del primer ensayo de jarras	66
Tabla 11: Alcalinidad para cada nivel de turbidez inicial	68
Tabla 12: Porcentaje de remoción de los triplicados del afine de dosis de $(Al_2SO_4)_3$	71
Tabla 13: Remoción para los tres ensayos de pH	76
Tabla 14: Ecuaciones y ECM de las regresiones lineal y polinomial para las repeticiones del primer ensayo.	79
Tabla 15: Concentración óptima calculada por las regresiones	79
Tabla 16: Remoción de la regresión lineal de verificación	80
Tabla 17: Porcentaje de remoción de la regresión polinomial de verificación	80
Tabla 18: Dosis arrojada por la RNA	82
Tabla 19: Remoción de la RNA	83

## **LISTA DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Proceso de Tratamiento de Agua Potable	19
Figura 2: Desestabilización de las cargas en la coagulación	21
Figura 3: Coagulación y Floculación	21
Figura 4: Potencial Z	22
Figura 5: Ensayo de Jarras	25
Figura 6: Estructura de una neurona biológica	31
Figura 7: Representación de una RNA	32
Figura 8: Agua Base	44
Figura 9: Muestras preparadas para el Ensayo de Jarras	45
Figura 10: Medidor Multiparámetros	46
Figura 11: Sulfato de Aluminio granulado	46
Figura 12: Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) preparado	47
Figura 13: Ensayo de Jarras para 6 muestras	48
Figura 14: Flóculos sedimentados	50
Figura 15: Ácido Sulfúrico e Hidróxido de Sódio al 0,02N.	52
Figura 16. Función <i>xlsread</i> para la lectura de datos	54
Figura 17. Matriz de ceros y función <i>min</i>	54
Figura 18. Distribución normal de Gauss	55
Figura 19. Función <i>if</i> para el valor óptimo de turbidez final	56
Figura 20. Matriz de los valores de Ensayos de jarras con variación de pH.	59
Figura 21. Red de entrenamiento para la RNA	60
Figura 22: Arquitectura de la RNA realizada.	61



Figura 23. Matriz de correlaciones de la dosis de coagulante con cada parámetro	64
Figura 24. Valores de turbidez inicial vs turbidez final para en primer Ensayo de jarras	72
Figura 25: Remoción primer Ensayo de Jarras	67
Figura 26: Triplicados del ajuste para la turbidez de 10, 100, 500 y 1000 NTU	69
Figura 27: Porcentaje de remoción de turbidez en el ajuste de la dosis	71
Figura 28. Regresión lineal los triplicados del primer Ensayo de Jarras.	72
Figura 29. Error Cuadrático Medio de la regresión lineal	73
Figura 30. Regresión polinomial para los triplicados del primer Ensayo de Jarras	74
Figura 31. Error Cuadrático Medio de Regresión Polinomial	74
Figura 32: pH óptimo para los niveles de turbidez inicial de 10 a 64 NTU	75
Figura 33: Porcentaje de remoción de turbidez en el ajuste de pH	77
Figura 34. Relación entre la turbidez inicial, pH y turbidez final	77
Figura 35: Comportamiento del pH frente a la turbidez inicial y final	78
Figura 36: Resultados Red Neuronal Artificial	81
Figura 37. Porcentaje de remoción de la RNA, regresión lineal y polinomial	83

## LISTADO DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A: A fine de la dosis de coagulante optima	92
Anexo B. Concentración de coagulante y turbidez final en cada repetición afine	del 93
Anexo C. Ajuste de pH y alcalinidad	98
Anexo D. Características del Medidor Multiparámetros	99
Anexo E. Medidor multiparametro	99
Anexo F. Características Espectrofotómetro	100
Anexo G. Espectofotometro	100
Anexo H. Color inicial y final en cada repetición del afine de la dosis óptima	101

## **RESUMEN**

El proceso de coagulación y floculación es una de las operaciones más importantes dentro de la potabilización de aguas, pero su efectividad se ve afectada debido a que el cálculo de la dosificación de coagulante a aplicar se lleva a cabo por medio del Ensayo de Jarras o el uso del *Streaming Current Detector* (SCD) que respectivamente poseen como principales desventajas el hecho de no tener en cuenta el cambio de los parámetros fisicoquímicos del agua en tiempo real y la necesidad de obtener de un punto óptimo de funcionamiento para el equipo, calculando una dosis indicada sólo para ciertas condiciones.

El presente proyecto se formuló con el fin de llevar a cabo la determinación de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) utilizando modelos de correlación entre variables como las regresiones lineales y polinomiales y al mismo tiempo un modelo de Red Neuronal Artificial (RNA) que al enfrentarse a variaciones en tiempo real de la turbidez sea capaz de arrojar como resultado una dosis indicada, con el objetivo de conseguir una coagulación efectiva en el agua a tratar y de esta forma evitar la presencia excesiva o insuficiente de coagulante, minimizar la necesidad de realizar ensayos de jarras continuamente y al mismo tiempo lograr disminuir las pérdidas de carácter económico debido al gasto inadecuado del coagulante.

**Palabras claves:** Tratamiento de aguas, Coagulación, Floculación, Dosis óptima de coagulante, Regresión Lineal, Regresión Polinomial, Redes Neuronales Artificiales.

## INTRODUCCIÓN

El agua potable se considera uno de los principales objetivos dentro de la salud pública, en cuanto a su suministro, acceso y uso, con el fin de garantizar ese recurso a la población. Existen determinadas normas que establecen los valores mínimos y máximos en cuanto al contenido de minerales, pH, patógenos, entre otros parámetros con los cuales se mantiene un control dentro del proceso de garantizar un agua como apta para consumo.

El proceso de potabilización tiene como fin brindar un agua que cumpla con cada requisito establecido, existen diversos procesos de potabilización, cada uno con un resultado específico, estos procesos se seleccionan teniendo en cuenta la procedencia del agua que será tratada, como lo es en el caso de los manantiales, con los cuales no es necesario realizar todos los procesos de potabilización ya que es agua que generalmente solo necesita realizar un proceso de desinfección. Generalmente la fuente del agua son ríos o lagos, naturales o superficiales, los cuales pasan por diferentes etapas; una filtración inicial para eliminar posibles sólidos de gran tamaño, seguido de una precipitación de impurezas suspendidas en el agua por medio del proceso de Coagulación y Floculación donde se elimina la turbidez del agua por medio de floculantes, luego de la anterior etapa el agua pasa por un proceso de Sedimentación en donde se decantan todos los flóculos, para eliminar arenas o partículas que no se hubiesen sedimentado se realiza otra filtración por medio de filtros de diferente tamaño que a su vez eliminan el color del agua, para luego realizar una desinfección ya sea con cloro, rayos Ultra Violeta u ozono.

Existen diferentes problemáticas en cuanto al nivel de efectividad de los procesos de potabilización debido a que las condiciones del agua a tratar no siempre son las mismas, por lo que afecta el resultado de cada etapa, esto se puede ver especialmente en el proceso de Coagulación y Floculación, en el cual el nivel de efectividad se ve afectado debido a que la dosis de coagulante que se aplica está calculado de acuerdo con unas condiciones iniciales, las cuales suelen variar por diferentes factores externos, afectando el resultado que se desea en este proceso. El proceso de Coagulación y Floculación ha sido objeto de estudio debido a esta problemática, ya que la dosis de coagulante tradicionalmente se determina por medio de ensayos de Jarras, en los cuales las condiciones del agua no van a cambiar, sin tomar en cuenta que las condiciones del agua en un medio real tienden a variar, haciendo que este proceso sea ineficiente, adicionalmente se debe tener en cuenta que el tipo de coagulante es otro factor influye en el nivel de efectividad de la Coagulación y Floculación. Debido a lo anterior se han realizado diferentes estudios con el fin de optimizar este proceso, en donde tenga en cuenta las

condiciones del agua a tiempo real en el momento de determinar la dosis óptima de coagulante.

El uso de la inteligencia artificial ha sido una alternativa para establecer soluciones a esta problemática, a través de diferentes enfoques de la inteligencia artificial como los sistemas difusos y las redes neuronales se han realizado diversos estudios como alternativas para determinar la dosis de coagulante óptima. En este trabajo se utilizaron las Redes Neuronales Artificiales como una alternativa para determinar la dosis optima de coagulante para un sistema de agua potable con el fin de optimizar el proceso de Coagulación y Floculación, para así obtener un mayor nivel de efectividad, reducir costos en cuanto al gasto de coagulante y además hacer más automatizado el proceso de determinación de la dosis de coagulante, sin necesidad de realizar ensayos de Jarras periódicamente para establecer una dosis de coagulante, ahorrando tiempo y aumentando la efectividad del proceso.

El proceso de Coagulación y Floculación tiene la necesidad de ser optimizado, ya que la turbidez y el color tienden a ser removidos dentro de este proceso y además son dos factores con los que se determina si el agua que ha sido tratada es apta para consumo humano. En este estudio se realizó el modelo de Redes Neuronales Artificiales como principal alternativa para la optimización de la determinación de la dosis de coagulante, sin embargo se tuvo en cuenta el modelo de regresión lineal y polinomial, con los cuales se realizó también una estimación de los valores de dosis óptima para cada escenario de turbidez, todo esto con el fin de establecer qué modelo se ajusta en mayor medida y que al mismo tiempo permita obtener los resultados más óptimos.

## **1. PROBLEMÁTICA**

Dentro del proceso de tratamiento de aguas existen diferentes operaciones unitarias que al combinarse entre ellas permiten dar como resultado un agua tratada con un nivel de calidad óptimo para el consumo humano. Una de las operaciones de mayor relevancia dentro de dicho proceso es la Coagulación-Floculación debido a que una coagulación incorrecta es imposible de corregir en las etapas posteriores, lo cual conlleva a que se vea perjudicada la eficiencia de todos los procesos siguientes [1]. Para conseguir que esta operación sea llevada a cabo con éxito es necesario el establecimiento de una dosificación de agente coagulante que depende a su vez de la caracterización de las propiedades físicas y químicas del agua y que en conjunto permiten obtener una dosis óptima, es decir la cantidad de coagulante con la cual se conseguirá una mayor reducción de la turbidez, la cual tradicionalmente es calculada empleando dos metodologías: El Ensayo de Jarras y el equipo *Streaming Current Detector* (SCD). Sin embargo ambos métodos poseen limitaciones al momento de aplicarlos [2].

En cuanto a la Prueba de Jarras se puede destacar que esta resulta no ser tan efectiva debido a que las condiciones fisicoquímicas del agua a tratar no son constantes, es decir que no tiene en cuenta las variaciones de estos parámetros en tiempo real y adicionalmente presenta una alta dependencia frente a la experiencia de los operadores [2]. Por su parte el SCD presenta limitaciones frente a la obtención del punto óptimo de funcionamiento del equipo y al mismo tiempo genera sobrecostos debido a la necesidad de un mantenimiento especializado de manera frecuente [3]. Lo anterior conlleva a que se presenten aplicaciones de dosis de coagulante hasta con un 40% de error, lo cual trae como consecuencia una alteración de la eficiencia del proceso de Coagulación-Floculación que ocasiona la presencia excesiva o deficiente del agente coagulante y perturbación en los niveles de calidad de agua deseados [1].

Cabe adicionar que cada uno de los factores mencionados anteriormente traen asociados otros problemas como se refleja en la aplicación excesiva de coagulante, la cual es causante de la presencia en forma residual del agente coagulante (Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) en este caso) en el agua, originando implicaciones perjudiciales para la salud humana [4, 5].

Además, es responsable del aumento en la coloración del agua en la etapa de distribución, del incremento de la turbidez residual debido a la producción elevada de flóculos minúsculos y con baja velocidad de sedimentación, de la sobreproducción de lodos en los tanques de Coagulación-Floculación y de pérdidas económicas significativas dentro de una planta de tratamiento de agua potable [4, 5].

Por otra parte, la adición insuficiente del agente coagulante afecta significativamente la calidad del agua tratada ya que no se remueve la cantidad indicada de sólidos suspendidos o partículas coloidales que se encuentran

presentes en ella, afectando al mismo tiempo la efectividad de los procesos de filtración y sedimentación ya que los flóculos generados cuentan con una velocidad de sedimentación muy baja y por ser de un tamaño tan pequeño y con poca compactación suelen quedarse atrapados en los lechos filtrantes, generando con el tiempo su colmatación [4, 6].

Con la aplicación de una dosis óptima de coagulante se hace posible que la desestabilización de las partículas coloidales y los sólidos suspendidos en el agua que está siendo tratada se produzca de una manera más rápida y al mismo tiempo contribuye con la obtención de un flóculo de mayor tamaño y mayor compactación, lo cual traerá como consecuencia una sedimentación más efectiva en menor tiempo y que además se retenga menor cantidad de flóculos en los filtros debido a que por su grado de compactación no se rompen al atravesar los lechos filtrantes, generando así una optimización del proceso de Coagulación-Floculación [7].

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Debido a la estrecha relación entre la dosis de coagulante y los parámetros fisicoquímicos como el pH, turbidez, alcalinidad, temperatura, conductividad y color del agua, junto con las constantes alteraciones del comportamiento de estas variables, se hace necesario establecer nuevos mecanismos que permitan la determinación de una dosis de coagulante teniendo en cuenta los cambios que estos parámetros fisicoquímicos puedan presentar en respuesta a cualquier alteración que tenga lugar en el agua, para de esta manera lograr la optimización del proceso de Coagulación-Floculación.

Por lo anterior se plantea la posibilidad de utilizar la capacidad de predicción de las tecnologías de inteligencia artificial para lograr que los resultados no se vean influenciados por las limitaciones ya mencionadas, considerando que desde principios del siglo XXI se popularizó su uso como una alternativa para resolver esta problemática, siendo las Redes Neuronales Artificiales la técnica con mayor uso y al mismo tiempo con un mayor grado de desempeño de acuerdo a los resultados obtenidos en diversas investigaciones.

En estudios como [1, 8], para mencionar solo algunos, se encontró que al implementar una RNA para el cálculo de dosis óptima de coagulante el resultado más elevado de porcentaje de error arrojado por la red fue de 3%, resaltándose que en la mayoría de las corridas ejecutas el error fue de 0%, razón por la cual es posible afirmar que en comparación con métodos como el Ensayo de Jarras que en esta misma practica arrojó un error hasta de 40%, resulta ser acertado el uso de las RNA para tal fin.

Esta herramienta podrá beneficiar los sistemas de tratamiento de aguas, aumentando la efectividad de los procesos de Coagulación-Floculación, además de generar una posible reducción en los costos de operación, sin mencionar que el nivel de la calidad del agua que se obtendrá será acorde con lo establecido en la legislación y favorecerá a la población que se abastece del recurso que ha sido tratado. Adicionalmente, al conseguir la obtención de la dosis óptima de coagulante mediante el uso de la RNA se hace posible la automatización del cálculo y de la aplicación de la dosis de coagulante, reduciendo la necesidad del uso del Ensayo de Jarras de forma continua, minimizando el nivel de error en la cantidad de dosis a aplicar, optimizando el gasto de coagulante y facilitando las labores de los operarios de la planta [2].

### **3. OBJETIVOS**



### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) en el proceso de Coagulación - Floculación para el tratamiento de aguas por medio del uso de Redes Neuronales Artificiales.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar los parámetros fisicoquímicos más importantes para el proceso de Coagulación-Floculación.
- Evaluar la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) para diferentes escenarios mediante el Ensayo de Jarras.
- Determinar la dosis óptima de coagulante para diferentes escenarios a través de la implementación de una Red Neuronal Artificial.
- Comprobar la efectividad de la Red Neuronal Artificial elaborada para el cálculo de dosis óptima de coagulante.

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

## **4.1 MARCO CONCEPTUAL**

### **4.1.1 Agua Potable.**

Se considera agua potable toda agua natural o de tratamiento que cumpla con todas las normas de calidad establecidas para tal fin, basadas en estudios epidemiológicos, toxicológicos y consideraciones estéticas. El agua potable se produce a partir del tratamiento del agua que proviene de aguas superficiales, subterráneas, atmosféricas, océanos, glaciares, lagunas, mares, entre otros [9].

Para establecer una fuente de agua como potable es indispensable conocer cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, con el fin de determinar en qué condiciones se encuentra. Esto se realiza debido a la amplia gama de contaminantes, materia orgánica y sustancias químicas presentes en los cuerpos de agua que por sus propiedades puedan producir efectos adversos [9].

Los estándares de calidad de agua potable son establecidos por entes reguladores en cada país, los cuales a su vez tienen la obligación de velar por su cumplimiento y garantizar este recurso a cada consumidor [9]. En Colombia se encuentran regulados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 2007.

Para alcanzar los niveles mínimos de calidad de agua exigidos por las normativas locales y nacionales es necesaria que estas aguas sean sometidas a un conjunto de operaciones unitarias que componen el proceso de potabilización. Generalmente este tratamiento es realizado en Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

### **4.1.2 Planta de Tratamiento de Agua Potable.**

Una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) es un conjunto de estructuras en las que se trata el agua de manera que quede apta para el consumo humano. Consta de una serie de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o características no deseables de las aguas [10]. Existen diferentes tecnologías para potabilizar el agua pero todas deben cumplir los mismos principios:

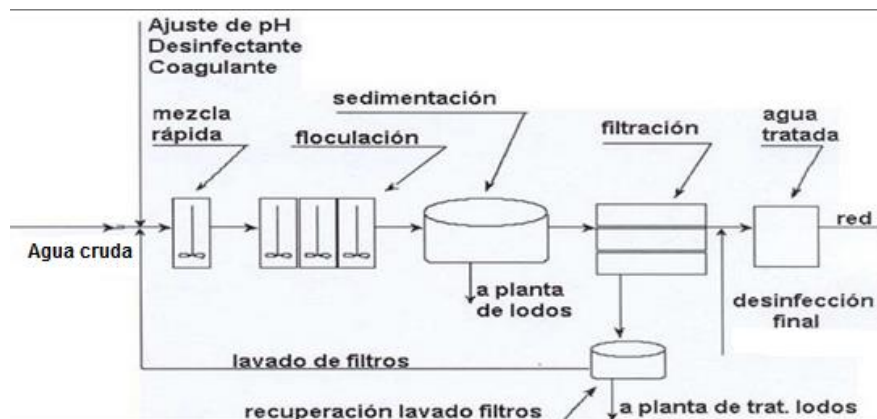
- Higiénico: remover bacterias y elementos venenosos o nocivos, así como resolver la mineralización excesiva y las concentraciones elevadas de compuestos orgánicos y microorganismos nocivos [10].
- Estético: corregir el olor, la turbidez, el color y el sabor [10].

- Económico: Reducir la corrosividad, la dureza, las concentraciones de hierro y manganeso entre otros [10].

Los procesos de tratamiento básicos dentro de una PTAP son los siguientes:

- Bocatoma: Punto de captación de las aguas que conduce el agua hacia una cámara de entrada que cuenta con una rejilla o criba para la remoción de sólidos grandes [11].
- Aireación: A través de diferentes sistemas de aireación (vertedero, cascada, etc.) se proporciona oxígeno al afluente que se va a tratar para remoción de compuestos orgánicos volátiles como metano, sulfuro de hidrogeno entre otros que les confieren olor y sabor al agua [11].
- Coagulación: a través de esto se agrega un químico al agua para aglomerar y remover las partículas en suspensión [11].
- Floculación: Este proceso consta en la aglomeración de las partículas suspendidas en el agua hasta tener el peso suficiente para poder sedimentarse.
- Sedimentación: Proceso por el cual se deja el agua en reposo en tanques con el fin de que se decanten los flóculos formados en el anterior proceso [11].
- Filtración: El agua pasa a través de un medio poroso, en donde todas las partículas que aún no han sido eliminadas en procesos anteriores son retenidas [11].
- Desinfección: En este proceso se destruyen o inactivan los microorganismos patógenos por medio de la adición de una sustancia química u otro proceso [11].

**Figura 1:** Proceso de Tratamiento de Agua Potable



Fuente: [11]

Por medio de cada uno de estos procesos se puede cumplir con los requisitos mínimos para considerar el agua como apta para el consumo humano.

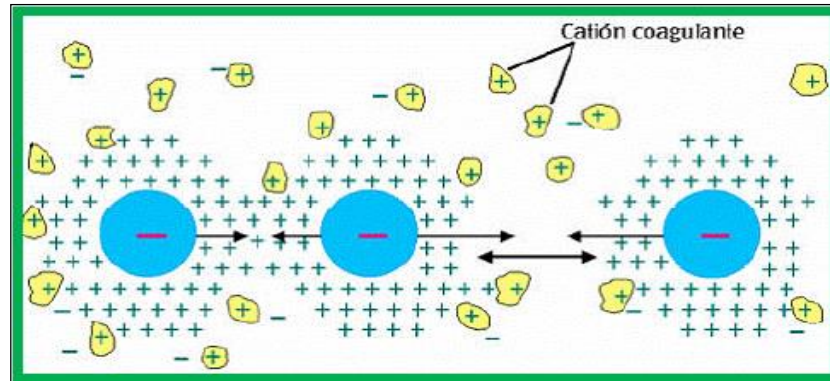
Dentro de los procesos de la PTAP, el proceso de coagulación y floculación tiene un significativo porcentaje de error en cuanto a su efectividad, puesto que varía de acuerdo con las condiciones que presenta el afluente a tratar en tiempo real, afectando el valor de dosis de coagulante que se debe aplicar para una correcta remoción de sólidos suspendidos. A continuación se explican con mayor detalle las operaciones de coagulación y floculación.

#### 4.1.2.1 Coagulación y Floculación.

La coagulación y la floculación, son considerados como dos procesos que deben ejecutarse uno seguido del otro en el orden mencionado, ya que son operaciones que actúan en el proceso de potabilización de agua con el fin de llevar a cabo la remoción de la turbiedad orgánica e inorgánica o sólidos suspendidos que no son susceptibles a sedimentarse rápidamente, así como la remoción de color verdadero y aparente, eliminación de virus, bacterias y microorganismos patógenos que presenten respuesta a estos métodos y también contribuyen con la destrucción de sustancias productoras de olor y sabor [1]. Por medio de la Coagulación se adiciona al fluido a tratar un agente coagulante que se encarga de desestabilizar las cargas de las partículas coloidales que se encuentran en solución. Los coloides (responsables de la turbidez y el color en el agua), generalmente poseen cargas eléctricas negativas y al encontrarse en presencia de partículas pequeñas que poseen su misma carga se presenta una repulsión eléctrica que evita que dichas partículas se aglomeren para formar partículas de mayor tamaño y dar lugar a su sedimentación [12]. El agente coagulante que permite la neutralización de las fuerzas que las mantienen separadas, lo cual se logra al someter al flujo a una agitación muy intensa o mezcla rápida que permita la dispersión de la totalidad del coagulante en el volumen de agua a tratar dentro del menor tiempo posible, dando

lugar a la generación de un efecto de desestabilización más efectivo y en un menor período de tiempo [1, 13].

**Figura 2:** Desestabilización de las cargas en la coagulación

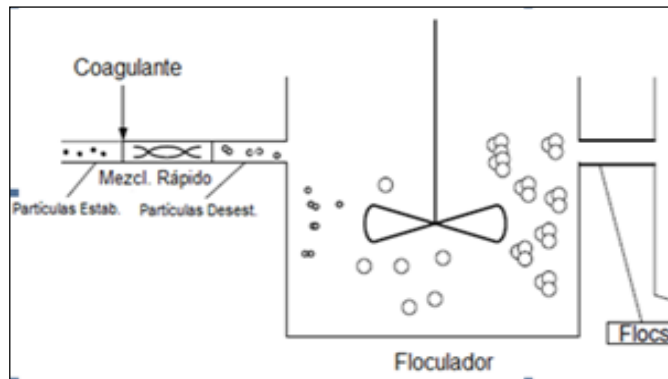


Fuente: [14]

Al quedar desestabilizada la carga de las partículas, estas se encuentran susceptibles a aglomerarse a otras que estén en suspensión en el fluido, siendo este el efecto que permite que se efectúe el aumento de su tamaño y se dé la formación de flóculos, para lo cual es necesario llevar a cabo la floculación ya que este proceso es el que permite, por medio de una agitación lenta de la masa de fluido coagulada, que las partículas minúsculas desestabilizadas al colisionar con otras logren aumentar su tamaño y aglomerarse para de esta manera conformar los flóculos que, al contar con el peso suficiente, por la acción de la gravedad se sedimentan posteriormente y pueden ser retirados del fluido que esté siendo sometido a tratamiento [4, 15].

Para que todo esto tenga lugar, es necesario someter al fluido a un proceso de mezcla lenta durante un tiempo y una velocidad estipuladas que no debe excederse (si se excede puede presentarse el rompimiento de los flóculos), que es la responsable de que se dé la formación de los flóculos. Si el tiempo es excedido se puede presentar un aumento en la eficiencia de la floculación, sin embargo puede ocasionarse una pobre sedimentación debido a la liberación de los gases disueltos en el agua que forman burbujas que hacen flotar a los flóculos al adherirse a ellos. El someter la masa de agua a una agitación con fuerzas externas es conocido como Floculación ortocinética, ocasionando una energía que produce el contacto de las macropartículas que al encontrarse desestabilizadas y colisionar pueden disminuir la repulsión eléctrica, ya que las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, y así se aglomeran [4, 9]. La figura 3 es una representación del comportamiento de las partículas en cada una de las etapas mencionadas.

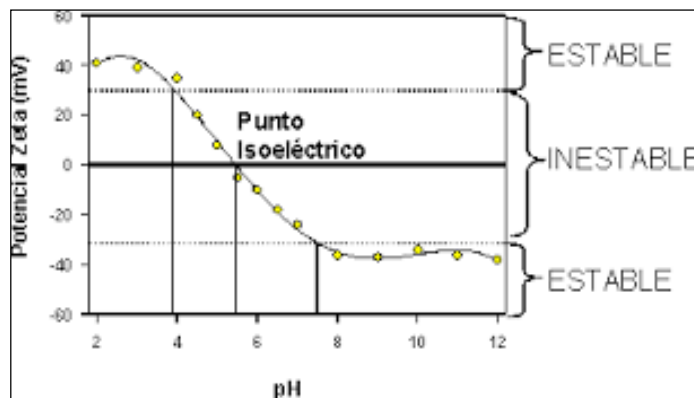
**Figura 3:** Coagulación y Floculación



Fuente: [14]

La importancia de la floculación radica en que es el proceso que complementa la eliminación de las fuerzas responsables de que las partículas se encuentren separadas y a su vez de transportarlas a través del fluido para que entren en contacto y establezcan puentes entre sí que les permitan aglomerarse. Esto es posible gracias a la reducción del potencial Z, el cual indica los cambios de potencial (producido por el colide negativo y su atmósfera cargada positivamente) en la superficie y en las fuerzas de repulsión de los coloides, es decir que mide la magnitud y fuerza de la carga de cada partícula coloidal. Este potencial posee un valor crítico o punto isoelectrico por encima del que los coloides son estables (Ver figura 4), pero los valores inferiores a él hacen que se presente una reducción en la repulsión de las partículas o disminución de la energía electrostática hasta un grado en el que al chocar con una velocidad determinada pueden unirse y producir flóculos debido a que en dicho momento son mayores las fuerzas de atracción de Van der Waals frente a las fuerzas de repulsión iónica [4, 13].

**Figura 4: Potencial Z**



Fuente: [13]

#### 4.1.2.2 Agentes coagulantes

Los coagulantes son considerados como compuestos químicos generalmente de hierro o aluminio o también como materiales naturales de origen vegetal, que son capaces de reaccionar con los componentes del agua (principalmente con la alcalinidad) para formar un precipitado voluminoso y absorbente que, en el caso de los compuestos químicos, se compone en gran parte por el hidróxido metálico del agente coagulante que este siendo usado. Este precipitado, normalmente insoluble, está conformado por pequeñas partículas que se han aglomerado debido a la acción del coagulante, las cuales se conocen como flóculos [9, 12].

Los coagulantes pueden clasificarse en tres grandes grupos: Los coagulantes metálicos, los coagulantes de origen vegetal y los polielectrolitos o ayudantes de coagulación. Los dos primeros actúan durante el proceso de coagulación, mientras que los ayudantes ejercen su efecto en la floculación, contribuyendo con la formación de flóculos más pesados [9]. También es común el uso de los coagulantes vegetales como coadyuvantes en el proceso de coagulación, dando como resultado la formación de flóculos con mejores características de sedimentación [16].

Dentro del primer grupo se encuentran ubicadas las sales de aluminio y de hierro, en el segundo se ubican los coagulantes de origen vegetal de uso más común como los almidones de papa, yuca, semillas de cactus, coco y frijol y por último se distinguen los polímeros o polielectrolitos, que son implementados como ayudantes de coagulación, razón por la que se usan en combinación con coagulantes químicos o de origen vegetal con el fin de aumentar la efectividad de la operación, además de que por el alto costo de los polielectrolitos se prefiere implementarlos en pocas cantidades [7]. Por su parte, las sales de hierro son consideradas como el agente con mayor efectividad en la formación del floc ya que los flóculos que se forman como resultado de su acción poseen un mayor peso y por ende velocidad de sedimentación más elevada, sin embargo son poco usadas debido a su costo elevado y a las exigencias de uso por el reducido rango de pH con el cual su actividad es efectiva [12]. En cuanto a las sales de aluminio, se puede mencionar que se catalogan como los coagulantes de mayor uso dado a su bajo costo, fácil preparación y manejo y adicionalmente porque son capaces de llevar a cabo una coagulación óptima en un rango de pH bastante amplio, siendo este el caso del Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_3) 18\text{H}_2\text{O}$ ) [1].

#### 4.1.2.3 Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_3) 18\text{H}_2\text{O}$ )

Conocido comúnmente como Alumbre, es considerado como el coagulante estándar con mayor uso en el tratamiento de aguas debido a que es fácil de producir y por ende posee un costo de comercialización relativamente bajo. Su rango óptimo de pH varía entre 5.5 y 8.0 unidades de pH, lo que contribuye a que en etapas

anteriores del tratamiento de agua se disminuyan las actividades necesarias para conseguir un ajuste de pH del fluido, disminuyendo al mismo tiempo los costos de operación de la planta. Las dosis de Sulfato de aluminio usada para aguas superficiales varía normalmente de 5 a 50mg/L [9, 17]. Se comercializa en diversas presentaciones como en polvo, granulado, en escamas y en solución, siendo la primera la más común [9].

Es importante tener en cuenta que la cantidad a utilizar del agente coagulante debe ser definida con anterioridad por medio de procedimientos como el Ensayo de Jarras, ya que si se adiciona una cantidad mayor a la necesaria se presentará una inversión de las cargas, que conlleva a que el coloide vuelva a tener una carga eléctrica negativa y no se consiga la remoción de la turbidez, sucediendo esto mismo si el pH del fluido se encuentra por fuera del rango óptimo del agente coagulante utilizado. Si por el contrario la cantidad de coagulante es insuficiente no se logra neutralizar las cargas totalmente y la formación de flóculos será mínima [4].

#### 4.1.2.4 Dosis óptima

La cantidad de coagulante a adicionar durante el proceso de potabilización del agua debe ser determinada con anterioridad, la cual dependerá principalmente del grado de turbidez que presente el agua a tratar. Esta dosis es considerada como el volumen indicado de coagulante a una concentración determinada con la cual se logrará conseguir la formación de flóculos con mayor compactación y velocidad de sedimentación, lo que a su vez permitirá obtener un mayor porcentaje de reducción de la turbidez [1].

Cabe adicionar que el valor de dicha dosis no es constante ya que presentará una variación de acuerdo a la naturaleza y composición del agua que este siendo tratada, razón por la cual no existe una relación matemática que permita calcular una dosis óptima de coagulante con una concentración necesaria para permitir la floculación y que tenga en cuenta todas las variables relacionadas. Por lo anterior, la manera más adecuada de conocer esta dosis es por medio de una simulación a escala de laboratorio de los procesos de coagulación y floculación, donde se pueda ensayar previamente con el agua que será sometida a tratamiento [1].

#### 4.1.2.5 Ensayo de Jarras

Consiste en un arreglo de vasos de precipitado en los que a un volumen constante de agua se agregan diferentes dosis de coagulante (que representan una concentración específica del agente coagulante) y se ejecutan las mezclas rápida y lenta por medio de un conjunto de paletas que componen el agitador múltiple, con las que se consiguen condiciones hidráulicas similares en todas las muestras [17].



A cada uno de los vasos se le agrega una dosis con una concentración de coagulante determinada, que puede variar 0.5 mg/L entre vaso y vaso, posterior a esto se agitan las muestras a una velocidad de 70 rpm durante un minuto generalmente, para simular la mezcla rápida. Pasado este tiempo, se procede a simular la mezcla lenta, donde se disminuye la velocidad a un rango de 30 rpm por un lapso de 15 minutos, luego se deja sedimentar durante un tiempo de 20 minutos [4, 9]. Es importante tener en cuenta que estas condiciones pueden presentar variaciones de acuerdo al tipo de agua y coagulante con que se esté llevando a cabo el proceso [9].

**Figura 5:** Ensayo de Jarras



Fuente: Autoría propia

Al finalizar el periodo de retención de la prueba, se mide la turbidez final presente en cada vaso y teniendo en cuenta las características de los flóculos formados se escoge como dosis óptima aquella con la cual se removió la mayor cantidad de sólidos suspendidos, la misma que generalmente presenta flóculos más compactos y con mayor tamaño y velocidad de sedimentación [17]. Cabe adicionar que previo a la realización del ensayo debe medirse la turbidez inicial con la que cuentan las muestras con el fin de conocer la concentración inicial de sólidos suspendidos y poder establecer una relación remoción al finalizar el proceso y del mismo modo debe conocerse su pH para determinar si es necesaria la realización de un ajuste de acuerdo al rango óptimo de pH del coagulante a utilizar [9].

También es posible realizar una segunda etapa del Ensayo de Jarras, donde al definir en la etapa anterior una dosis óptima, se procede a preparar varios vasos de precipitado con diferente pH, de tal forma que se logre cubrir desde los últimos valores de la escala ácida hasta los primeros de la básica (de acuerdo al rango óptimo de pH del coagulante a utilizar) a estos vasos se les agrega dicha dosis y al finalizar el ensayo deben ser analizados, para determinar el pH con el cual la dosis

aplicada muestre el menor valor de turbidez, quedando definido de esta manera el pH con el que debe contar el fluido para su tratamiento [17].

#### 4.1.2.6 Parámetros Físicoquímicos que intervienen en la Coagulación – Floculación

Dentro del tratamiento de aguas se evalúan ciertos parámetros físicoquímicos del fluido con los cuales se pueden establecer las condiciones iniciales del agua que se va a tratar así como las operaciones unitarias que se deberán realizar para obtener el nivel de calidad de agua deseado. Es importante resaltar que estos parámetros son determinantes para el proceso de coagulación y floculación, ya que estos intervienen en el nivel de efectividad del coagulante, afectando su efectividad frente a la remoción de sólidos suspendidos y a su vez la calidad del efluente. Los principales parámetros físicoquímicos determinantes para la coagulación y floculación son:

##### - pH

El pH o potencial de hidrógeno es un índice logarítmico del nivel de acidez o basicidad, es decir de la concentración de iones de  $H^+$  de una solución a cualquier temperatura en fase líquida. La escala es logarítmica con valores de 0 a 14. Un decrecimiento de una unidad en la escala logarítmica equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno. Con una disminución del pH el agua se hace más ácida y con un aumento del pH se hace más básica, el valor del pH neutro es de 7. Cada coagulante posee un rango determinado de pH dentro del cual su acción es más eficiente, razón por la cual es importante conocer el pH del agua antes de ser sometida a una coagulación, lo que permitirá saber si es necesario llevar a cabo ajustes de pH [18].

##### - Alcalinidad

La alcalinidad es un parámetro que tiende a influir en el valor del pH, razón por la cual el contenido de alcalinidad es uno de los factores a considerar dentro de la coagulación. Es la capacidad de reaccionar con los iones hidrógenos del agua, estando provocada mayoritariamente por los iones carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) y bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) e hidróxidos, existen diversas causas a las que se debe esta propiedad en el agua, contaminación por aguas industriales con presencia de bases fuertes, presencia de sales de ácidos débiles, entre otros. Se determina por medio de una titulación con ácido sulfúrico y fenolftaleína o naranja de metilo como indicadores [19].

##### - Conductividad

Medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica, dicha capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración, movilidad y valencia, de la temperatura ambiental y de la disolución. Se determina mediante electrometría con un electroconductímetro, expresando su resultado en micro siemens por  $\text{cm}^{-1}$ . Es una medida indirecta de la cantidad de sólidos disueltos, los cuales son removidos en cierta proporción por medio de la coagulación y la floculación [9].

- Color

Propiedad organoléptica o determinable por los sentidos, el color del agua resulta de la presencia en solución de diferentes sustancias como iones metálicos más frecuentes, humus y materia orgánica disuelta. La determinación del color se efectúa visualmente empleando luz diurna difusa sobre un fondo blanco, o mediante el uso de un espectrofotómetro visible. El color que presenta el agua puede ser aparente o verdadero (agua sin sólidos en suspensión) [9]. Las causas más comunes del color en el agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, el contacto del agua con residuos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc. En diferentes estados de descomposición, la presencia de taninos y ácidos húmicos en su mayoría en estado líquido. [17].

- Turbidez

La turbidez es una característica óptica o propiedad de un líquido, que en términos generales describe la claridad u opacidad del líquido. La turbidez se relaciona con la pérdida de transparencia debido a partículas en suspensión. La turbidez del agua se debe a la presencia de arenas, lodos, limo u otros precipitados químicos que generan partículas suspendidas, materia en suspensión como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica, plancton y diversos microorganismos [18].

La determinación de la turbidez es de gran importancia en aguas para el consumo humano ya que los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración. Este parámetro se mide por medio de un turbidímetro midiendo la cantidad de luz que es dispersada por las partículas suspendidas en el agua por medio de un haz de luz y un detector de luz. Las unidades de turbidez son NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) [19].

- Temperatura

La temperatura es una medida de cuán caliente o frío se encuentra una sustancia o elemento, medida en una escala definida, puede ser Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Rankine y Reaumur. La temperatura cambia el tiempo de formación del flóculo, mientras más fría se encuentre el agua más lenta será la reacción del agente coagulante y por ende el tiempo de formación del flóculo será mayor [9].

### 4.1.3 Inteligencia Artificial

La inteligencia se puede definir como el potencial intelectual, capacidad de comprender y entender algo, así bien la Inteligencia Artificial (IA) es la rama de las ciencias de la computación que estudia el software y hardware necesarios para estimular el comportamiento y comprensión humanos [20].

Desde el punto de vista de la ingeniería, propone la creación de elementos que posean un comportamiento inteligente, construir máquinas capaces de simular inteligencia, el aprendizaje, la capacidad de adaptación, la creatividad, toma de decisiones como si fueran una persona. Por otro lado la rama científica de la IA se define como el estudio del comportamiento inteligente, siendo su principal objetivo conseguir una teoría de la inteligencia que explique la conducta que se presenta en los seres inteligentes y que pueda guiar la creación de entes artificiales capaces de realizar las mismas tareas que requieran de un potencial de inteligencia [21].

Los inicios de la Inteligencia Artificial se pueden contribuir al matemático Alan Turing, puesto que realizó importantes aportes en cuanto a la computación en general, fue quien propuso un test para decidir que era un sistema de IA [21].

Existen cuatro conceptos o categorías de IA según los autores Romero y Gómez de la referencia [21]:

- Sistemas que piensan como humanos: Estos sistemas tratan de emular el comportamiento humano en cuanto al pensamiento, un ejemplo son las redes neuronales artificiales. Es la automatización de actividades en las que son necesarios procesos de pensamiento humano, como la toma de decisiones, resolución de problemas y aprendizaje [21].
- Sistemas que actúan como humanos: Estos sistemas tratan de actuar como humanos en cuanto al comportamiento, como sucede con la robótica. Son sistemas que requieren de inteligencia para realizar trabajos [21].
- Sistemas que piensan racionalmente: A través de la lógica se trata de emular el pensamiento lógico racional del humano, un ejemplo son los sistemas expertos, es el estudio de los cálculos que hacen posible percibir, razonar y actuar. Se enfoca en el estudio de las facultades mentales [21].
- Sistemas que actúan racionalmente: Tratan de emular el comportamiento humano racionalmente, tal cual lo hacen los agentes inteligentes, los cuales son

entidades capaces de percibir su entorno, procesar esas percepciones y responder de acuerdo con el entorno en el que se encuentra [21].

#### 4.1.3.1 Tipos de Inteligencia Artificial.

Dentro del campo de la inteligencia artificial se albergan cuatro principales tipos de IA, los cuales se centran en una tipología diferente de respuesta de acuerdo con lo que se quiere lograr, ya sean sistemas que emulen el pensamiento humano o el raciocinio [20].

##### 4.1.3.1.1 Agente Informático

Un agente informático es un sistema que percibe el entorno a través de sensores, son programas que razonan en cierto modo, diferenciándolos de programas comunes. Entre ellos esta tener controles autónomos, percibir su entorno, adaptación a cambios y ser capaces de alcanzar objetivos distintos [20].

Existen diferentes tipos de agentes informáticos:

- Agente racional: Este actúa con el objetivo de obtener un mejor resultado, o si hay incertidumbre, hallar el más apropiado. Estos agentes se basan en inferencias, es decir realizar una evaluación de proposiciones para tomar una decisión [20].
- Agente inteligente: Estos son capaces de percibir un ambiente, usando sensores, tales como detectores de luz, red, tableros entre otros y los activadores pueden ser una plantilla o una red. Se dice que un agente tiene percepción si puede detectar múltiples entradas en cualquier momento. Estos agentes toman decisiones de acuerdo con las entradas o señales que reciben [20].
- Agentes Estimulo – Respuesta: Son la forma más sencilla de Inteligencia Artificial. Estos agentes solo reaccionan de acuerdo a los estímulos que reciben del mundo exterior donde operan [21].

Estos tipos de agentes se ven reflejados en los cuatro tipos más característicos de Inteligencia Artificial, los cuales se explican a continuación.

##### 4.1.3.1.2 Sistemas Expertos.

Son programas de computación inteligentes que utilizan procesos de inferencia, con el fin de resolver problemas de un alto grado de dificultad. Estos sistemas emulan el conocimiento humano en un tema en concreto como si lo abordara un experto en el tema, con el fin de obtener la mejor respuesta. Estos sistemas se centran en el

dominio del problema pero sin relacionar ningún otro concepto fuera del problema a menos que esté específicamente indicado [21].

#### 4.1.3.1.3 Redes Neuronales.

Las redes neuronales se caracterizan por simular el comportamiento de una neurona biológica. Una red neuronal consiste en un conjunto de unidades elementales PE conectadas a una forma concreta. Una unidad elemental es el elemento procesador, el cual tiene varias entradas y las combina, normalmente con una suma básica. La suma de estas entradas es modificada por una función de transferencia y el valor de la salida se pasa a la salida del elemento procesador. Cada conexión neuronal artificial posee un peso numérico que limita la fuerza con la que el impulso sale de la neurona. Las redes neuronales solo reconocen dos estados, si hay impulso o no lo hay [22].

#### 4.1.3.1.4 Robótica.

Es la creación de robots o agentes físicos que puedan realizar tareas mediante la manipulación física del mundo sin que sean manejados por un operario humano. Existen diferentes tipos de robots entre los cuales están los robots manipuladores, móviles, humanoides y hardware robóticos [23].

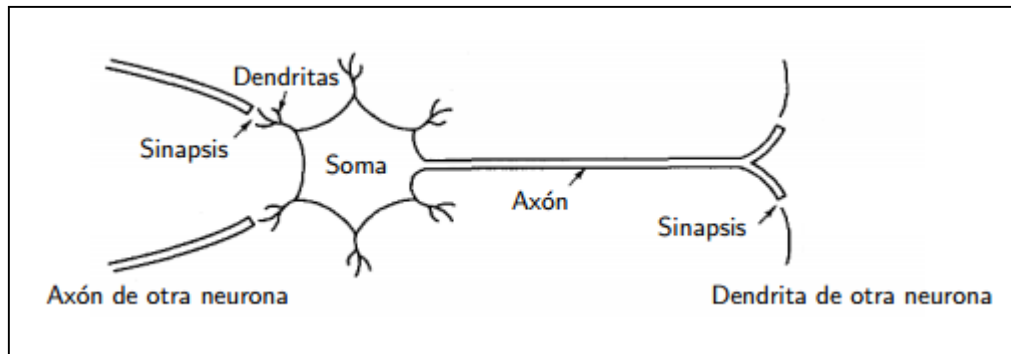
#### 4.1.3.1.5 Agentes Inteligentes.

Un agente inteligente tiene la capacidad de percibir el entorno en el que se encuentra, procesar y dar una respuesta a esas percepciones, este término se refiere a un agente software que posee algo de "inteligencia". Estos agentes tienen la capacidad de analizar condiciones en cuanto al comportamiento, el error y el nivel de éxito, aprender de una gran cantidad de datos de manera rápida y tener una capacidad de adaptación en línea y a tiempo real [23].

### 4.1.4 Redes Neuronales

Las redes neuronales son un sistema de neuronas que tienen el propósito de procesar información, en biología, las neuronas tienen una serie de ramificaciones y un cuerpo circular, llamados dendritas y axón. El axón transporta la señal de salida a otra célula y las dendritas son las que permiten que llegue información a esa neurona. Las interconexiones entre dos neuronas se llaman sinapsis, si la señal es lo suficientemente fuerte para pasar el umbral de la sinapsis, se activa esa señal hacia la otra neurona, si no es lo no se activa. La mayoría de las neuronas codifican sus salidas como una serie de breves pulsos periódicos, llamados potenciales de acción, que se originan cerca al cuerpo celular de la neurona y se propagan a través del axón. A continuación se muestra un esquema general de la estructura de una neurona y sus partes características [24].

**Figura 6:** Estructura de una neurona biológica



Fuente: [24].

El tipo más común de sinapsis es la sinapsis química, en la cual una señal neural eléctrica pre-sináptica llega al botón sináptico de la neurona, este botón se encuentra en los terminales de las dendritas, allí esta señal hace que las vesículas sinápticas se rompan liberando una sustancia llamada neurotransmisor, esta sustancia se difunde a través del espacio entre las neuronas para luego ser captada por la dendrita donde estimula la emisión de un impulso nuevo. Las dendritas son las zonas receptoras de la neurona y el axón la línea de transmisión de esa señal hacia la siguiente neurona [25].

Una neurona tiene dos comportamientos característicos [24]:

- En el soma, cuerpo de la neurona, se suman todas las señales de entrada de las dendritas, si estas entradas sobrepasan un umbral entonces se transmite un impulso a través el axón hacia otra neurona [24].
- El impulso que llega a una sinapsis y que sale de ella no son iguales, este tipo de pulso dependerá de la cantidad de sustancia neurotransmisora. Esta cantidad de neurotransmisor cambia en el proceso de aprendizaje, es aquí donde se almacena la información. La sinapsis puede debilitar o aumentar el impulso [18]. Existen diferentes tipos de herramientas computacionales que simulan este comportamiento de las redes neuronales [25].

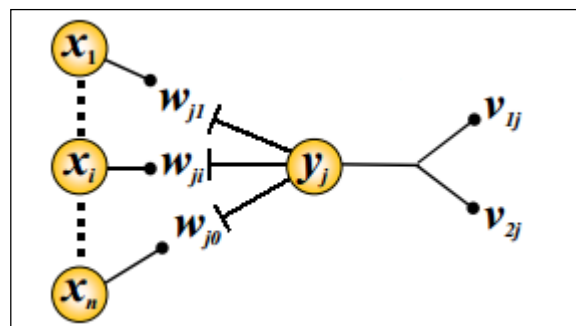
#### 4.1.4.1 Red Neuronal Artificial.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos computacionales los cuales se construyen a partir del mismo principio de comportamiento y características de una neurona biológica [25]. Estas redes están conformadas por modelos matemáticos que se basan en algoritmos de cálculo utilizando nodos interconectados y una serie de conexiones entre estas organizándose por niveles o capas [26].

La unidad de una RNA es un procesador elemental llamado neurona, la cual tiene como característica una limitada capacidad para procesar pero que en conjunto tienen mayor capacidad de procesamiento. Esta unidad elemental realiza una suma ponderada de sus entradas y luego aplica una función de activación para obtener una señal que será transmitida a la próxima neurona. Estas neuronas artificiales agrupadas por capas poseen un grado de conectividad entre ellas, este grado de conectividad se le conoce como “pesos” [26].

A continuación se muestra el esquema básico de una neurona de una RNA, en el que el nodo de interés es  $Y$ . Los nodos ( $X_1, X_i, \dots, X_n$ ) son los que envían señales de entrada, es decir los valores numéricos iniciales. Las señales de entrada en una RNA son variables continuas, cada señal de entrada pasa a través de un “peso” el cual establece el nivel de fortaleza de la conexión, de acuerdo con esto, cada señal de entrada es interpretada o procesada dentro de un nodo sumatorio, obteniendo un valor de salida el cual se pasa directamente a la salida de la red. Los valores  $W_{ji}$  representan los “pesos” de cada unión del nodo sumatorio  $Y_j$  [27].

**Figura 7:** Representación de una RNA



Fuente: [25].

El propósito de los “pesos” es multiplicar a su entrada correspondiente y definir la importancia relativa de cada entrada, valores que serán sumados e interpretados para dar una señal de respuesta por medio del nodo sumatorio [28].

La arquitectura de una red es básicamente la manera como se organizan las neuronas en el interior de la red, esto se centra en el tipo de algoritmo de aprendizaje usado para entrenar la red. Esta arquitectura depende del número de capas, se encuentran redes Monocapa y Multicapa, y también varían de acuerdo como fluye la información, Redes Feedforward y Redes Recurrentes [29].

Las Redes Monocapa están constituidas solo por un nivel o una capa de entrada o diferencia de las Redes Multicapa las cuales constan de un nivel de entrada con  $n$  neuronas y una capa de salida con  $m$  neuronas, este tipo de redes constan de tres tipos de capas, la capa de entrada, capa oculta y capa de salida [29].



La capa de entrada, es donde se presentan los datos a la red, esta capa se constituye por aquellas neuronas que introducen los datos a la red, aquí no se produce ningún tipo de procesamiento. Las capas ocultas son aquellas que cuyas entradas provienen de capas anteriores y cuyas salidas pasan a neuronas de capas posteriores, aquí se produce un procesamiento de información de acuerdo con los pesos que se les asigne a cada entrada. Las capas de salida son las neuronas cuyas salidas son el resultado de toda la red [29].

#### 4.1.4.1.1 Diseño

El diseño de una red se basa en modelar matemáticamente el problema en cuestión y formular una solución por medio de un algoritmo codificado que tenga una serie de propiedades que permitan resolver el problema. El objetivo del diseño de la RNA es conseguir que la red aprenda automáticamente las propiedades deseadas, para ello es importante establecer el tipo de modelo de red a utilizar, las variables a incorporar y el procesamiento de la información que formará el conjunto de entrenamiento [25].

#### 4.1.4.1.2 Entrenamiento

El aprendizaje consiste en entrenar la red a partir de un conjunto de datos o patrones de entrenamiento de entrada y salida. El objetivo del proceso de entrenamiento de la red es ajustar los “pesos” de la red de manera tal que la salida generada por la red sea lo más cercano a los valores reales de salida de cada entrada, es decir, la red trata de encontrar un modelo al proceso desconocido que genere la respuesta de salida [24]. Las RNA tienen la necesidad de ser previamente entrenadas, mostrándoles en su capa de entrada unos ejemplos y ella misma se ajusta en función de alguna regla de aprendizaje [24].

#### 4.1.4.1.3 Tipos de entrenamientos

Existen dos tipos de entrenamiento, supervisado y no supervisado.

- Entrenamiento supervisado: Estos algoritmos requieren que se empareje cada vector de entrada con su correspondiente vector de salida, consiste en presentar un vector de entrada a la red, calcular la salida de la red y compararla con la salida deseada. El error o diferencia resultante se utiliza como retroalimentación para la red y cambiar los pesos de acuerdo con un algoritmo que tiende a minimizar el error [20].

- Entrenamiento no supervisado: Estos sistemas de aprendizaje no requieren de un vector de salida y por lo tanto no se realizan comparaciones entre la salida obtenida y la deseada. El conjunto de vectores de entrenamiento consiste únicamente en vectores de entrada, este algoritmo de entrenamiento modifica los pesos de la red de manera que pueda producir vectores de salida consistentes [20].

#### 4.1.4.1.4 Clasificación de las RNA de acuerdo a su función

La selección de una RNA se realiza en función de las características del problema a resolver, la mayoría de estos problemas se clasifican en aplicaciones de predicción, clasificación, asociación, conceptualización, filtrado y optimización:

**Tabla 1: Clasificación de RNA**

Nombre	Diseñador	Características	Tipo
Neurona de McCulloch y Pitts	McCulloch y Pitts 1943	Primer modelo matemático de una neurona artificial	Predicción
Adaline y Madaline	Bernard Widrow 1960	Técnicas de adaptación para el reconocimiento de patrones	Predicción
Redes ART (Adaptative Resonance Theory)	Carpenter y Grossberg 1960-86	Reconocimiento de Patrones y Modelo del Sistema Neuronal.	Conceptualización
Red Hopfield	Hopfield 1982	Concepto de la red en términos de energía	Optimización
Back Propagation –	Rumelhart y Parker 1985	Algoritmo de aprendizaje hacia atrás pero sin las limitaciones de la red Perceptron	Clasificación
Contador-Propagación	Hecht-Nielsen 1987	Clasificación adaptativa de patrones	Clasificación
Red Correlación-Cascada	Fahhman y Lebiere 1990	Adición de nuevas capas ocultas en cascada	Asociación
Redes de Recirculación	Hinton y McClelland 1988	Algoritmo de aprendizaje supervisado para entrenar RNA.	Filtrado

Red Neuronal Probabilística	Spetcht 1988	Clasificación de patrones utilizando métodos estadísticos	Asociación
-----------------------------	--------------	---	------------

Fuente: [20].

#### 4.1.5 Matlab

MATLAB es un software matemático que ofrece un entorno integrado de desarrollo con un lenguaje de programación propio, en términos generales es un programa para computación numérica y visualización de datos. Este software tiene la capacidad de resolver problemas de diferentes áreas, está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones [30].

Este programa cuenta con la herramienta Neural Network Toolbox la cual proporciona funciones para el diseño, iniciación, simulación y entrenamiento de los modelos RNA de mayor uso. A través de esta herramienta es posible efectuar el diseño de arquitecturas complejas, definir funciones de transferencia, reglas de aprendizaje, funciones de entrenamiento y estimación de error, además, aporta las facilidades y prestaciones gráficas para el estudio del comportamiento de las redes: Visualización grafica de la matriz de pesos, vector de desplazamiento y representación de errores [30].

La utilización de este software para el diseño de la RNA, será una herramienta por medio de la cual se hará posible conseguir la optimización del proceso de Coagulación y Floculación, ya que permitirá obtener como resultado los valores de dosis de coagulante que removerán la mayor cantidad de solidos suspendidos presentes en el agua a tratar.

#### 4.1.6 Optimización

El proceso de optimización consiste en la determinación de los valores de cada una de las variables que intervienen en un sistema, con los cuales se obtendrán los mejores resultados posibles o un mínimo posible de la variable respuesta de un sistema determinado, es decir que de un conjunto de resultados probables, que son una respuesta adecuada frente a una situación determinada, se seleccionará como la alternativa indicada aquella con la que se consiga una gestión adecuada de los recursos que intervienen en el proceso y así mismo de la capacidad de respuesta [9].

En este caso se llevará a cabo la optimización del proceso Coagulación y Floculación, donde de un conjunto de diferentes dosis de coagulante para una misma turbidez se escogerá como dosis óptima aquella que remueva la mayor cantidad de turbidez, para lo cual se utilizará una RNA que al procesar los datos que se introducen en ella, emitirá como respuesta la dosis óptima de coagulante que cumpla con las condiciones mencionadas anteriormente, permitiendo de esta manera conseguir la gestión adecuada de los recursos que intervienen en esta situación, el cual es el propósito principal de un proceso de optimización.

## 4.2 ANTECEDENTES

El Ensayo de Jarras se cataloga como el método más utilizado para la determinación de la dosificación de coagulantes dentro del proceso de potabilización de aguas, seguido por el *Streaming Current Detector* (SCD), el cual se ha implementado como una herramienta que permite ejercer un control más efectivo sobre el cálculo de la dosis de coagulante, sin embargo el funcionamiento adecuado de este equipo se encuentra sujeto a la obtención de un punto óptimo de funcionamiento que en ocasiones es definido de manera errada [3, 31]. Lo anterior ocasionó que se iniciara la utilización de tecnologías que permitieran obtener un mayor grado de asertividad en el cálculo del volumen de coagulante a emplear, optando por la implementación de Técnicas de Inteligencia Artificial.

Estas técnicas se encargan de la creación de elementos o sistemas que buscan emular el comportamiento humano en términos de procesos computacionales, a través del uso de los modelos de RNA, Lógica Difusa, Redes Bayesianas, Aprendizaje Automático entre otras [31].

El uso de IA como alternativa de solución para diferentes problemáticas comenzó en 1943, año en el que el neurólogo Warren McCulloch y el estadístico Walter Pills publicaron el artículo "*A logical calculus of ideas imminent in nervous activity*", que se constituyó como la base para el desarrollo de la IA, en el cual se basaron los pioneros de la IA Minsky, Ronchester, McCarthy Shanon para iniciar con el desarrollo de esta rama de la informática. En 1957 se desarrolló el "perceptron" por Frank Rosentblant, el cual consistía en un sistema clasificador de patrones, pero que presentaba algunos errores para realizar ciertas tareas o cálculos, razón por la cual se desarrollaron los elemento adaptativos lineales "adaline" (adaptive lineal neuron) y "madaline" que tenían la capacidad de realizar el procesamiento de los valores de entrada y ejecutar tareas, lo que sirvió como base para el desarrollo de la estructura y funcionamiento de las RNA como se conocen actualmente [32].

El uso de las RNA para la estimación de la dosificación óptima de coagulante tuvo inicio en 1995, donde a partir de los datos de operación de la planta de potabilización de aguas de Wyon en Australia se planteó un modelo que calculaba dosificaciones de coagulante para diferentes grados de turbidez, pero que solo fue utilizado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones de los operarios de la planta al momento de enfrentarse a condiciones extremas [33]. Para el año de 1997 se aplicó en la planta de Sainte Foy en Canadá la implementación de un conjunto de cuatro RNA, cada una con un comportamiento aprendido para una estación específica del año, con el fin de minimizar la necesidad de realizar periódicamente Ensayos de Jarras para modificar la dosis de coagulante según los cambios de las características del agua en las estaciones, donde se dedujo que es importante para ciertos casos que las RNA tengan en cuenta una relación de las posibles perturbaciones que pueda ocasionar el diseño de la planta en el proceso de Coagulación-Floculación [15]. Además de utilizar RNA para calcular dosis de coagulantes también se han usado con el fin de predecir valores de turbiedad y color del agua tratada, lo cual fue desarrollado en 1999 en la planta de tratamiento de aguas en Edmonton, Alberta, Canadá [5].

En el año 2003 en Salisbury, Australia se desarrolló una investigación con el fin de establecer un método más preciso para la determinación de la dosis óptima de coagulante y la relación con los parámetros fisicoquímicos dentro de un sistema de tratamiento de potabilización de aguas, donde se realizó una correlación entre cada parámetro fisicoquímico frente a una dosis de coagulante, los cuales a su vez fueron las variables de entrada de la red neuronal, teniendo definido un rango en el que debían permanecer para lograr realizar el entrenamiento de la red [34]. Durante este mismo año se propone un Programa predictor de dosis óptima de coagulante compuesto por diferentes algoritmos basados en la lógica de las RNA, donde se encuentra caracterizado el comportamiento de distintos cuerpos de agua y al ingresar en él los valores de turbidez, color y alcalinidad medidos previamente, arroja como resultado un valor de dosificación de agente coagulante [35].

En el año 2008 se desarrolló un modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectaban la determinación de la dosis óptima de coagulante en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Bosconia ubicada en Bucaramanga-Colombia, donde se propuso un modelo de RNA que permitiera establecer un sistema de control automático capaz de predecir y aplicar las dosis óptimas de coagulante en base a las mediciones en línea de pH, Turbidez, Color y Alcalinidad por medio del uso de sensores de medición, para posteriormente activar de manera automática una bomba dosificadora cargada con la cantidad justa de coagulante a aplicar [1].

Para el año 2010 se propuso en Taiwán (República China) una reestructuración de las RNA utilizadas para la predicción de la dosis óptima de coagulante por medio del uso del factor inherente (mayor cantidad de datos de entrada en la red) y al mismo tiempo la normalización de los datos. A su vez se propuso el uso del

Coeficiente de Correlación de Pearson para la definición de las variables de entrada verdaderamente relevantes dentro del planteamiento del modelo matemático de la RNA [36].

Seguidamente, en el año 2011 se realizó un estudio sobre el efecto de la turbidez en la eficiencia del proceso de potabilización de agua en una planta de tratamiento en el Cauca, Colombia, donde se determinó que el nivel de eficiencia del proceso de coagulación y floculación está directamente relacionado con las variaciones que pueda tener la turbidez del agua que se está tratando, comprometiendo el desempeño de la filtración y la sedimentación ya que problemas en la operación, como una coagulación inadecuada, afectan el desempeño de las unidades de clarificación y los lechos filtrantes [37].

Durante el 2013 se formuló un proyecto en el cual se proponen cuatro modelos diferentes para la estimación de la dosificación de coagulante, basados en la implementación de técnicas de inteligencia computacional, dentro de los cuales se incluyen las RNA, que extrae la experiencia almacenada en los datos de operación de una planta de tratamiento para aprender su comportamiento y posteriormente ser capaz de calcular para cualquier dato un valor preciso de agente coagulante [31].

Adicionalmente, se han publicado una serie de investigaciones, relacionadas con el tema de este proyecto, que debido a sus resultados proporcionan un apoyo para establecer criterios de decisión acerca de su desarrollo. A continuación se muestra un resumen de algunos de estos estudios:

**Tabla 2: Antecedentes**

TÍTULO	AUTOR	AÑO	RESUMEN
Aplicación de un Sistema experto usando Redes Neuronales Artificiales para el control de la dosis de coagulante en una planta de tratamiento.	Zhang Hang & Dayong Luo.	2004	A través de RNA y modelos de regla, un sistema experto para determinación del rango óptimo del agente coagulante es desarrollado y utilizado en una planta de tratamiento. Los resultados de la ejecución del modelo mostraron que satisface las condiciones establecidas de calidad del agua potable, reduciendo el consumo de coagulante.
Predicción a tiempo real de dosis de coagulante en tratamiento de aguas pro	Guan-De Wu & Shang-Lien Lo.	2008	Se realizó un sistema de modelos basados en IA, RNA y Sistemas de Inferencia Difusa basado en Redes

medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) y un sistema de red difusa basado en redes adaptativas (ANFIS)			Adaptativas, como herramientas para determinar la dosis de coagulante de Policloruro de Aluminio en las aguas superficiales del Noreste de Taiwán. Se encontró que el sistema de ambos modelos fue suficiente, teniendo mejores resultados el modelo RNA en comparación con ANFIS.
Aplicaciones de la función de Base-Radial y Redes Neuronales Artificiales Generalizadas para el modelamiento de la dosis de coagulante en una Planta de Tratamiento de Agua Potable: Estudio comparativo	Salim Heddam, Abdelmalek Bermad & Noureddine Dechemi.	2011	En este estudio se desarrolló un modelo para la aproximación de los rangos de dosis de coagulante en una PTAP usando técnicas de RNA. Se realizaron dos técnicas, una RNA de Regresión Generalizada y una RNA de Función Radial-Base. Los resultados mostraron que un sistema de RNA de Regresión Generalizada tiene mejor desempeño que el otro modelo, puesto que sus resultados eran más cercanos a los datos reales.
Investigación sobre el control predictivo de la dosis de coagulante basado en Redes Neuronales.	Song Zhe-ying, Zhao Ying-Bao & Song Xue-ling	2011	Se realizó análisis de las características y factores del proceso de dosificación de coagulante y se estableció un modelo predictivo de dosis de coagulante a través de RNA. Los resultados demostraron que este modelo de redes es más efectivo que el modelo de regresión tradicional.

Fuente: [7, 8, 13, 38]

### 4.3 MARCO LEGAL

Durante el año 2007 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el fin de señalar las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, puso en marcha la Resolución 2115 del mismo año. Los rangos tenidos en cuenta para los

parámetros fisicoquímicos que debe presentar el agua potable se encuentran establecidos en el contenido de esta normativa, así como también se mencionan todas aquellas sustancia química que al encontrarse presentes en un rango superior al estipulado causarán afectaciones negativas a la salud humana [39]. En la siguiente tabla se encuentran relacionados los valores máximos aceptables para los parámetros que se han determinado como influyentes dentro del proceso de Coagulación y Floculación:

**Tabla 3: Valores máximos aceptables de los parámetros relevantes para agua potable según la Res. 2115 del 2007**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor máximo aceptable</b>
Turbidez	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT)	2
Conductividad	Microsiemens/cm	1000
Potencial de hidrógeno	Unidades de pH	6,5 – 9,0
Alcalinidad total	mg/L de CaCO <sub>3</sub>	200
Color aparente	Unidades de Platino-Cobalto (UPC)	15

Fuente: [39]

Adicionalmente, de acuerdo a lo estipulado por dicha resolución, es necesario tener en cuenta una serie de definiciones generales que se encuentran señaladas en el Decreto 1575 del 2007, por medio del cual el Ministerio establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano [40].

## **5. DESARROLLO CENTRAL**

### **5.1 METODOLOGÍA**



A continuación se presenta una descripción del desarrollo metodológico empleado durante la realización del presente trabajo de grado.

### **5.1.1 Determinación de los parámetros fisicoquímicos más representativos para el cálculo de la dosis óptima de coagulante**

Se realizó una revisión bibliográfica acerca de los parámetros fisicoquímicos del agua que pueden intervenir dentro de la coagulación y floculación, en cuanto al nivel de efectividad que se espera de este proceso y las diferentes problemáticas en cuanto a la determinación de la dosis correcta de coagulante. Esta revisión se hizo a través de diferentes bases de datos científicas tales como Science Direct, Scopus, Ambientalex, entre otros. Para la búsqueda se utilizaron palabras claves que se relacionaran con el proceso de Coagulación-Floculación en un sistema de Tratamiento de Agua Potable, determinación de las dosis de coagulante en una PTAP, métodos de optimización de los procesos de Coagulación-Floculación y Métodos computacionales para la determinación de dosis de coagulante en una PTAP.

De acuerdo con los antecedentes encontrados en los cuales se hace énfasis en monitorear los diferentes parámetros que afectan el proceso de Coagulación y Floculación, se hizo necesario determinar ciertos parámetros fisicoquímicos del agua que influyen en la eficiencia de dicho proceso.

Estos parámetros fueron seleccionados con el fin de monitorear los resultados del proceso de Coagulación y Floculación realizado por medio del Ensayo de jarras y al mismo tiempo para ser utilizados como las variables de entrada para el modelo de RNA. A continuación se describe la relevancia de cada uno de estos parámetros en dicho proceso:

- Turbidez

Este parámetro se estableció como el de mayor importancia en cuanto a la efectividad del proceso de coagulación y floculación, ya que las partículas que forman la turbidez constituyen una parte importante del nivel de contaminación presente en el agua a tratar, razón por la cual se eligió como uno de los parámetros a monitorear. La turbidez inicial se estableció como un parámetro de entrada dentro de la RNA.

- pH

Para cada coagulante existe un rango óptimo de pH, en la cual una buena floculación ocurre en un periodo de tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante [17], razón por la cual se estableció como otro de los parámetros a tener

en cuenta durante la realización de cada prueba de Jarras. El nivel de pH del agua fue medido y registrado para cada una de las pruebas realizadas asegurándose de que no se encontrara por fuera del rango óptimo de pH del coagulante utilizado.

- Alcalinidad

La alcalinidad se considera como un parámetro importante debido a que el coagulante reacciona con la alcalinidad del agua favoreciendo la reacción de desestabilización, si el agua posee un nivel de alcalinidad muy bajo la velocidad de coagulación será lenta y el pH del agua descenderá, en caso de que la alcalinidad sea excesiva será necesario de concentraciones de coagulante elevadas para lograr un descenso del pH hasta el rango óptimo de pH para coagulación [17].

- Color

El color se seleccionó debido a que suele estar relacionado con la turbidez ya que las partículas coloidales cargadas negativamente aportan color al agua y adicionalmente su remoción puede lograrse por medio de un agente coagulante conformado por una sal de ion metálico trivalente como el  $Al^{+3}$  [18, 42].

- Conductividad

La conductividad se estableció como parámetro a tener en cuenta ya que es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución presentes en el agua, en general sólidos disueltos que afectan la calidad del fluido [42].

- Temperatura

La temperatura tiende a influir en el proceso de coagulación ya que a una menor temperatura es mayor el tiempo que se necesita para que exista una floculación de las partículas suspendidas en el agua, razón por la cual se estableció como parámetro influyente, esto se determinó teniendo en cuenta el planteamiento de la autora Castrillón [9].

### **5.1.2 Evaluación de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) para diferentes escenarios mediante Ensayo de Jarras**

#### **5.1.2.1 Preparación de muestras.**

Para iniciar se procedió a preparar diferentes muestras para 16 niveles de turbidez planteados, las cuales debían presentar una turbidez inicial que variara dentro de

un rango desde los 10 NTU hasta 1000 NTU ya que este es el máximo valor de turbidez que puede medir el Medidor Multiparámetros utilizado.

**Tabla 4: Niveles de turbidez utilizados en el Ensayo de Jarras.**

<b>No. de Experimento</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
Exp.1	10
Exp. 2	28
Exp. 3	46
Exp. 4	64
Exp. 5	82
Exp. 6	100
Exp. 7	180
Exp. 8	260
Exp. 9	340
Exp. 10	420
Exp. 11	500
Exp. 12	590
Exp. 13	670
Exp. 14	760
Exp. 15	840
Exp. 16	1000

Fuente: Autoría propia

Para lograr los niveles de turbidez requeridos en cada una de las muestras, se preparó un agua base o agua sintética compuesta por agua de la llave, arena, arcilla y frutiño en proporciones determinadas, con el fin de simular la turbidez, el color y la composición orgánica con los que normalmente cuenta un agua que es sometida a potabilización. Las cantidades empleadas se describen en la Tabla 5.

**Tabla 5: Composición del agua base**

<b>Ingrediente</b>	<b>Cantidad</b>
Agua	7000 ml
Arena (0.5-1.0mm)	150 g
Arcilla (<0.004mm)	150 g
Refresco en polvo (colorante, endulzante y saborizante)	20 g

Fuente: Autoría propia

**Figura 8:** Agua Base



Fuente: Autoría propia

Para iniciar con el montaje del Ensayo de Jarras se tomaron 10 vasos de precipitado de 1000 ml a los cuales se les agregaron 500 ml de agua de la llave y a cada uno se le adicionó un volumen homogéneo del agua base que se fue variando cada 1ml hasta conseguir el valor de turbidez inicial requerido en cada uno de los 16 experimentos.

**Tabla 6: Volumen de agua base necesario para cada nivel de turbidez**

Turbidez (NTU)	Volumen de agua base (ml)	Turbidez (NTU)	Volumen de agua base (ml)

10	0.8	340	30.0
28	2.2	420	37.0
46	3.5	500	39.0
64	5.5	590	43.0
82	7.0	670	47.0
100	8.0	760	53.0
180	14.0	840	55.0
260	24.0	1000	57.0

Fuente: Autoría propia

**Figura 9:** Muestras preparadas para el Ensayo de Jarras



Fuente: Autoría propia

#### 5.1.2.2 Medición inicial de los parámetros influyentes para la Coagulación y Floculación

Al tener preparadas las muestras con el nivel de turbidez inicial deseado se procedió a registrar de manera inicial el comportamiento de cada uno de los parámetros que fueron definidos como influyentes en el proceso de la Coagulación y Floculación. La turbidez, el pH, la conductividad y la temperatura fueron monitoreadas con un

Medidor Multiparámetros HI 9829 marca HANNA, la alcalinidad fue determinada por medio de titulación y el color se midió con un Espectrofotómetro Smart marca LaMotte de operación manual. Este procedimiento se realizó para cada una de las muestras que componían los 16 experimentos (a excepción del color y la alcalinidad que se midieron en una sola muestra del grupo ya que al ser muestras homogéneas su nivel de color y alcalinidad es el mismo) y sus resultados fueron registrados y utilizados para definir la cantidad de coagulante a adicionar (como se menciona en el numeral 5.1.2.4) y la necesidad de realizar un ajuste del pH, teniendo en cuenta que el rango óptimo del Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) varía entre 5.5 a 8.0 unidades de pH [17].

**Figura 10:** Medidor Multiparámetros



Fuente: Autoría propia

De esta manera se determinó que para los experimentos del 10 hasta el 16 (equivalentes a 420 NTU - 1000 NTU) fue necesario realizar un ajuste de pH, ya que su potencial de hidrógeno inicial se encontraba por debajo del límite inferior del rango óptimo de pH para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ . Para cumplir con dicho ajuste, a cada muestra se le agregó 1ml de solución de Cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que fue preparada con anterioridad en una proporción de 5 mg de CaO en 500 ml de agua destilada.

#### 5.1.2.3 Preparación del Sulfato de Aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ .

Como coagulante se utilizó Sulfato de Aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$  o Alumbre en presentación granulada (reactivo de laboratorio marca Panreac), el cual fue aplicado en las muestras de forma líquida, razón por la que se hizo necesaria su preparación.

**Figura 11:** Sulfato de Aluminio granulado



Fuente: Autoría propia

Se pesaron 2.5 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  en la balanza analítica y se mezclaron con 500 ml de agua destilada en un balón aforado de este mismo volumen (esto es equivalente a 5000 mg/L  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  y a 400 mg/L de Aluminio), con el fin de lograr su disolución se agitó hasta obtener una mezcla homogénea. A cada muestra se le adicionó cierta cantidad de Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), la cual inició en 10 mg/L (equivalente a 1 ml de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) y finalizó en 100 mg/L, variándose la concentración aplicada de acuerdo al nivel de turbidez que estuviera siendo tratado, es decir que se aplicó una mayor concentración a las muestras con mayor turbidez inicial.

**Figura 12:** Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) preparado



Fuente: Autoría propia

#### 5.1.2.4 Ensayo de Jarras.

Al tener las muestras preparadas se procedió a iniciar la realización de un Ensayo de Jarras para cada nivel de turbidez definido anteriormente, donde se adicionó a cada vaso de precipitado una cantidad determinada de coagulante. Para los primeros siete ensayos (compuestos por seis muestras), los cuales varían desde los 10 NTU hasta los 180 NTU, se prepararon seis muestras con la misma turbidez a las que se les agregó una concentración de la Sal  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  partiendo desde 10 mg/L y con una variación de 0,5 mg/L entre muestras hasta llegar a un límite de concentración de 35 mg/L.

Al agregar a cada muestra la cantidad de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  correspondiente, se procedió a realizar la mezcla rápida a una velocidad de 70 rpm durante un minuto. Pasado el tiempo requerido para la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación hasta 30 rpm durante 15 minutos para garantizar la unión de los flóculos pequeños conformados en la coagulación, los cuales, pasado el tiempo mencionado, se dejaron sedimentar durante 20 minutos.

**Figura 13:** Ensayo de Jarras para 6 muestras





Fuente: Autoría propia

Para los nueve experimentos restantes, con turbiedades iniciales desde 260 NTU hasta 1000 NTU, se realizaron montajes de 10 muestras por cada nivel de turbidez, a los cuales se les aumentó el rango del volumen de coagulante agregado, debido a que el aplicado para las muestras anteriores no mostró resultados adecuados en cuanto a disminución de turbidez. Cabe adicionar que las dosis de coagulante se fueron aumentando en estos nueve experimentos a partir de la dosis que mostró resultados en la prueba inmediatamente anterior, es decir, desde la concentración que disminuyó significativamente el nivel de turbidez. La concentración de coagulante implementada para los últimos nueve experimentos se definieron como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7: Dosis de coagulante para los últimos nueve ensayos**

<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Concentración de la sal <math>Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O</math></b>	<b>Concentración de Aluminio (Al)</b>
260	(10, 15, 20, 25, 30, 35, 40,45, 50 y 55) mg/L	(0.8, 1.2, 1.6, 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4 y 4.4 ) mg Al/L
340	(10, 15, 20, 25, 30, 35, 40,45, 50 y 55) mg/L	(0.8, 1.2, 1.6, 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4 y 4.4 ) mg Al/L

420	(35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 y 80) mg/L	(2.8, 3.2, 3.6, 4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6 y 6.4) mg Al/L
500	(35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 y 80) mg/L	(2.8, 3.2, 3.6, 4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6 y 6.4) mg Al/L
590	(35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 y 80) mg/L	(2.8, 3.2, 3.6, 4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6 y 6.4) mg Al/L
670	(40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85) mg/L	(3.2, 3.6, 4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4 y 6.8) mg Al/L
760	(50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 y 95) mg/L	(4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4, 6.8, 7.2 y 7.6) mg Al/L
840	(55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 y 100) mg/L	(4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4, 6.8, 7.2, 7.6 y 8) mg Al/L
1000	(55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 y 100) mg/L	(4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4, 6.8, 7.2, 7.6 y 8) mg Al/L

Fuente: Autoría propia

Las condiciones de velocidad y tiempo de las mezclas rápida y lenta para estos nueve experimentos fueron exactamente las mismas que se utilizaron en los siete experimentos anteriores, incluyendo el tiempo estipulado para la sedimentación.

Al terminar el Ensayo de Jarras a cada una de las muestras se les monitorearon nuevamente algunos de los parámetros relevantes para la coagulación y floculación como el pH, la conductividad, la turbidez, la temperatura y el color con el fin de determinar la dosis de coagulante que dio como resultado el mayor porcentaje de remoción de turbidez, es decir, aquella concentración de alumbre que mostró el nivel más bajo de turbidez en alguna muestra de cada uno de los 16 experimentos.

**Figura 14:** Flóculos sedimentados



Fuente: Autoría propia

#### 5.1.2.5 Determinación de la dosis de coagulante óptima a partir de los valores de turbidez final.

De cada uno de los experimentos realizados anteriormente se escogió como dosis óptima en esta primera etapa, aquella concentración de alumbre que dio como resultado el nivel de turbidez más bajo con respecto a la turbidez inicial, teniendo así esta concentración de coagulante como punto medio para realizar el afine de la dosis. Para obtener el afine se aplicó a la jarra número cinco una dosis exactamente igual a la dosis óptima inicial, a las cuatro jarras anteriores a esta se les adicionó una dosis menor disminuyéndole 0.1 ml por jarra y a las cinco últimas jarras se les aumentó la dosis en 0.1 ml por jarra (Ver Anexo A). Este procedimiento se desarrolló con el fin de conseguir la optimización de la dosis de coagulante, que en esta etapa dependió únicamente de la turbidez final.

Al realizar el primer afine, se identificó que los niveles de turbidez arrojados en el primer ensayo para la dosis escogida como óptima presentaban cierta diferencia respecto a la turbidez final obtenida en el primer ensayo de jarras, razón por la que se decidió realizar por triplicado el ensayo de jarras para el afine, manteniendo las mismas condiciones en las tres replicas.

La realización por triplicado de los ensayos dio como resultado en todos los test de jarras una misma concentración de coagulante como dosis óptima, es decir que en cada uno de los experimentos la misma concentración de coagulante fue la que logró reducir la mayor cantidad de turbidez y adicionalmente mostró niveles de turbidez muy similares entre las réplicas (Ver Anexo B).

De esta manera se definió como nueva dosis óptima aquella que mostró la turbidez final más baja. Esta dosis disminuyó o aumentó en pequeñas proporciones de volumen con respecto a la dosis de referencia para el afine, pero el nivel de turbidez fue menor que el obtenido en el primer ensayo, en la mayoría de los casos. Al haber definido una nueva dosis óptima, se procedió a realizar un nuevo Ensayo de Jarras para cada nivel de turbidez y dosis óptima, con el fin de conocer el pH con el cual el coagulante mostraría mejores resultados.

#### 5.1.2.6 Definición del pH óptimo para la mejor dosis de coagulante.

Para definir el valor de pH con el cual la acción del coagulante sería más efectiva, se procedió a realizar un ajuste de este parámetro de acuerdo al rango óptimo de pH del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , que, como ya se mencionó anteriormente, varía entre 5.5 y 8.0 [17]. De este modo se prepararon seis jarras con un pH dentro de este rango, iniciando en 5.5 y terminando en 8.0, con un aumento de 0.5 unidades entre cada jarra (valores de pH en las jarras 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 y 8.0). Este ajuste de pH se realizó aplicando Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 0.02N e Hidróxido de Sódio ( $\text{NaOH}$ ) 0.02N.

**Figura 15:** Ácido Sulfúrico e Hidróxido de Sódio al 0.02N.



Fuente: Autoría propia

Teniendo ajustado el pH, se procedió a aplicar en las jarras la concentración de coagulante contenida en un volumen que se consideró como la dosis óptima de acuerdo al afine realizado anteriormente, con el fin de llevar a cabo la optimización del pH. Este Ensayo de Jarras se realizó bajo las mismas condiciones de operación que los ensayos anteriores y al finalizar el tiempo requerido para la sedimentación se procedió a medir turbidez, conductividad, pH y temperatura nuevamente, para

conocer el pH óptimo y el comportamiento de las variables restantes. Cabe resaltar que estas pruebas también fueron realizadas por triplicado para determinar de una manera más acertada el pH óptimo (Ver Anexo C).

### **5.1.3 Determinación de la dosis óptima para diferentes escenarios de turbidez inicial a través de la RNA teniendo en cuenta los parámetros de entrada establecidos**

#### 5.1.3.1 Relación de los parámetros seleccionados con la dosis de coagulante.

Con los resultados obtenidos de las mediciones de cada uno de los parámetros seleccionados se realizó una matriz de correlación entre la dosis de coagulante contra cada parámetro fisicoquímico establecido en la metodología, por medio de la que se estableció cuales parámetros tienen mayor influencia con respecto a la dosis de coagulante. Se realizó un gráfico (Ver figura 23), por medio de MatLab, en el cual se relacionaron todas las variables y se observó cuales tienen mayor correlación entre ellas y en especial con el comportamiento de la dosis de coagulante.

#### 5.1.3.2 Organización de los datos de entrada establecidos.

Los datos obtenidos en cada una de las pruebas de laboratorio realizadas se organizaron por medio del software MatLab a través de un código elaborado en este trabajo, el cual se realizó con el fin de procesar la información de los parámetros obtenidos en el desarrollo de cada procedimiento de la prueba de jarras.

Con los datos obtenidos de la primera prueba, se procedió a realizar un gráfico de la relación entre la turbidez inicial y el mínimo valor de turbidez final resultante para cada uno de los experimentos. También se realizó un gráfico del valor de dosis óptima para cada nivel de turbidez inicial establecido.

Para los valores obtenidos de los triplicados tanto de la turbidez como de la variación del pH de cada Ensayo de jarras se elaboró otro código para introducir y procesar los datos dentro de MatLab. Se utilizó la función *xlsread* que permitió leer dentro de MatLab los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, se creó una matriz de ceros en la cual posteriormente se introdujeron los valores de turbidez final y dosis óptima, valores que fueron establecidos por medio del código.

**Figura 16.** Función *xlsread* para la lectura de datos

```
%% Codigo determinacion dosis optima de coagulante con los triplicados de
%% Turbidez
[ NUMERIC, TXT, RAW ] = xlsread ( 'triplicados_turbidez.xlsx' );
Turbidez_inicial = NUMERIC (:, 1);
valor_unico_Ti = unique (Turbidez_inicial);
numero_exp = length (valor_unico_Ti);
Turb_final_total = zeros (numero_exp, 1); % hizo una matriz de ceros de la turbidez
```

Fuente: Autoría propia

Para obtener el valor de turbidez final y dosis óptima de coagulante para cada nivel de turbidez inicial fue necesario usar la función *for*, la cual permite realizar repeticiones de las operaciones que estén descritas dentro de esa función las veces que sean necesarias, en este caso se ejecutaron 16 repeticiones ya que ese fue el número total de experimentos realizados (16 niveles de turbidez inicial diferentes). Dentro de la función *for* inicialmente se creó una matriz de unos (1) con una dimensión de diez por cinco (10 muestras x 5 mediciones) en la que posteriormente se introdujeron los valores de la turbidez inicial, rango de dosis de coagulante y los valores de los triplicados de turbidez.

Con la matriz mencionada anteriormente se determinó el valor de la dosis óptima de coagulante. Para hallar este valor se realizó una búsqueda del valor mínimo de turbidez final por medio de la función *min* la cual seleccionó el mínimo valor de turbidez final de cada réplica. Debido a que el valor mínimo de turbidez final para cada repetición se obtuvo con la misma dosis de coagulante se estableció esta concentración como la dosis óptima de coagulante para ese experimento.

**Figura 17.** Matriz de ceros y función *min*

```

%%Matriz de ceros con una dimension de (10x5)
matriz_total=ones(length(Dosis_coag),5); % Dimensiona una matriz de ceros del tamaño de el numero de experimentos x 5
matriz_total=[matriz_total(1)*turb_ini_posicion,matriz_total(2)*Dosis_coag,...
matriz_total(3)*Turbidez_f1,matriz_total(4)*Turbidez_f2,...
matriz_total(5)*Turbidez_f3]; %ubica dentro de la matriz los valores en cada columna

%%busco el valor minimo de dosis minima tomando como referencia la posicion del valor minimo de turbidez

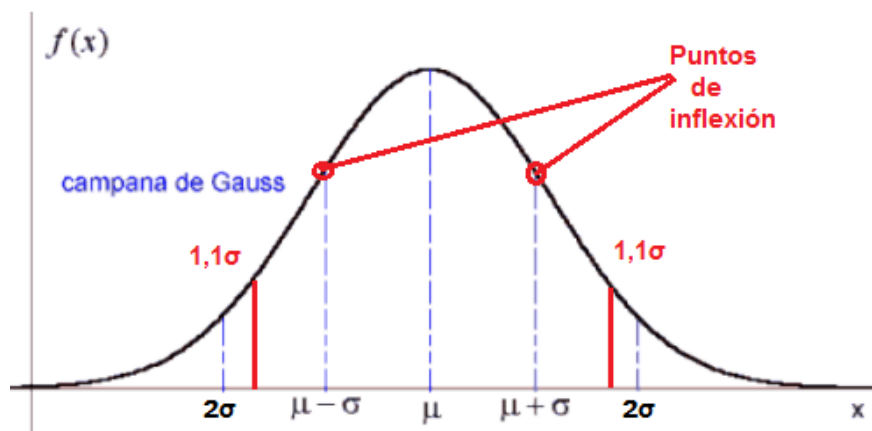
posicion_minima=find(matriz_total(:,3)==min(matriz_total(:,3)))
Dosis_op_final=Dosis_coag(posicion_minima); %hallo la dosis optima para cada nivel de turbidez
Desviacion=std(matriz_total(posicion_minima,[3,4,5])); % saque la desv de los 3 valores min de turbidez
Media=mean(matriz_total(posicion_minima,[3,4,5])); %saque la media de los 3 valores minimos de turbidez

```

Fuente: Autoría propia

Debido a que se tenían tres valores mínimos de turbidez final, uno por cada repetición, se hizo necesario determinar un solo valor mínimo de turbidez final por cada experimento por medio de una condición lógica, con el fin de eliminar datos atípicos existentes. Esta condición se creó teniendo en cuenta las características de una distribución Gaussiana, donde la distribución de los datos es simétrica respecto a la media del conjunto de datos, esta distribución normal tiende a ser asintótica y su mediana y moda son iguales a la media, permitiendo observar un comportamiento Gaussiano como el que se muestra en la figura 18.

**Figura 18.** Distribución normal de Gauss



Fuente: [43]

Esta distribución se caracteriza por dos parámetros, la media ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) y sus puntos de inflexión, los cuales son la suma y la diferencia entre la media y desviación estándar, el rango de un punto de inflexión a otro se establece

como el conjunto de valores que se consideran normales. Tomando como referente las características de una distribución Gaussiana se estableció la siguiente condición lógica:

$$\text{Si } |X_i - \bar{X}| > 1.1 * \sigma \text{ entonces } X_i = \text{NaN}$$

Si no, entonces  $X_i = X_i$

En esta se establecen los valores que son aceptables a partir del resultado de la diferencia entre el valor mínimo de turbidez ( $X_i$ ) y la media de los tres valores de turbidez ( $\bar{X}$ ), esta diferencia debe ser menor al resultado de la multiplicación de la desviación estándar de los tres valores de turbidez ( $\sigma$ ) por 1.1. Se estableció el valor de 1.1 dentro de la condición ya que permitió definir un rango con el cual no se descartaran todos los datos que serían evaluados y a su vez no se aceptarían valores muy lejanos a la media (datos no representativos). Si esta condición se cumple, el valor que se está evaluando ( $X_i$ ) es aceptado, de lo contrario el valor es rechazado y sustituido por un valor no numérico (NaN).

Para descartar valores atípicos, primero fue creada una matriz compuesta por los tres valores mínimos de turbidez final para cada experimento, la cual se evaluó posteriormente con la función *if* que programar la condición lógica mencionada. Finalmente con los valores de turbidez mínima aptos se calculó un promedio con el propósito de obtener un solo valor de turbidez final óptima y un valor de dosis de coagulante óptimo para cada experimento.

**Figura 19.** Función *if* para el valor óptimo de turbidez final

```
matriz_evaluacion=matriz_total(posicion_minima,[3,4,5]); % crea una matriz con los tres valores min de turbidez
for j=1:length(matriz_evaluacion) % creo otro for para eliminar los valores de turbidez q no cumplen con la condicion Gaussiana
    if abs(matriz_evaluacion(j)-Media)> 1.1*Desviacion; %condicional con el que eliminamos los valores atipicos
        matriz_evaluacion(j)=NaN; %pone un NaN en la posicion donde no cumple la condicion

    end
end

Dosis_optima(i)=Dosis_op_final(1);
Dosis_optima=Dosis_optima';
Turbiedad_fin_media=nanmean(matriz_evaluacion); %calculo la media de los valores de turbidez aptos
Turb_final_total(i)=Turbiedad_fin_media;
```

Fuente: Autoría propia

Con cada valor de turbidez final y dosis de coagulante óptima resultantes se realizó el gráfico correspondiente con el cual se analizaron los resultados obtenidos, para determinar qué clase de comportamiento se presentaba, ya fuese lineal o



polinomial, para lo cual se realizaron una regresión lineal y una regresión polinomial posteriormente.

#### 5.1.3.3 Regresión lineal de turbidez inicial y dosis óptima.

Con el fin de observar el comportamiento de la turbidez inicial en función a las diferentes dosis de coagulante aplicadas se realizó una regresión lineal que permitiera determinar la existencia de una relación lineal entre las variables mencionadas. Esta regresión se llevó a cabo haciendo uso de la siguiente expresión matemática:

$$Y_i = B_0 + B_1 X_1$$

Siendo  $Y_i$  la variable dependiente, el parámetro  $B_0$  y  $B_1$  coeficientes que definen el intercepto e inclinación de la recta, además permiten ver la influencia de las variables explicativas ( $X_1, X_2 \dots X_n$ ) sobre la dependiente. En términos generales el coeficiente  $B_0$  es el punto de corte de la recta de los valores estimados con los valores calculados y el coeficiente  $B_1$  representa la pendiente de la recta.

La regresión lineal se llevó a cabo con los valores de dosis de coagulante aplicada y los niveles de turbidez inicial con los que contaba cada jarra, haciendo uso de la función *regress* en MatLab, con la cual se obtuvieron los valores de la pendiente  $B_1$  y el punto de corte  $B_0$ . Con estos valores se calculó la relación entre la dosis óptima de coagulante aplicada ( $Y_i$ ) y la turbidez inicial ( $X_1$ ). De acuerdo con el cálculo de la regresión se obtuvo la línea de tendencia de la dosis óptima de coagulante para cada nivel de turbidez inicial. Con los resultados obtenidos se realizó el gráfico correspondiente (Ver numeral 6.4).

#### 5.1.3.4 Regresión polinomial de turbidez inicial y dosis óptima.

Se realizó una regresión polinomial de segundo orden a los valores de la dosis de coagulante en relación con cada nivel de turbidez inicial con el fin de determinar si el comportamiento de los valores de la dosis óptima de coagulante tiende a ser más polinomiales que lineales. La regresión polinomial está diseñada para construir un modelo estadístico que describa la relación de una variable independiente  $X$  con una variable dependiente  $Y$ , cuando la relación entre las variables dependientes e independientes es no lineal. Las regresiones polinomiales se pueden ajustar a la

variable independiente con varios términos, partiendo de la siguiente ecuación general:

$$Y = a + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n + e \quad [44]$$

Donde  $a$  son los coeficientes y  $e$  es el error. Fue necesario realizar esta regresión polinomial de segundo orden ya que aunque muchos datos exhiben un patrón marcado, son pobremente representados por una línea recta por lo que una curva podría tender a ajustarse de una manera más adecuada a los datos.

#### 5.1.3.5 Estimación del Error Cuadrático Medio (ECM).

Para la regresión lineal y la regresión polinomial realizadas se calculó el Error Cuadrático Medio (ECM), con el objetivo de observar que tan significativo fue la diferencia entre los resultados reales y los simulados. Para obtener el ECM se utilizó la siguiente ecuación:

$$ECM = \sqrt{\sum_1^n (Xi - \bar{Xi})^2} \quad [44]$$

Siendo la raíz de la suma del cuadrado de las diferencias entre los valores estimados y los simulados. Esta fórmula permitió estimar el promedio de errores al cuadrado, es decir la diferencia entre lo simulado (línea de tendencia) y lo estimado (valores de dosis óptima). Los errores resultantes para ambas regresiones fueron graficados posteriormente (Ver figuras 29 y 31).

#### 5.1.3.6 Código para determinación del pH óptimo

Se llevó a cabo la programación de un código para la determinación del pH óptimo de acuerdo con los resultados obtenidos en los Ensayos de jarras a los que se les realizó la variación de pH. Fue necesario utilizar la función *for* de Matlab, en la cual se introdujeron las condiciones para establecer los valores de pH con los que se obtuvo la menor turbidez final. Para determinar esto fue necesario crear una matriz de 6 parámetros x 6 muestras, compuesta por los valores de turbidez inicial, dosis de coagulante, turbidez final y el pH para cada jarra, de la que posteriormente se seleccionó el nivel de pH con el que se obtuvo la menor turbidez final en cada muestra, esto se puede observar en la figura 20.

**Figura 20.** Matriz de los valores de Ensayos de jarras con variación de pH.

```
[[NUMERIC, TXT, RAW]=xlsread ('triplicados_pH.xlsx');
Turbidez_Inicial=NUMERIC(:,1);
Valor_unico_Ti=unique(Turbidez_Inicial);
Experimento=length(Valor_unico_Ti);
Turbiedad_final_exp=zeros(Experimento,1); %Matriz de ceros para llenar con la cantidad de datos
pH_optimo=zeros(Experimento,1);

for i=1:Experimento %Empiezo a generar la matriz con los datos de interes
    posicion_exp=Turbidez_Inicial==Valor_unico_Ti(i); %Para saber la posicion de la Turbidez inicial
    turb_inicial_p1=NUMERIC(posicion_exp,1);
    Dosis_coagulante=NUMERIC(posicion_exp,2);
    pH=NUMERIC(posicion_exp,3);
    Turbidez_f1=NUMERIC(posicion_exp,4);
    Turbidez_f2=NUMERIC(posicion_exp,5);
    Turbidez_f3=NUMERIC(posicion_exp,6);

    matriz_total=ones(length(pH),6); %doy dimension a la matriz
    matriz_total=[matriz_total(1)*turb_inicial_p1,matriz_total(2)*Dosis_coagulante,...
        matriz_total(3)*pH,matriz_total(4)*Turbidez_f1,...
        matriz_total(5)*Turbidez_f2,matriz_total(6)*Turbidez_f3]; %para ubicar los valores dentro de la matriz en la posicion correspondiente
```

Fuente: Autoría propia

Por medio de la función *find* se determinaron los valores mínimos de turbidez final para cada repetición, los cuales se introdujeron dentro de una matriz nueva que únicamente contenía el valor mínimo de turbidez final para cada repetición, es decir, tres valores en total por cada experimento. En esta matriz se usó nuevamente la función *find* con la que se ubicó el menor de los tres niveles de turbidez final, para de este modo, teniendo definida la ubicación del menor valor de turbidez final, determinar el pH con el que se obtuvo dicha turbidez.

### 5.1.3.7 Creación de la Red Neuronal Artificial.

Para la realización de la RNA se programó un código para la creación de una red multicapas que contenía tres capas (Red de Calibración, Red de Validación y Red de Evaluación). La primera red fue la de Red de Calibración o Entrenamiento, en la que se asignaron los vectores de entrada para entrenar la red, los cuales fueron los diferentes niveles de turbidez inicial y las concentraciones de dosis óptima que se obtuvieron en los Ensayos de Jarras. También se introdujeron los valores de dosis óptima calculada por medio de la regresión lineal, ya que con la regresión la red tendría una guía de la manera en que se tiende a comportar la dosis de coagulante frente a cada nivel de turbidez. Por medio de la función *Switch*, la cual tiene el objetivo de realizar iteraciones para cada caso que se le asigne y escoger aquel que tenga mejor resultado, se definieron las diferentes dosis óptimas de coagulante. Para la Red de Entrenamiento se asignaron tres casos, en cada caso se estableció un tipo de red y una velocidad de propagación de los valores. Para el primer caso se asignó una red con una velocidad de propagación de 40, por medio de la función

*newrb* se diseñó una red con base radial. Para el segundo caso se estableció el mismo tipo de red que para el caso uno, pero con la diferencia de que se le asignó un número de iteraciones que debía realizar la red a una velocidad de propagación de 40, para el caso tres se asignó la función *newgrnn* con una velocidad de propagación de 0.5. La velocidad de propagación representa la velocidad con la que son transferidos los datos de una capa de la red a otra (entre menor sea más rápido son transferidos los datos).

**Figura 21.** Red de entrenamiento para la RNA

```
switch 1 % la funcion switch permite hacer iteraciones de los casos (cases) que le asigne
case 1 %primer caso, con una velocidad de propagacion de 40

Entrenamiento= xn_entrenamiento;
Prueba= dn_entrenamiento;
Propagacion= 40;
red= newrb(Entrenamiento,Prueba,Propagacion); %funcion newrb, diseña la red con una base radial

case 2 % se le asigno propagacion con una velocidad de 40 y 25 iteraciones

Entrenamiento = xn_entrenamiento;
Prueba = dn_entrenamiento;
objetivo = 1e-12;
propagacion = 40;
MN = size(xn_entrenamiento,2);
DF = 25;
red = newrb(Entrenamiento,Prueba,objetivo,propagacion,MN,DF);

case 3 %diferente red, propagacion de 0,5

Entrenamiento = xn_entrenamiento;
Prueba = dn_entrenamiento;
propagacion = 0.5;
red = newgrnn(Entrenamiento,Prueba,propagacion); %newgrnn diseña una regresion de una red neuronal
```

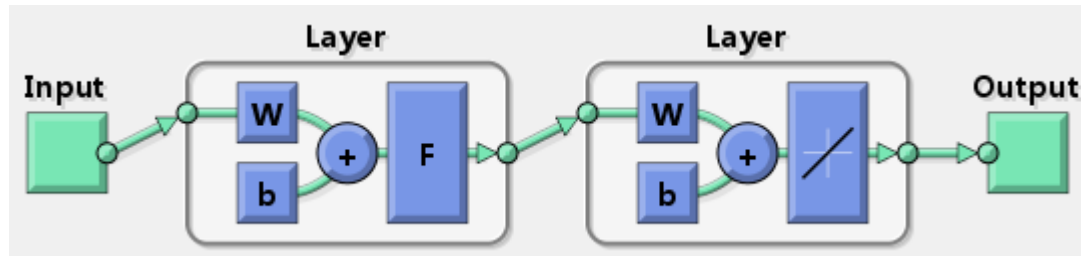
Fuente: Autoría propia

Se calculó el ECM para cada caso entre lo simulado, es decir, los valores que arrojó la red de entrenamiento, y los valores de prueba, los cuales fueron los obtenidos con la regresión lineal y sus resultados fueron graficados.

Para la segunda red, es decir, la Red de Validación se asignaron nuevamente tres casos pero los vectores de entrada de la red fueron los mismos tanto para el entrenamiento como para la prueba de esta red, introduciendo los valores de turbidez inicial y dosis óptima obtenidos con los Ensayos de jarras. Al igual que con la Red de Entrenamiento, se establecieron tres casos con las mismas condiciones y también se calculó el ECM para cada caso.

A la tercera red, la Red de Evaluación, se le asignaron como vectores de entrada valores de turbidez inicial aleatorios en un rango de 10 a 1000 NTU con su respectivo valor de dosis de coagulante y al igual que en las anteriores dos redes se establecieron tres casos con el fin de que la red escogiera el caso que tuviese mejor desempeño, es decir aquel que tuvo un menor ECM. Por último se graficaron los resultados de cada una de las tres redes (ver figura 36).

**Figura 22:** Arquitectura de la RNA realizada.



Fuente: Autoría propia

En la figura 22 se observa el esquema general de la arquitectura de la RNA creada, que consta de una entrada en donde se introducen los datos a la red (Turbidez inicial y dosis óptima obtenidas en los Ensayos) a los cuales se les asigna un peso dependiendo del nivel de importancia de cada dato de entrada (el mismo peso para ambos parámetros), dentro de esta capa se encuentra una función de propagación la cual realiza una sumatoria de cada dato multiplicando el peso con su entrada correspondiente, estos valores pasan a la capa oculta dentro de la cual se encuentra una función de activación, dependiendo del tipo de función que adopten los datos esta capa realizará un aprendizaje del comportamiento que tienen esos valores ingresados, a partir de lo anterior la RNA por medio de una función de transferencia realiza una interpretación de los datos a partir del aprendizaje ya obtenido con el fin de generar una función (lineal en este caso) a partir de la cual calcula una única respuesta esperada.

#### **5.1.4 Comprobación de la efectividad de los datos arrojados por las regresiones y la RNA implementada**

##### **5.1.4.1 Comprobación de la efectividad de las Regresiones Lineal y Polinomial**

La efectividad de la dosis óptima de coagulante arrojada por ambas regresiones se comprobó con la realización de un nuevo Ensayo de Jarras para cinco niveles de turbidez inicial diferentes, los cuales fueron definidos agregando una cantidad aleatoria de agua base en cada muestra que permitiera experimentar con

turbiedades iniciales diferentes a las manejadas en los ensayos anteriores. Estos ensayos se realizaron con cuatro jarras preparadas con la misma turbidez inicial pero con concentraciones distintas de coagulante que se definieron teniendo en cuenta las dosis calculadas con las ecuaciones de ambas regresiones y el ECM correspondiente. Para obtener una dosis de coagulante predicha por cada una de las ecuaciones de las regresiones se midió la turbidez inicial al haber agregado el agua base, esta turbidez fue reemplazada en la ecuación y el resultado fue la concentración de coagulante a agregar en las jarras con un ajuste de acuerdo al ECM como se define en la tabla 8.

**Tabla 8: Dosis de coagulante para comprobación de las Regresiones Lineal y Polinomial.**

No. de jarra	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ en mg/L
Jarra 1	Dosis regresión + ECM
Jarra 2	Dosis regresión + 1/2 ECM
Jarra 3	Dosis regresión
Jarra 4	Dosis regresión – ECM ½

Fuente: Autoría propia

Las turbiedades iniciales junto al volumen de agua base que se manejaron para los cinco experimentos realizados para la comprobación de la efectividad de ambas regresiones se definen a continuación:

**Tabla 9: Turbiedades iniciales para la comprobación de las regresiones**

Turbidez Inicial (NTU)	Agua base (ml)
15	4
90	15
150	25
500	60
950	105

Fuente: Autoría propia

#### 5.1.4.2 Comprobación de la efectividad de la RNA.

La comprobación del funcionamiento adecuado de la RNA se realizó por medio del montaje de cinco Ensayos de Jarras que contaron con cuatro muestras con las mismas turbiedades iniciales utilizadas para la comprobación de la efectividad de las regresiones. Estos ensayos fueron ejecutados en condiciones exactamente iguales a las proporcionadas a la RNA.

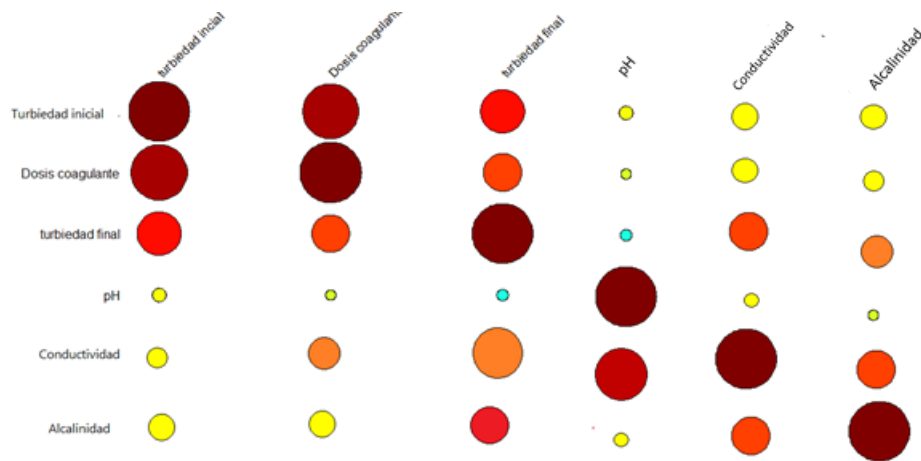
A cada muestra preparada se le aplicó el valor de dosis de coagulante que la RNA calculaba para el nivel de turbidez inicial de cada muestra para iniciar los ensayos, donde una vez finalizado, se tomaron nuevamente los datos respectivos a la turbidez, pH, conductividad y temperatura para comprobar que los resultados obtenidos fueran los mismos que proporcionó la RNA en cuanto a la turbidez. Este procedimiento a su vez permitió corroborar que el entrenamiento, calibración y simulación de la RNA se realizó de manera indicada, ya que el ECM obtenido fue de 0 mg/L, el cual es posible debido a que la red asimila únicamente los patrones de comportamiento que se acercan a la realidad y omite los errores que puedan presentarse, razón por la que se disminuye el ECM que pueda resultar con otros modelos como las regresiones lineales y polinomiales.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS CON LA DOSIS DE COAGULANTE.

A continuación se presenta una matriz de las correlaciones existentes entre los diferentes parámetros que se monitorearon en los Ensayos de Jarras, la cual se calculó con el fin de determinar si se utilizarían como variables de entrada para la RNA.

**Figura 23.** Matriz de correlaciones de la dosis de coagulante con cada parámetro



	turbiedad inicial	dosis coagulante	turbidez final	pH	Conductividad	Alcalinidad
turbiedad inicial	1	0,91	0,72	0,22	0,25	0,37
dosis coagulante	0,91	1	0,62	0,17	0,45	0,34
turbidez final	0,72	0,62	1	-0,19	0,65	0,52
pH	0,22	0,37	-0,19	1	0,1	0,06
Conductividad	0,25	0,45	0,65	0,1	1	0,68
Alcalinidad	0,37	0,34	0,52	0,06	0,68	1

Fuente: Autoría propia

En la figura 23 se observan las correlaciones existentes entre la turbidez inicial y final, la dosis de coagulante, el pH, la conductividad y la alcalinidad. El tamaño del círculo hace referencia al grado de correlación existente entre las dos variables, mientras mayor tamaño y su color sea más oscuro el valor del coeficiente de correlación lineal de Pearson se encuentra más cercano a uno y por ende las variables presentan una relación lineal fuerte.

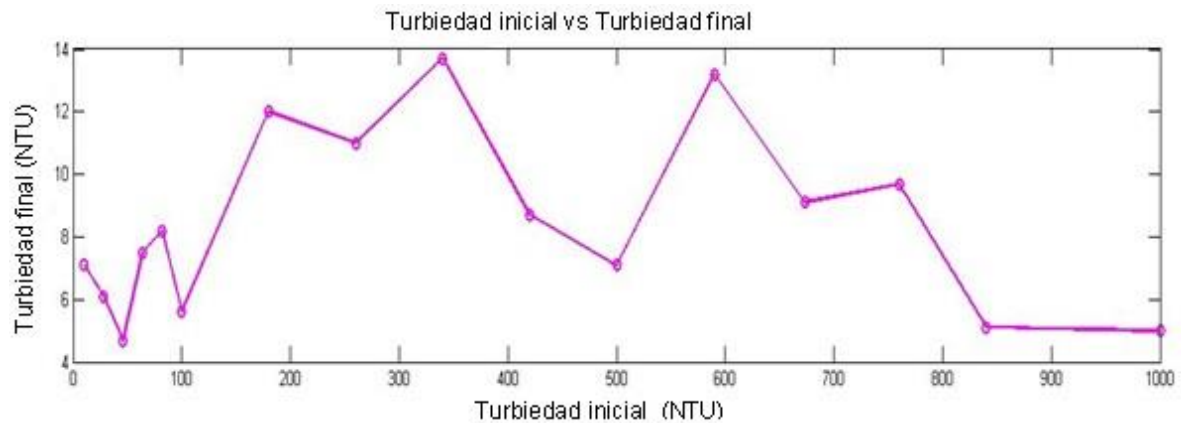


De acuerdo a los coeficientes de correlación obtenidos se definieron los parámetros influyentes para la determinación de la dosis óptima de coagulante, razón por la cual los parámetros como el pH, la conductividad y la alcalinidad, al presentar una relación pobre frente a la dosis de coagulante y la turbidez inicial, no fueron tenidos en cuenta en la modelación de la RNA. El motivo por el cual el color también fue omitido como parámetro de entrada se encuentra especificado en el numeral 6.2.1.

## 6.2. RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO DE JARRAS

A continuación se muestra el gráfico de la turbidez inicial y final resultante del primer Ensayo de Jarras realizado.

**Figura 24.** Valores de turbidez inicial vs turbidez final para en primer Ensayo de jarras.



Fuente: Autoría propia

La figura 24 muestra que, para este caso, no existe una tendencia lineal entre la turbidez inicial y la turbidez final, sino que los valores presentan variaciones conforme aumenta la turbidez inicial, mostrando que el valor de turbidez final no necesariamente sigue un comportamiento lineal sino que tiende a variar en un rango de 4.7 a 13.7 NTU, con valores significativamente pequeños en comparación a los niveles de turbidez inicial. Debido a que estos valores no mostraron un comportamiento uniforme fue necesario realizar los triplicados de los Ensayos de Jarras con el fin de obtener un nivel de confianza aceptable de los resultados de cada prueba realizada.

Se observa que en el anterior gráfico el nivel de remoción de turbidez es significativo ya que se contó con turbiedades iniciales hasta de 1000 NTU y posterior al Ensayo de Jarras el mayor nivel de turbidez final fue de 13.7 NTU. Esto se pudo confirmar por medio de los porcentajes de remoción calculados para cada experimento, el cual se realizó tomando los datos de la turbidez inicial (Ti) y la menor turbidez final (Tf) obtenida en cada prueba. El cálculo de dicho porcentaje se realizó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{Remoción} = \frac{T_i - T_f}{T_i} * 100$$

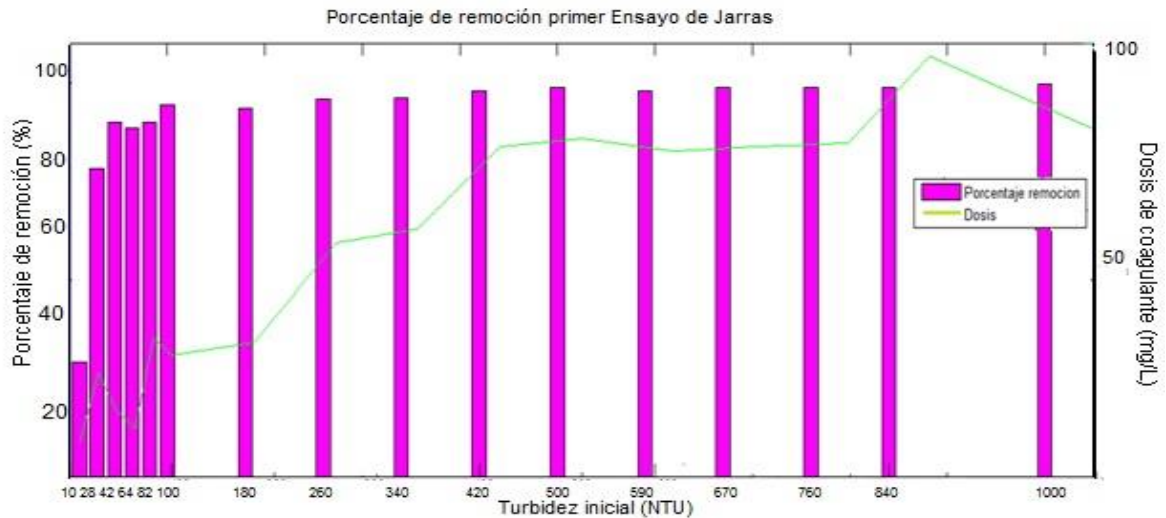
Este cálculo dio como resultado que para el menor nivel de turbidez inicial (10 NTU) se consiguió el menor porcentaje de remoción (29.0%), mientras que para el mayor nivel de turbidez inicial (1000 NTU) se obtuvo el mayor porcentaje de remoción (99.5%), lo cual permite asumir que existe una relación directamente proporcional entre la turbidez inicial y el porcentaje de remoción, ya que a mayor turbidez inicial más alto es el porcentaje de remoción (Ver Tabla 10).

**Tabla 10: Remoción del primer ensayo de jarras**

<b>Turbidez inicial (NTU)</b>	<b>Turbidez final(NTU)</b>	<b>Remoción (%)</b>
10	7.1	29.0
28	6.1	78.2
46	4.7	89.8
64	7.5	88.3
82	8,2	90.0
100	5.6	94.4
180	12.0	93.3
260	11.0	95.8
340	13.7	95.9
420	8.7	97.9
500	7.1	98.6
590	13.2	97.8
670	9.1	98.6
760	9.7	98.7
840	11.7	98.6
1000	5.0	99.5

Fuente: Autoría propia

**Figura 25:** Remoción primer Ensayo de Jarras



Fuente: Autoría propia

De acuerdo con la figura 25 se observa que el porcentaje de remoción de turbidez es de más del 50% para la mayoría de los ensayos, solo en el primer experimento no alcanzó una remoción igual a dicho porcentaje (aunque es importante tener en cuenta que la primera muestra tiene una turbidez de 10NTU), por lo que se puede decir que el porcentaje de remoción de la turbidez va a mantenerse dentro de un rango del 78 al 99%, lo que se considera satisfactorio.

## 6.2 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE COLOR Y ALCALINIDAD

### 6.2.1 Color.

Los resultados obtenidos en las mediciones del color, el cual se midió antes de iniciar el primer Ensayo de Jarras realizado y fue medido nuevamente al finalizar cada ensayo para el afine de la dosis de coagulante se pueden apreciar en el Anexo H, donde se observa que esta variable no presentó un comportamiento homogéneo en la mayoría de los casos, ya que se esperaba que este mostrara una relación con la turbidez final, es decir, que presentara los menores y mayores niveles de color en las jarras con la turbidez más baja o más alta en cada una de las repeticiones, pero el comportamiento fue diferente.

Para verificar el nivel de color mostrado por el espectrofotómetro se procedió a realizar tres mediciones por cada muestra de la última repetición, donde se notó que en la mayoría de los casos el color resultante no fue el mismo, razón por la cual se asumió que la diferencia con el comportamiento esperado de esta variable se debió a que el equipo se encontraba en mal estado y por esta razón no realizó las mediciones adecuadamente, a pesar de que se calibró antes de cada medición y se siguieron las instrucciones estipuladas en el manual del equipo para el monitoreo del color.

### 6.2.2 Alcalinidad.

La alcalinidad fue determinada únicamente en las jarras preparadas para la realización del primer ensayo de jarras, con el fin de verificar que esta no fuera superior a 200 mg/L de CaCO<sub>3</sub> para que no interfirieran con la efectividad del coagulante. Los resultados de las titulaciones se relacionan en la Tabla 11.

**Tabla 11: Alcalinidad para cada nivel de turbidez inicial**

<b>Turbidez Inicial (NTU)</b>	<b>Alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>
10	48,4
28	51,0
42	54,2
64	58,8
82	65,6
100	55,6
180	67,3
260	66,9
340	69,2
420	63,4
500	75,1
590	73,3
670	72,7
760	68,0
840	60,6
1000	78,9

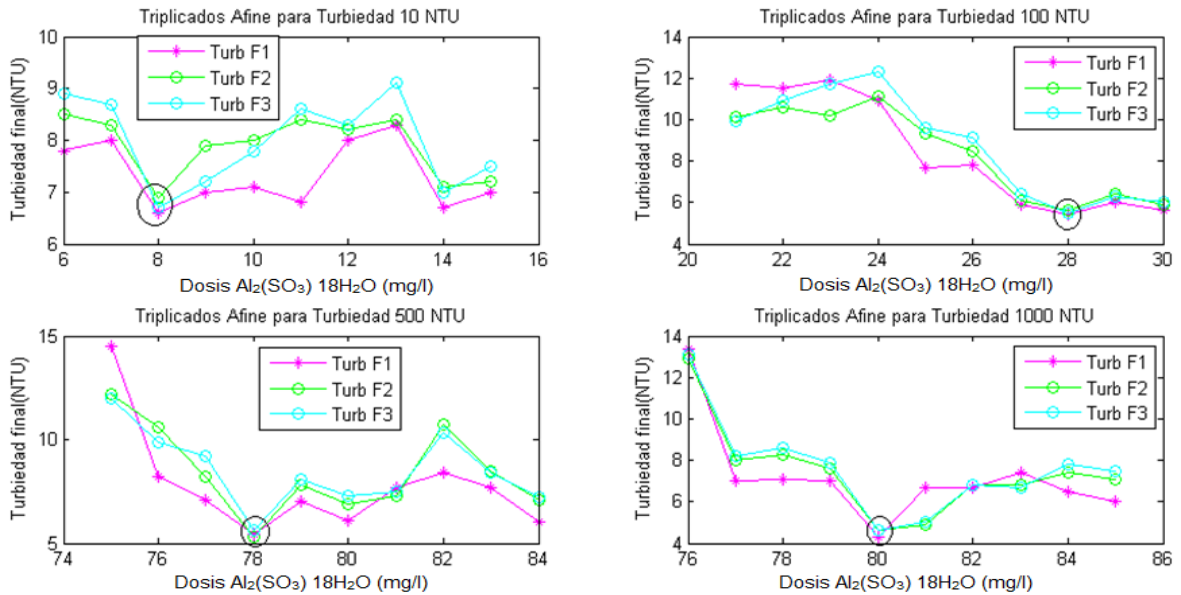
Fuente: Autoría propia

De acuerdo a los resultados de alcalinidad obtenidos y debido a que esta se encontraba dentro de un rango adecuado (no mayor a 200 mg/L CaCO<sub>3</sub>) para no afectar la acción del agente coagulante, se determinó que no era necesario realizar un ajuste de este parámetro antes de agregar el coagulante a las muestras.

### 6.3 RESULTADOS DE LOS TRIPLICADOS DEL AFINE DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE

En la realización del afine de la dosis óptima se obtuvieron diferentes resultados en el nivel de turbidez final con respecto a la obtenida en el primer Ensayo de Jarras ya que la turbidez final más alta en las pruebas realizadas para el afine de la dosis fue de 11 NTU mientras que en el primer ensayo fue de 13.7 NTU. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la realización del afine para los experimentos con turbiedades iniciales de 10, 100, 500 y 1000 NTU en cada una de las tres pruebas realizadas. El círculo negro señala la dosis para la cual se obtuvo la menor turbidez final y las líneas magenta (Turb F1), verde (Turb F2) y cian (Turb F3) representan el comportamiento de la turbidez final para los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente:

**Figura 26:** Triplicados del afine para la turbidez de 10, 100, 500 y 1000 NTU



Fuente: Autoría propia

De acuerdo a las gráficas se puede evidenciar que las dosis óptimas para estos experimentos variaron en algunos mililitros con respecto a la dosis óptima definida en el primer Ensayo de Jarras, pero la dosis fue la misma concentración en las tres repeticiones del afine. Para la turbidez de 10 NTU paso de ser 10 mg/L a 8 mg/L, para 100 NTU aumentó de 25 mg/L a 28 mg/L, en el caso de la turbidez de 500 NTU se presentó un aumento de 2 mg/L pasando de 80 mg/L a 78 mg/L y en el experimento con 1000 NTU se mantuvo en 80 mg/L.

En general, se observa que el comportamiento entre la turbidez inicial y la dosis óptima de coagulante tiende a mostrar cierta linealidad, aunque no siempre se ve representada, ya que no necesariamente a mayor turbidez inicial mayor será la dosis de coagulante, lo cual se puede observar en las pruebas realizadas con turbidez inicial de 46, 64, 100, 500, 590 y 1000 NTU, donde la dosis óptima resultante en los triplicados del afine fue de una concentración menor con respecto a la concentración de la dosis mostrada en el experimento anterior con turbidez menor. Por ejemplo, para el experimento con turbidez inicial de 82 NTU y dosis óptima de 32 mg/L, se obtuvo una concentración superior en la dosis con respecto a la resultante en el ensayo con 100 NTU, la cual fue de 25 mg/L a pesar de poseer un nivel de turbidez inicial mayor. Esto mismo se presentó en el caso del experimento con 840 NTU de turbidez inicial, ya que la dosis óptima fue de 97 mg/L, superior a los 80 mg/L que se obtuvieron para 1000 NTU, teniendo una mayor turbidez este último. Esto se debe a que las muestras de agua con mayor turbidez inicial presentan también una mayor cantidad de partículas que al mismo tiempo se encuentran más juntas entre sí, razón por la cual su aglomeración resulta con mayor facilidad, sin embargo esto no implica que la cantidad de coagulante a adicionar deba ser menor.

### **6.3.1 Remoción para los triplicados del afine de la dosis de $(Al_2SO_4)_3 \cdot 18H_2O$**

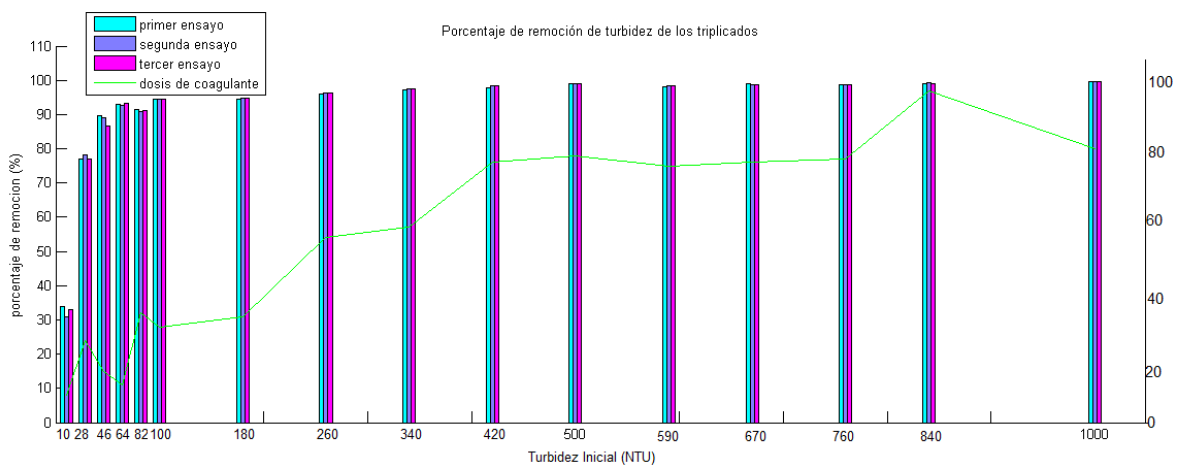
En la tabla 12 se encuentran los porcentajes de remoción resultantes de los Ensayos de jarras realizados para el afine de la dosis óptima de coagulante, donde el menor porcentaje de remoción fue de 31% y el mayor fue de 99.6%.

**Tabla 12: Porcentaje de remoción de los triplicados del afine de dosis de  $(Al_2SO_4)_3$**

Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez F1 (NTU)	Remoción 1 (%)	Turbidez F2 (NTU)	Remoción 2 (%)	Turbidez F3 (NTU)	Remoción 3 (%)
10	6.6	34.0	6.9	31.0	6.7	33.0
28	6.4	77.1	6.1	78.2	6.4	77.1
46	4.7	89.8	5.1	88.9	6.2	86.5
64	4.5	92.9	4.7	92.7	4.4	93.1
82	7.0	91.5	7.5	90.9	7.2	91.2
100	5.4	94.6	5.6	94.4	5.5	94.5
180	9.8	94.5	9.6	94.7	9.6	94.7
260	10.1	96.1	9.8	96.2	9.4	96.4
340	9.8	97.1	8.2	97.6	8.6	97.5
420	8.9	97.9	6.6	98.4	6.9	98.4
500	5.4	98.9	5.30	98.9	5.6	98.9
590	11.0	98.1	9.80	98.3	9.7	98.4
670	7.7	98.9	8.00	98.8	7.9	98.8
760	9.8	98.7	8.80	98.8	9.0	98.8
840	7.9	99.1	7.00	99.2	7.5	99.1
1000	4.3	99.6	4.60	99.5	4.6	99.5

Fuente: Autoría propia

**Figura 27: Porcentaje de remoción de turbidez en el afine de la dosis**



Fuente: Autoría propia

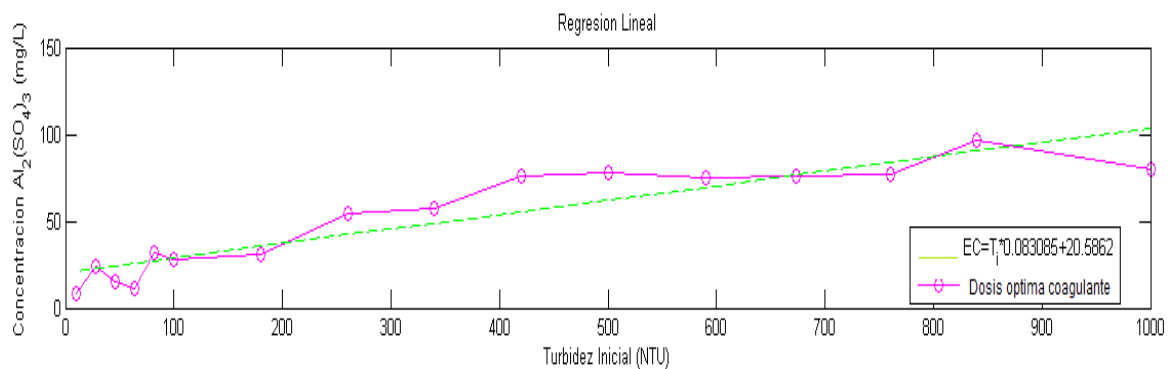
Los porcentajes de remoción de turbidez obtenidos con los Ensayos de Jarras para el ajuste de la dosis muestran que al tener un mayor ajuste del valor de la concentración de coagulante, la remoción de turbidez será mayor, pasando de obtener remociones de un 50% (Ensayo de Jarras anterior) a remociones ubicadas en un rango del 77% al 99%, beneficiando el objetivo del proceso de Coagulación y Floculación debido a que la dosis aplicada en este caso se encuentra más cercana al valor ideal de la dosis de coagulante y por ende se remueve la mayor cantidad de partículas coloidales y sólidos suspendidos posible.

## 6.4 REGRESION LINEAL Y POLINOMIAL DE LA DOSIS ÓPTIMA INICIAL

### 6.4.1 Regresión lineal de los triplicados del primer Ensayo de Jarras.

A continuación se muestran los resultados de las regresiones realizadas a partir de los valores óptimos de dosis de coagulante para las réplicas del primer Ensayo de Jarras. En la figura 27 se representan los resultados obtenidos con la regresión lineal para la concentración de dosis óptima de coagulante con respecto a los nivel de turbidez inicial.

**Figura 28.** Regresión lineal los triplicados del primer Ensayo de Jarras.



Fuente: Autoría propia

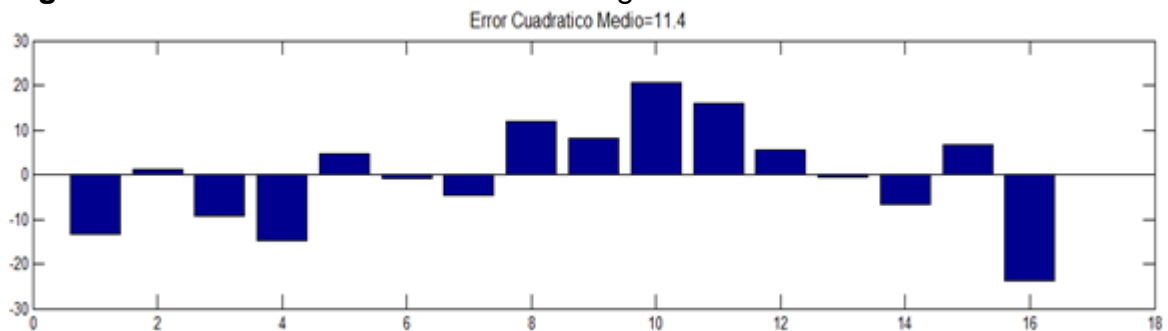
El comportamiento de la dosis de coagulante tiende a mostrar un aumento de la concentración de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  a medida que el nivel de turbidez inicial es mayor, lo que conlleva a asumir que la dosis de coagulante es directamente proporcional a la turbidez inicial, ya que a mayor turbidez la dosis también presentó un incremento de acuerdo con el modelo de regresión lineal. Para establecer esta hipótesis fue



necesario determinar el error entre las dosis estimadas y las reales, con el fin de establecer el grado de ajuste del modelo de regresión lineal y al mismo tiempo definir si dicho modelo podría ser utilizado para calcular una dosis óptima de coagulante para turbiedades inferiores o superiores a las establecidas inicialmente.

El ECM obtenido fue de 11.4 mg/L, mostrando que los ensayos 3 y 4 (turbidez inicial 46 y 64 NTU), 8 al 12 (turbidez inicial 260, 340 y 420 NTU) y el ensayo 16 (turbidez inicial 1000 NTU) fueron aquellos que tuvieron un mayor nivel de error como lo muestra la figura 29. La longitud de las barras representa el nivel de error que se obtuvo para cada experimento entre la dosis real y la dosis calculada con la ecuación de la regresión.

**Figura 29.** Error Cuadrático Medio de la regresión lineal

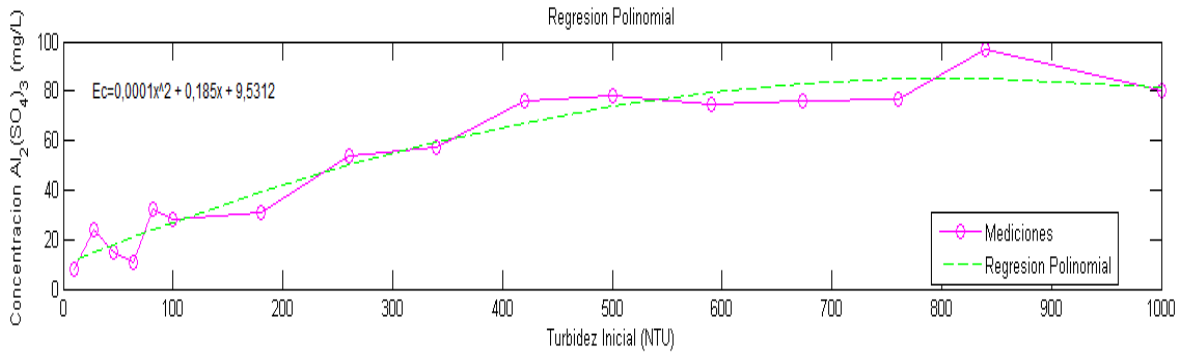


Fuente: Autoría propia

#### 6.4.2 Regresión polinomial para los triplicados del primer Ensayo de Jarras

Se realizó una regresión polinomial con el fin de observar si la dosis de coagulante presentaba un comportamiento polinomial. A continuación se observa el gráfico de la regresión polinomial con respecto a los valores de dosis de coagulante.

**Figura 30.** Regresión polinomial para los triplicados del primer Ensayo de Jarras

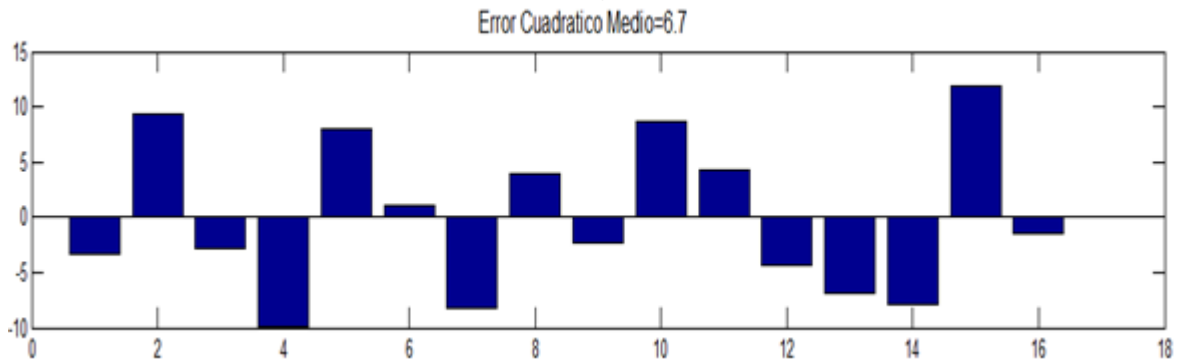


Fuente: Autoría propia

Se puede observar que las dosis de coagulante estimadas poseen un mayor ajuste en comparación con los resultados obtenidos con la regresión lineal, mostrando un comportamiento polinomial, es decir que el valor de la dosis de coagulante puede tender a estar descrito por una curva.

Seguidamente se calculó el Error Cuadrático Medio (ECM) con el fin de determinar si las dosis estimadas con el modelo polinomial se ajustan en mayor medida a las calculadas con la regresión lineal y si poseen un menor ECM.

**Figura 31.** Error Cuadrático Medio de Regresión Polinomial



Fuente: Autoría propia

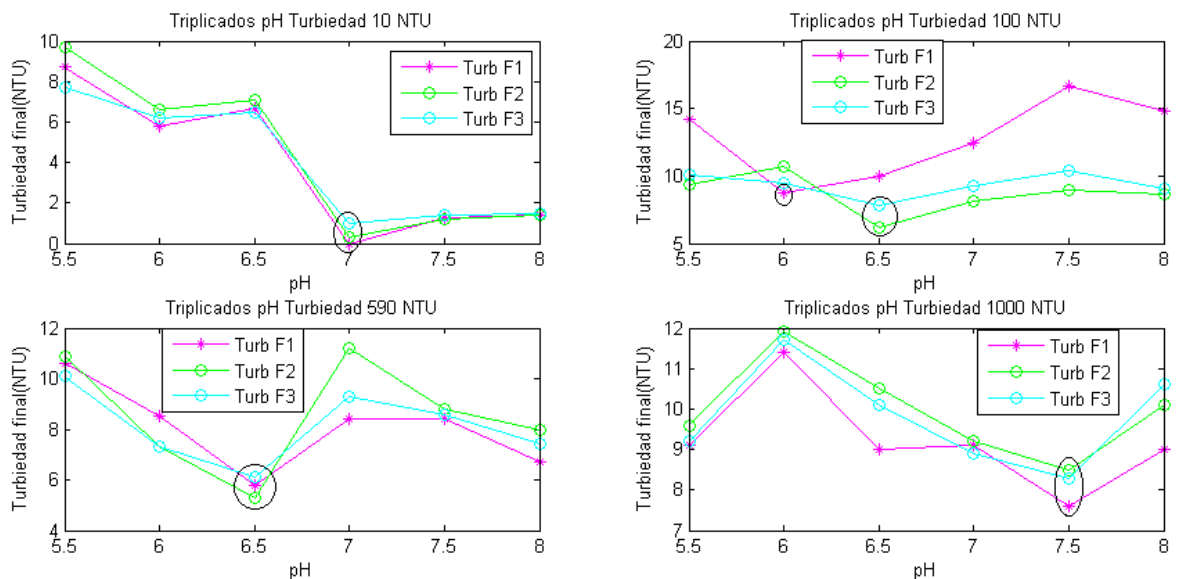
En la figura 31 se puede observar que el ECM para el modelo de regresión polinomial fue de 6.7 mg/L, siendo menor en comparación al ECM de la regresión lineal, pudiéndose afirmar que los datos de la dosis de coagulante se ajustan en mayor medida al modelo polinomial.

## 6.5 DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO PARA LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los tres Ensayos de jarras realizados para definir el pH óptimo para la dosis de coagulante óptima establecida en el primer ensayo. Se realizaron diferentes gráficos por medio de las cuales se pudo observar el comportamiento de la turbiedad final con respecto al pH.

En la figura 32 se aprecia el pH con el cual la dosis de coagulante aplicada a los niveles de turbiedad de 10, 100, 590 y 1000 NTU logró la menor de turbiedad final en cada uno de los experimentos:

**Figura 32:** pH óptimo para los niveles de turbiedad inicial de 10 a 64 NTU



Fuente: Autoría propia

Para la turbiedad inicial de 10 NTU se puede observar que el pH óptimo fue de 7, con el cual se obtuvieron turbiedades finales máximas de 1 NTU (con una mínima de 0 NTU) en las 3 pruebas. Para la turbiedad inicial de 100 NTU el pH óptimo fue de 6.0 para el ensayo uno y de 6.5 para la segunda y tercera repetición con una turbiedad final máxima de 8.7 NTU (turbiedad mínima de 6.2 NTU). En el caso de la turbiedad de 590 NTU se obtuvo 6.5 como pH óptimo con una turbiedad final máxima de 6.1 NTU (turbiedad mínima de 5.3 NTU), para el experimento con 1000 NTU de turbiedad inicial el pH óptimo fue de 7.5 con una turbiedad final máxima de 8.5 NTU y una mínima de 7.6 NTU. Cabe resaltar que en varias de las pruebas se obtuvo un nivel de pH óptimo diferente al realizar las réplicas pero este se mantuvo dentro del

rango ácido o básico, es decir que en ningún experimento se obtuvo un pH ácido y uno básico como óptimos para la misma muestra, lo cual puede deberse a que no se logró replicar de manera exacta la composición de las muestras a pesar de que en ellas se agregó el mismo volumen de agua base.

### 6.5.1 Porcentaje de remoción en los triplicados de pH

En la tabla 13 se muestran los resultados de la remoción obtenidos en cada uno de los triplicados realizados para la determinación del pH óptimo, donde se puede observar que en todos los ensayos el porcentaje de remoción se encuentra por encima del 91.3%, llegándose a remover hasta un 100% de turbidez, lo cual indica que al controlar el pH se consiguió que la dosis optima obtenida en la primera etapa funcionara con mayor efectividad.

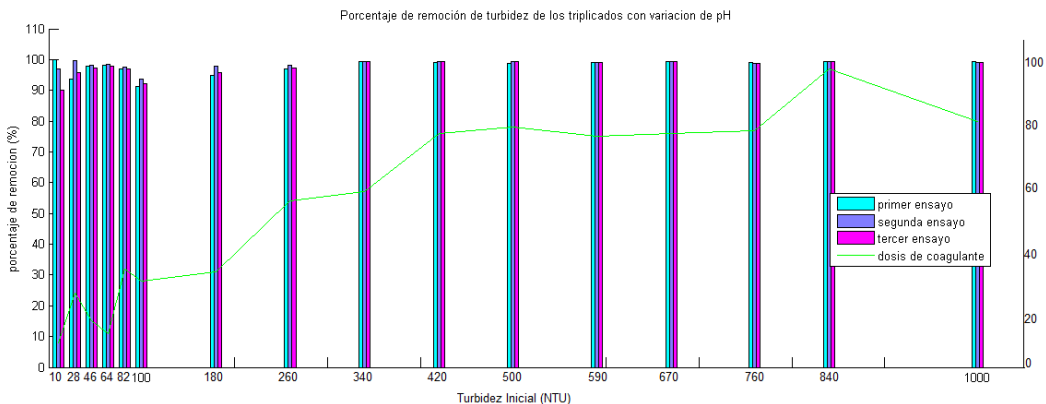
**Tabla 13: Remoción para los tres ensayos de pH**

Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez F1 (NTU)	Remoción 1 (%)	Turbidez F2 (NTU)	Remoción 2 (%)	Turbidez F3 (NTU)	Remoción 3 (%)
10	0.0	100.0	0.3	97.0	1.0	90.0
28	1.8	93.6	0.1	99.6	1.2	95.7
46	1.0	97.8	0.8	98.3	1.2	97.4
64	1.2	98.1	1.0	98.4	1.3	97.9
82	2.5	96.9	2.1	97.4	2.6	96.8
100	8.7	91.3	6.2	93.8	7.8	92.2
180	9.4	94.8	4.0	97.8	7.8	95.7
260	8.0	96.9	4.5	98.3	7.4	97.2
340	2.7	99.2	2.1	99.4	2.3	99.3
420	3.8	99.1	2.1	99.5	3.2	99.2
500	5.8	98.8	3.5	99.3	3.5	99.3
590	5.8	99.1	5.3	99.1	6.1	98.9
670	4,0	99.4	4.2	99.4	4.2	99.4
760	8,1	98.9	8.9	98.8	8.7	98.9
840	6,0	99.3	4.4	99.5	5.6	99.3
1000	7.6	99.2	8.5	99.2	8.3	99.2

Fuente: Autoría propia

A continuación se presenta el porcentaje de remoción de turbidez en los Ensayos de jarras donde se realizó la variación del pH:

**Figura 33:** Porcentaje de remoción de turbidez en el ajuste de pH

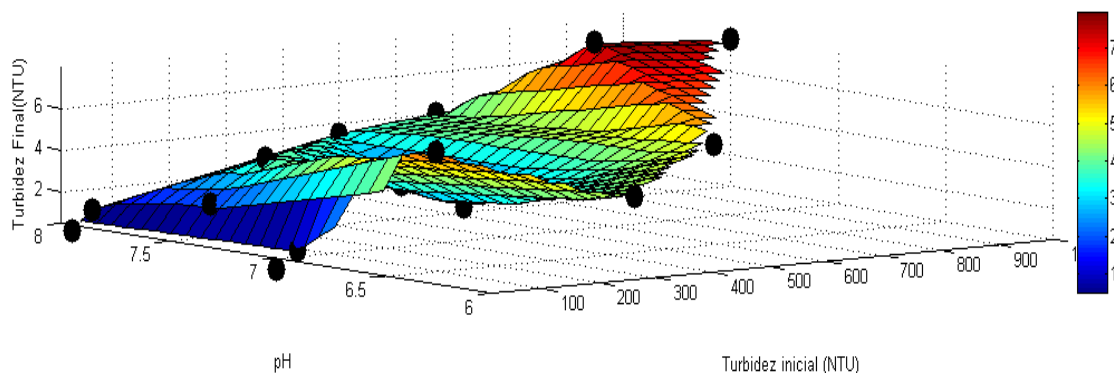


Fuente: Autoría propia

Esta gráfica permite observar que con la realización del ajuste del pH, el agente coagulante es capaz de remover mayor turbidez, mostrando que con dosis relativamente bajas se puede garantizar siempre una remoción por encima del 90%, la cual es relativamente alta en comparación con los resultados del ensayo de jarras sin ajuste del pH, con el que se puede garantizar una remoción superior al 77%.

Adicionalmente se llevó a cabo la realización de un gráfico en tres dimensiones que permitiera observar la relación existente entre la turbidez inicial, el pH y la turbidez final y su comportamiento en estos ensayos:

**Figura 34.** Relación entre la turbidez inicial, pH y turbidez final

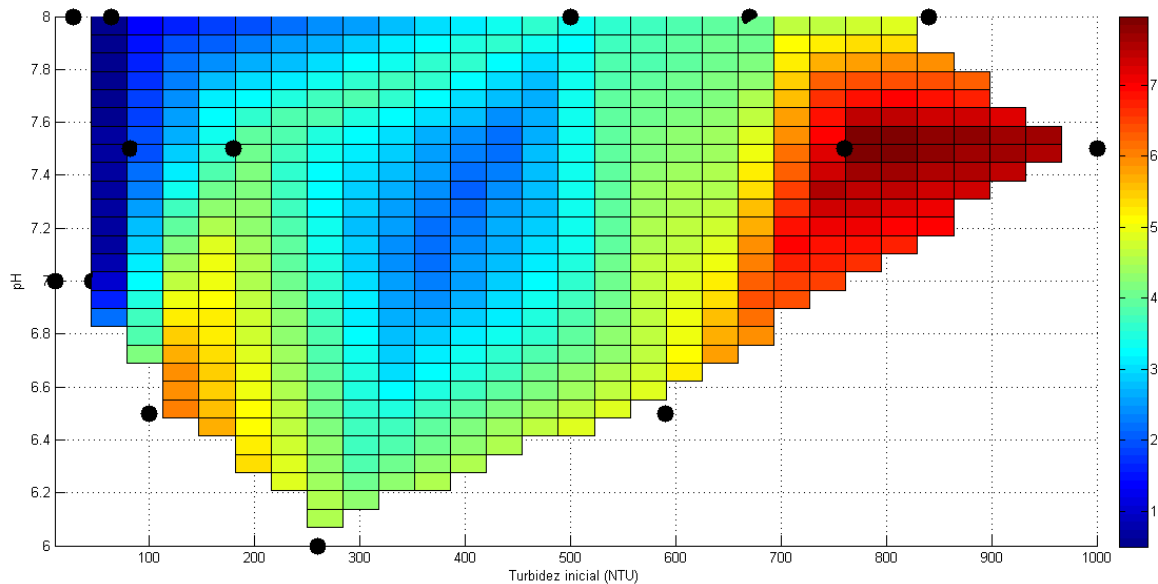


Fuente: Autoría propia

La figura 34 muestra la relación entre la turbidez inicial (eje x), el pH (eje Y) y la turbidez final (eje Z y barra de colores), donde se observa que la mayor superficie se encuentra dentro de los rangos de pH de 7 a 8, los cuales corresponden al mismo

tiempo a los menores niveles de turbidez final obtenidos en los diferentes ensayos. Lo anterior conlleva a determinar que el Sulfato de Aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) presenta mejores resultados, en lo que a remoción de turbidez se refiere, en los niveles básicos de su rango de pH óptimo, el cual se encuentra entre 5.5 y 8, por ende el punto de ajuste (set point) de pH para el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  debe encontrarse entre 7 y 8 para este caso.

**Figura 35:** Comportamiento del pH frente a la turbidez inicial y final.



Fuente: Autoría propia

En la figura 35 (que representa el comportamiento de los ejes X-Y de la figura 34) se puede observar de forma más clara que el área de colores desde el azul hasta el amarillo, que representa los niveles de turbidez final que se encuentran dentro del rango de 1 a 5 NTU, es la que ocupa la mayor parte de la superficie y al mismo tiempo representa el pH con el cual se obtuvieron menores niveles de turbidez final (pH dentro del rango de 7 a 8), confirmándose de esta forma que el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  presenta un mayor grado de efectividad al tratar aguas que se encuentren con un pH dentro de dicho rango.

## 6.6 RESULTADOS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS REGRESIONES Y LA RNA

### 6.6.1 Resultados de la efectividad de la regresión Lineal y Polinomial

A continuación se presentan las ecuaciones tanto de la regresión lineal y polinomial por medio de las cuales se llevó a cabo el cálculo de la dosis óptima de coagulante para las cinco turbiedades iniciales definidas en la etapa de comprobación de su efectividad, junto al ECM arrojado por cada una de las regresiones:

**Tabla 14: Ecuaciones y ECM de las regresiones lineal y polinomial para las repeticiones del primer ensayo.**

<b>Ecuación Regresión Lineal</b>	$Ti * 0.0831 + 20.584$
<b>ECM</b>	1.14 ml [11.4 mg/L]
<b>Ecuación Regresión Polinomial</b>	$(-0.0001 * Ti^2) + (0.185 * Ti) + 9.5312$
<b>ECM</b>	0.67ml [6.7 mg/L]

Fuente: Autoría propia

En cada una de las ecuaciones se reemplazó el valor de la turbidez inicial para obtener la dosis óptima de coagulante, la cual se modificó de acuerdo al ECM de cada regresión, siguiendo lo estipulado en la tabla 8. Las concentraciones de coagulante aplicadas a cada una de las jarras se encuentran en la tabla 15:

**Tabla 15: Concentración óptima calculada por las regresiones**

<b>Turbidez Inicial (NTU)</b>	<b>Dosis Al<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> R. Lineal (mg/L)</b>	<b>Dosis Al<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> R. polinomial (mg/L)</b>
15	33, 39, 22 y 16	19, 22, 12 y 9
90	40, 45, 28 y 22	32, 35, 25 y 22
150	44, 50, 33 y 27	42, 45, 35 y 32
500	71, 77, 66 y 61	84, 87, 77 y 74
950	111, 117, 100 y 94	102, 105 95 y 92

Fuente: Autoría propia

### 6.6.1.1 Remociones obtenidas a partir de la comprobación de las regresiones.

Las tablas 16 y 17 muestran los porcentajes de remoción obtenidos en cada uno de los ensayos de jarras realizados para verificar la efectividad de las regresiones, donde se puede observar que se presenta la misma tendencia que se evidenció en los experimentos anteriores, mostrando que a menor turbidez inicial menor será el porcentaje de remoción:

**Tabla 16: Remoción de la regresión lineal de verificación**

Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez F1 (NTU)	Remoción RL1 (%)	Turbidez F2 (NTU)	Remoción RL2 (%)	Turbidez F3 (NTU)	Remoción RL3 (%)
15	8.2	45.3	7.9	47.3	7.9	47.3
90	16.1	82.1	14.7	83.7	14.3	84.1
150	16.1	89.3	12.8	91.5	12.1	91.9
500	11.7	97.7	15.5	96.9	10.3	97.9
950	10.2	98.9	8.5	99.1	8.1	99.2

Fuente: Autoría propia

Los resultados obtenidos con la regresión lineal y polinomial son bastante similares a los primeros Ensayos de jarras realizados, ya que se presentaron los menores niveles de remoción de turbidez en los experimentos con la menor turbidez inicial (15 NTU) y la remoción fue aumentando conforme lo hacia la turbidez inicial, llegando a removerse hasta un 99% de la turbidez en las muestras.

**Tabla 17: Porcentaje de remoción de la regresión polinomial de verificación**

Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez F1 (NTU)	Remoción RP1 (%)	Turbidez F2 (NTU)	Remoción RP2 (%)	Turbidez F3 (NTU)	Remoción RP3 (%)
15	4.0	73.3	4.6	69.3	4.2	72.0
90	11.2	87.6	9.3	89.7	8.9	90.1
150	12.3	91.8	15.6	89.6	12.0	92.0
500	10.9	97.8	10.3	97.9	9.3	98.1
950	9.4	99.1	7.8	99.2	8.2	99.1

Fuente: Autoría propia

Adicionalmente, los porcentajes de remoción obtenidos con la regresión lineal son relativamente menores a los obtenidos con la regresión polinomial, lo cual podría indicar que además de que el ECM de la regresión polinomial es menor al obtenido



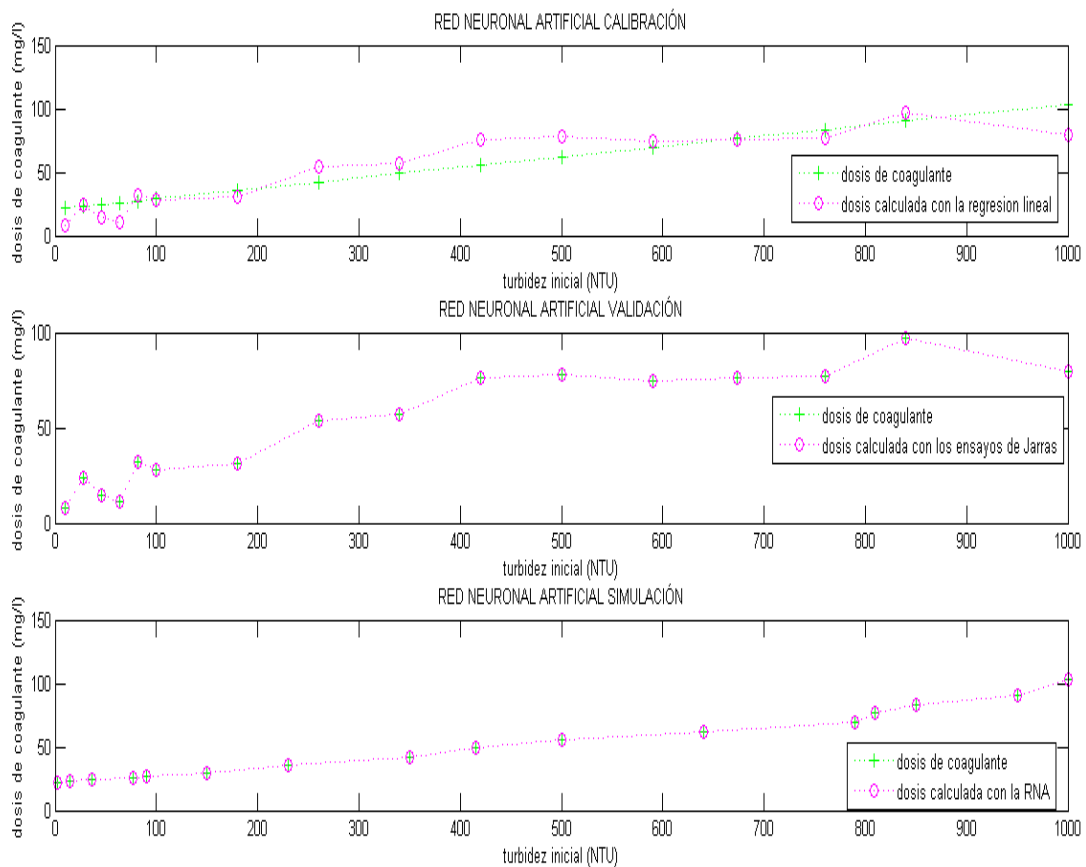
para la regresión lineal, las dosis calculadas por medio de la ecuación de la regresión polinomial presentan mejores resultados frente a la remoción de la turbidez presente en el agua.

## 6.6.2 Resultados de la RNA

### 6.6.2.1 Comportamiento de la Red Neuronal Artificial

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la red de entrenamiento, la red de validación y la red de simulación en cuanto a su comportamiento y sus respectivas gráficas.

**Figura 36:** Resultados Red Neuronal Artificial



Fuente: Autoría propia

En el gráfico de la Red de Calibración se puede observar el comportamiento de la dosis de coagulante calculada en los Ensayos de jarras junto con los valores de dosis de coagulante determinados con la regresión lineal. A través de la relación representada por esta red de entrenamiento la RNA fue asimilando un patrón del comportamiento de la dosis de coagulante.

La gráfica de la Red de Validación representa los valores de dosis de coagulante determinados por los Ensayos de Jarras en comparación con los valores simulados por la Red de Validación, mostrando que ambas variables se comportan de la misma forma, lo que permite decir que la red ya se ha entrenado y ha adaptado el patrón de comportamiento que tiene la dosis de coagulante para cada nivel de turbidez, razón por la cual se realizó la Red de Simulación, con la que llevo a cabo una evaluación de la RNA, ingresándole valores aleatorios de turbidez inicial con el fin de determinar si la RNA daba como resultado concentraciones de dosis de coagulante menores a los emitidos por la regresión lineal y polinomial.

#### 6.6.2.2 Comprobación de la efectividad de la RNA.

Para llevar a cabo la definición de las dosis óptimas que serían aplicadas en las jarras se procedió a introducir en la RNA cada uno de los valores de turbidez inicial utilizados en las regresiones (15, 90, 150, 500, 950 NTU), con el fin de que la red arrojara una dosis óptima de coagulante como resultado. Al tener esta dosis definida y debido a que el error para este caso fue de 0mg/L, se adicionó en una de las jarras la concentración obtenida con la RNA y para las tres jarras restantes se decidió modificar la dosis de acuerdo a las variaciones realizadas para los ensayos de comprobación de las regresiones (Ver tabla 8). La tabla 18 muestra las dosis calculadas por la RNA.

**Tabla 18: Dosis arrojada por la RNA**

Turbidez Inicial (NTU)	Dosis $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ RNA	Dosis de Aluminio RNA
15	22 mg/L	1.8 mg Al/L
90	27 mg/L	2.2 mg Al/L
150	29 mg/L	2.9 mg Al/L
500	55 mg/L	5.5 mg Al/L
950	90 mg/L	6.7 mg Al/L

Fuente: Autoría propia

Es importante resaltar que estos ensayos se realizaron por triplicado y la dosis óptima de coagulante arrojada por la RNA fue la que mostró la turbidez final más baja en todas las repeticiones.

#### 6.6.2.3 Remoción de la RNA para el ensayo de verificación

La tabla 19 muestra los porcentajes de remoción obtenidos en las réplicas realizadas para la comprobación de la efectividad de la RNA, donde se puede observar que el porcentaje de remoción más bajo es del 74.7% siendo mayor a la remoción obtenida con las regresiones. Esto se debe a que la RNA arrojó concentraciones de dosis de coagulante con las que se logró una mayor remoción del nivel de turbidez frente a los obtenidos con las regresiones.

**Tabla 19: Remoción de la RNA**

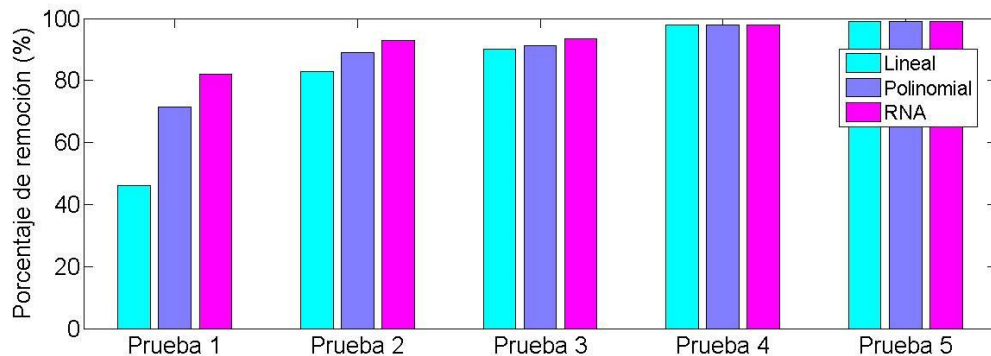
Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez F1 (NTU)	Remoción RNA1 (%)	Turbidez F2 (NTU)	Remoción RNA2 (%)	Turbidez F3 (NTU)	Remoción RNA3 (%)
15	3.8	74.7	2.2	85.3	2.1	86.0
90	6.1	93.2	6.6	92.7	6.6	92.7
150	9.4	93.7	10.0	93.3	9.8	93.5
500	10.1	97.9	9.6	98.1	9.9	98.1
950	8.5	99.1	8.3	99.1	8.0	99.2

Fuente: Autoría propia

#### 6.6.2.4 Porcentajes de remoción de la RNA

A continuación se muestran las remociones obtenidas con la RNA, comparándolos frente a los resultados arrojados por la regresión lineal y la polinomial:

**Figura 37. Porcentaje de remoción de la RNA, regresión lineal y polinomial**



Fuente: Autoría propia

Se observa que la RNA (barras de color magenta) fue el modelo que mayor porcentaje de remoción de turbidez obtuvo en cada uno de los ensayos realizados, en comparación con los modelos de regresión lineal y polinomial, mostrando que la RNA tiende a ajustarse en mayor medida al comportamiento que puede presentar la dosis de coagulante, aunque tanto la regresión lineal como la polinomial también presentaron resultados favorables, ya que de acuerdo con sus resultados, los porcentajes de remoción superaban el 50% en promedio, por lo que estos modelos también podrían ser utilizados para la determinación de una dosis de coagulante, sin embargo no se puede garantizar que la dosis calculada por medio de sus ecuaciones represente la dosis óptima de coagulante.

## 7. CONCLUSIONES

A pesar de que al realizar los Ensayos de Jarras para el ajuste del pH se obtuvieron valores de turbidez final hasta de 0 NTU, al realizar el cálculo de la correlación existente entre el pH y la dosis de coagulante, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de 0.17, lo cual indica que existe una relación muy pobre entre el pH y la dosis de coagulante en este caso, razón por la cual no es posible predecir un valor óptimo de pH utilizando una regresión lineal o polinomial, ya que se obtendrán errores muy elevados.

Los valores de pH con los que se obtuvieron los mejores resultados varían en un rango entre 7 a 8, rango dentro del cual se encontró la mayor cantidad de valores de turbidez final más bajos, 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  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , es un poco más específico, ya que este varía entre 5.5 y 8.

El ECM arrojado para las Regresiones Lineal y Polinomial fue de 11.4 mg/L y 6.7 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , que representan 1.1 ml y 0.6 ml de coagulante, mostrando que es posible predecir por medio de estas regresiones la dosis de coagulante con un error relativamente bajo, sin embargo el uso de la RNA para la predicción de la dosis óptima dio como resultado un error de 0 mg/L, lo cual demuestra que esta última sería la herramienta más indicada para realizar la estimación de la dosis óptima de coagulante según la turbidez inicial.

Con los modelos de regresión lineal y polinomial se obtuvieron remociones de más del 40% para todos los niveles de turbidez inicial, lo que demuestra que al utilizar dichos modelos para obtener una dosis de coagulante se puede garantizar un porcentaje de remoción de turbidez considerable y teniendo en cuenta que son modelos con un menor grado de dificultad de emplear en comparación con la Red Neuronal Artificial, podrían ser implementados para dicho fin, sin embargo la precisión de la dosis calculada será menor en comparación a la emitida por la RNA debido al ECM reportado para esta red.

La efectividad del funcionamiento de la RNA depende principalmente de la calidad y cantidad de los datos introducidos para el entrenamiento y calibración de la misma,

razón por la cual es importante definir de forma previa las variables de entrada que realmente tienen influencia sobre la estimación de la dosis de coagulante, ya que permitirá obtener una red con un ECM significativamente pequeño y que por ende calculará resultados más precisos, es decir que se obtendrán dosis de coagulante realmente óptimas.

El uso de modelos matemáticos como herramienta para la optimización del proceso de Coagulación y Floculación permite su automatización, debido a la disminución en cuanto al tiempo de determinación de la dosis de coagulante, a la eliminación de la necesidad de Ensayos de Jarras consecutivos, y a que contribuyen con el incremento del nivel de efectividad del proceso, proporcionando beneficios tanto económicos como en la calidad del agua que ha sido tratada.

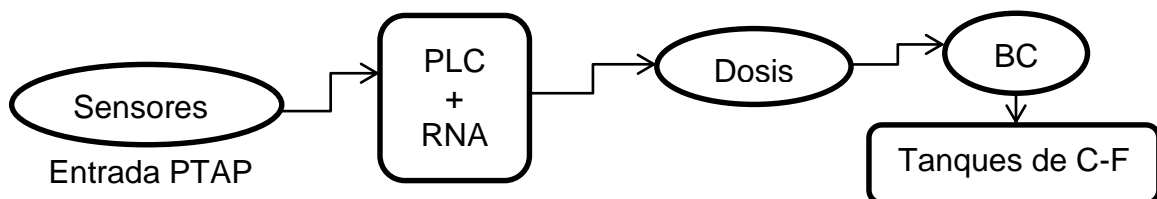
La Red Neuronal Artificial desarrollada permitirá implementar un sistema de control automático que puede ser utilizado en el tratamiento de agua potable, el cual será capaz de predecir y aplicar una dosis óptima de coagulante de acuerdo al nivel de turbidez inicial que presente el agua a tratar.

## 8. RECOMENDACIONES

Para próximos trabajos se recomienda, en primer lugar, realizar las mediciones con un equipo que sea capaz de monitorear turbiedades mayores a 1000 NTU, ya que esto permitirá conocer el comportamiento que presentará la dosis de coagulante en turbiedades superiores y al tener más datos es posible que las regresiones lineal y polinomial arrojen mejores resultados y la Red Neuronal Artificial (RNA) sea capaz de predecir dosis óptimas para turbiedades superiores a 1000 NTU.

Debe tenerse en cuenta que el modelo de RNA elaborado puede ser implementado teniendo presente que las características del agua a tratar sean similares a las que presentó el agua utilizada para este proyecto, al igual que el tipo de coagulante usado, con el fin de que se puedan asegurar resultados similares a los obtenidos en el presente trabajo, garantizando una remoción del nivel de turbidez de más del 70% con un ECM de 0mg/L.

Este modelo de RNA se podría implementar en una PTAP por medio de su adaptación a un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual debe alimentarse con las mediciones realizadas por sensores ubicados en la entrada de la planta que monitoreen la turbidez. Con estas mediciones el PLC, por medio de la RNA, será capaz de emitir señales de salida que serán traducidas como dosis óptimas de coagulante, las cuales podrían ser dosificadas por medio de la implementación de una bomba controladora (BC) que al recibir una señal, adicione la cantidad exacta de coagulante calculada por la RNA.



Es importante incluir una evaluación de carácter económico que permita evidenciar el beneficio (en dinero) que traerá la dosificación adecuada de la cantidad de coagulante en el tratamiento de aguas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Zambrano and D. Liliana, "Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SAESP," 2008.
- [2] C. A. V. Campos and E. C. Bravo, "Técnicas de Inteligencia Computacional Aplicadas a Modelos de Estimación de Coagulante en el Proceso de Potabilización de Agua," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 205-215, 2013.
- [3] S. M. Sibiya, "Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control," *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 1211-1220, 2014.
- [4] M. F. Domínguez Amoroch, "Optimización de la coagulación-floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre-Cajasan," 2013.
- [5] Q. Zhang and S. J. Stanley, "Real-time water treatment process control with artificial neural networks," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 125, pp. 153-160, 1999.
- [6] M. Franceschi, A. Girou, A. Carro-Diaz, M. Maurette, and E. Puech-Costes, "Optimisation of the coagulation–flocculation process of raw water by optimal design method," *Water research*, vol. 36, pp. 3561-3572, 2002.
- [7] S. Heddam, A. Bermad, and N. Dechemi, "Applications of radial-basis function and generalized regression neural networks for modeling of coagulant dosage in a drinking water-treatment plant: comparative study," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 137, pp. 1209-1214, 2011.
- [8] Z. Song, Y. Zhao, X. Song, and C. Liu, "Research on prediction model of optimal coagulant dosage in water purifying plant based on neural network," in *Computing, Communication, Control, and Management, 2009. CCCM 2009. ISECS International Colloquium on*, 2009, pp. 258-261.
- [9] M. d. I. A. G. Daniela Castrillon Bedoya, "Determinación de la dosis optima de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de villa santana," *Tecnologo Quimico, Fcultad de Tecnologias, Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira*, 2012.
- [10] J. Orellana, "Tratamiento de las aguas," vol. 6, p. 123, 2006.
- [11] C. d. I. y. D. T. d. Agua, *Tratamiento de Aguas* vol. 8. Salamanca, España: Universidad de Salamanca, 2009.
- [12] Y. A. Cardenas, L. d. Vargas, and A. B. Martel, "Tratamiento de agua: coagulación - floculación," SEDAPAL, Lima2000.
- [13] S. Heddam, A. Bernard, and N. Dechemi, "ANFIS- based modelling for coagulant dosage in drinking water treatment plant: a case study," *Environmental monitoring and assesment*, vol. 184, 2012 2012.
- [14] M. Romero, "Tratamientos utilizados en potabilización de agua," *Boletín Electrónico [Internet].[citado 2012 jun 16]*, vol. 8, pp. 1-12.



- [15] C. Gagnon, B. P. Grandjean, and J. Thibault, "Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant," *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 11, pp. 401-404, 1997.
- [16] R. S. Silvan, J. R. L. Canepa, and J. R. H. Barajas, "Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales," Universidad Juarez Autonoma de Tabasco, Tabasco, Mexico Septiembre de 2012 2012.
- [17] H. A. R. Osorno, "Evaluacion del proceso de coagulacion floculacion de una planta de tratamiento de agua potable.," *Facultad de Minas*, p. 109, 2009.
- [18] D. M. M. Castaño, "Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada," Quimico Industrial, Escuela de tecnologías, Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira. Colombia, 2011.
- [19] J. A. Perez, "Calidad del agua," ed. Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010, p. 35.
- [20] M. A. C. Francisco Escolano Ruiz, Maria Isabel Alonso, Otto Colomina, Miguel Angel Lozano, *Inteligencia Artificial, modelos, tecnicas y areas de aplicacion* vol. 25. Madrid, España: Thomson Ediciones.
- [21] C. D. Juan Jesus Romero, Angel Gomez, *Inteligencia Artificial y Computacion Avanzada*, 13 ed.: Fundacion Alfredo Bañas, 2007.
- [22] E. D. Sontag, *Temas de Inteligencia Artificial*. Buenos Aires, Argentina: PROLAM S.R.L., 1992.
- [23] P. N. Stuart J. Rusell, *Artificial Intelligence a modern approach*. New Yersey, United States: Prentice Hall, Inc., 1995.
- [24] G. A. T. Claudio Javier Tablada, "Redes Neuronales Artificiales," Buenos Aires, Argentina 2010.
- [25] C. S. Fernando Izuareta, "Redes Neuronales Artificiales," Universidad de Concepcion, Chile, informe 2011.
- [26] J. J. Sprockel, J. J. Diaztagle, W. Alzate, and E. González, "Redes neuronales en el diagnóstico del infarto agudo de miocardio," *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 21, pp. 215-223, 2014.
- [27] D. R. C. Fernando Villada, Juan David Molina, "pronostico del precio de la energia electrica usando redes neuronales artificiales," *Facultad de Ingenierias de Universidad de Antioquia*, vol. 44, p. 8, Junio, 2008 2008.
- [28] X. B. Olabe, "Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones," *Publicaciones de la Escuela de Ingenieros*, 1998.
- [29] M. d. J. d. I. Fuente, "Redes Neuronales Artificiales," Universidad de Valllaodlid 2009.
- [30] U. d. I. Andes. (2014, 02 de Febrero). *Principios de MATLAB*.
- [31] C. A. Villarreal Campos and E. Caicedo Bravo, "Técnicas de Inteligencia Computacional Aplicadas a Modelos de Estimación de Coagulante en el Proceso de Potabilización de Agua," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 205-215, 2013.
- [32] X. B. Olabe, "redes neuronales artificiales y sus aplicaciones," p. 79, 2011.
- [33] A. Mirsepassi, B. Cathers, and H. Dharmappa, "Application of artificial neural networks to the real time operation of water treatment plants," in *Neural*

- Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on, 1995, pp. 516-521.*
- [34] H. R. Maier, N. Morgan, and C. W. Chow, "Use of artificial neural networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters," *Environmental Modelling & Software*, vol. 19, pp. 485-494, 2004.
  - [35] W. López, G. Nociari, and A. Barrionuevo, "Programa predictor de dosis óptima de coagulante: planta San Martín, planta Manuel Belgrano," in *Desafíos ambientales y del saneamiento en el siglo XXI*, ed: AIDIS Argentina, 2004, pp. 1-4.
  - [36] G.-D. Wu and S.-L. Lo, "Effects of data normalization and inherent-factor on decision of optimal coagulant dosage in water treatment by artificial neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 4974-4983, 2010.
  - [37] C. Montoya, D. Loaiza, P. Torres, C. H. Cruz, and J. C. Escobar, "Effect of increase of raw water turbidity on efficiency of conventional drinking water treatment processes," *Revista EIA*, pp. 137-138, 2011.
  - [38] H. Zhang and D. Luo, "Application of an expert system using neural network to control the coagulant dosing in water treatment plant," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 2, pp. 89-92, 2004.
  - [39] *Resolucion 2115 de 2007, 2007.*
  - [40] *Decreto 1575 de 2007, 2007.*
  - [41] J. G. Henry, G. W. Heinke, and H. J. Escalona, *Ingeniería ambiental*: Pearson Educación, 1999.
  - [42] A. B. Martel, "Tratamiento de aguas," in *Tratamiento de Aguas*. vol. 5, ed Argentina, 2010, p. 83.
  - [43] U. P. d. Madrid. (2007, Marzo). *Distribucion normal*.
  - [44] S. O. Quintanilla, "Metodos numericos aplicados a la Ingeniería," *Ciencia & Desarrollo*, p. 10, Septiembre 2012.

## ANEXOS

### Anexo A: A fine de la dosis óptima de coagulante

Turbidez i	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez i	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez i	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez i	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)
10	6	82	31	340	50	670	71
	7		32		51		72
	8		33		52		73
	9		34		53		74
	10		35		54		75
	11		36		55		76
	12		37		56		77
	13		38		57		78
	14		39		58		79
	15		40		59		80
28	15	100	21	420	70	760	75
	16		22		71		76
	17		23		72		77
	18		24		73		78
	19		25		74		79
	20		26		75		80
	21		27		76		81
	22		28		77		82
	23		29		78		83
	24		30		79		84
46	10	180	25	500	75	840	96
	11		26		76		97
	12		27		77		98
	13		28		78		99
	14		29		79		100
	15		30		80		101
	16		31		81		102
	17		32		82		103
	18		33		83		104
	19		34		84		105
64	11	260	45	590	71	1000	76
	12		46		72		77

	13		47		73		78
	14		48		74		79
	15		49		75		80
	16		50		76		81
	17		51		77		82
	18		52		78		83
	19		53		79		84
	20		54		80		85

Fuente: Autoría propia

### Anexo B. Concentración de coagulante y turbidez final en cada repetición del afine

Turbidez i	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez f1	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez f2	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/l)	Turbidez F3
10	6	7,8	6	8,5	6	8,9
	7	8	7	8,3	7	8,7
	8	6,6	8	6,9	8	6,7
	9	7	9	7,9	9	7,2
	10	7,1	10	8	10	7,8
	11	6,8	11	8,4	11	8,6
	12	8	12	8,2	12	8,3
	13	8,3	13	8,4	13	9,1
	14	6,7	14	7,1	14	7
	15	7	15	7,2	15	7,5
28	15	8,1	15	7,1	15	8,1
	16	7,9	16	6,9	16	7,3
	17	7,3	17	6,7	17	7,8
	18	6,9	18	6,6	18	6,9
	19	8,9	19	8,3	19	8,9
	20	8,2	20	8,1	20	8,6
	21	7,1	21	7,4	21	7,9
	22	7,4	22	7,2	22	7,3
	23	7	23	6,7	23	7
24	6,4	24	6,1	24	6,4	
46	10	5,6	10	7	10	7,6

	11	7,9	11	7,2	11	8,2
	12	6,4	12	7,9	12	9,1
	13	8,9	13	7,8	13	8,8
	14	6	14	6,3	14	7,6
	15	4,7	15	5,1	15	6,2
	16	4,8	16	6,1	16	6,9
	17	6	17	5,9	17	6,6
	18	5,6	18	8,2	18	8,5
	19	6,7	19	7,1	19	7,7
64	11	4,5	11	4,7	11	4,4
	12	7,8	12	7,5	12	7,1
	13	8,9	13	8,9	13	9,3
	14	10,2	14	10	14	10,5
	15	7,8	15	5,7	15	6,3
	16	7,6	16	7,3	16	8,6
	17	8,3	17	8,1	17	8,9
	18	5,9	18	5,8	18	6,7
	19	8	19	7,6	19	7,8
	20	6,8	20	6,6	20	7,4
82	31	10,9	31	10,8	31	10,1
	32	7	32	7,5	32	7,2
	33	8,3	33	9,1	33	8,8
	34	9	34	7,9	34	7,7
	35	8,2	35	8,1	35	8,4
	36	10,3	36	8,5	36	8,2
	37	8,9	37	8,3	37	8
	38	10,2	38	10,5	38	9,9
	39	9,3	39	9,1	39	9,6
	40	9,2	40	9,9	40	10
100	21	11,7	21	10,1	21	9,9
	22	11,5	22	10,6	22	10,9
	23	11,9	23	10,2	23	11,7
	24	10,9	24	11,1	24	12,3
	25	7,7	25	9,3	25	9,6
	26	7,8	26	8,5	26	9,1
	27	5,9	27	6,1	27	6,4
	28	5,4	28	5,6	28	5,5
	29	6	29	6,4	29	6,3

Fuente: Autoría propia

	30	5,6	30	5,9	30	6
180	25	16,7	25	16,8	25	17,2
	26	16,4	26	17	26	16,8
	27	15	27	16,7	27	16,7
	28	14,4	28	15,4	28	15,6
	29	10,7	29	13,6	29	13,9
	30	12	30	13	30	12,8
	31	9,8	31	9,6	31	9,6
	32	10	32	10,7	32	10,8
	33	12	33	12,1	33	13,1
	34	11,7	34	13	34	13,7
260	45	15,6	45	16,7	45	17,3
	46	12,4	46	13,3	46	14,6
	47	13,1	47	14,7	47	15,4
	48	14,2	48	15,6	48	16,6
	49	14	49	12,6	49	12,2
	50	14,7	50	13,9	50	13,1
	51	12,5	51	10,9	51	9,9
	52	11,9	52	11,2	52	10,9
	53	11,3	53	11,9	53	11,3
	54	10,06	54	9,8	54	9,4
340	50	20,1	50	13,1	50	13,5
	51	17,3	51	16,2	51	15,9
	52	13,3	52	11,3	52	11
	53	12,1	53	10,4	53	10,6
	54	11,5	54	8,4	54	8,8
	55	10	55	8,8	55	9,1
	56	10,2	56	8,9	56	9,3
	57	9,8	57	8,2	57	8,6
	58	13,7	58	13,2	58	13,8
	59	15,3	59	11,6	59	11,7
420	70	16,1	70	14,1	70	13,6
	71	15	71	12,1	71	12,3
	72	9	72	8,7	72	9,1
	73	9,7	73	8,3	73	8,3
	74	9,3	74	9,4	74	8,7
	75	9,9	75	10,1	75	9,4
	76	8,9	76	6,6	76	6,9
	77	10,6	77	7,6	77	8,8

	78	10,3	78	8,1	78	9,3
	79	10	79	8,3	79	9
500	75	14,5	75	12,2	75	12
	76	8,2	76	10,6	76	9,9
	77	7,1	77	8,2	77	9,2
	78	5,4	78	5,3	78	5,6
	79	7	79	7,8	79	8,1
	80	6,1	80	6,9	80	7,3
	81	7,7	81	7,3	81	7,5
	82	8,4	82	10,7	82	10,3
	83	7,7	83	8,5	83	8,4
	84	6	84	7,1	84	7,2
	590	71	19,4	71	20,2	71
72		18,8	72	18,3	72	17,6
73		15,6	73	16,8	73	16,4
74		17,2	74	17,5	74	17,1
75		11	75	9,8	75	9,7
76		13,1	76	13,4	76	12,1
77		14,5	77	15	77	13,6
78		12,2	78	12,9	78	13,1
79		11,1	79	12,2	79	12,5
80		15,3	80	15,9	80	14,8
670		71	19,8	71	20,8	71
	72	13,5	72	14,9	72	15,7
	73	11	73	12,6	73	13,1
	74	13	74	13,9	74	14,2
	75	7,8	75	8,9	75	9,1
	76	7,7	76	8	76	7,9
	77	9,3	77	9,8	77	9,6
	78	12,5	78	13,3	78	12,9
	79	9	79	10,9	79	11
	80	10,2	80	11,2	80	11,3
	760	75	14,6	75	15,5	75
76		12,1	76	14,1	76	14,8
77		9,8	77	8,8	77	9
78		12	78	11	78	11,3
79		10,9	79	10,8	79	10,5
80		11	80	11,1	80	12,1

	81	11	81	11,2	81	12,4
	82	12,6	82	12,6	82	12,8
	83	9,9	83	10,2	83	10,6
	84	16,1	84	17,2	84	16,7
840	96	16,1	96	14,3	96	13,8
	97	7,9	97	7	97	7,5
	98	12,2	98	13,1	98	12,8
	99	11,7	99	11,4	99	12,1
	100	10,3	100	10,7	100	11
	101	10,6	101	11,2	101	11,9
	102	10,9	102	10,7	102	10,9
	103	10,8	103	11,6	103	11,2
	104	10	104	19,7	104	19,1
	105	13,1	105	14,8	105	15,3
1000	76	13,4	76	12,9	76	13,1
	77	7	77	8	77	8,2
	78	7,1	78	8,3	78	8,6
	79	7	79	7,6	79	7,9
	80	4,3	80	4,6	80	4,6
	81	6,7	81	4,9	81	5
	82	6,7	82	6,8	82	6,8
	83	7,4	83	6,8	83	6,7
	84	6,5	84	7,4	84	7,8
	85	6	85	7,1	85	7,5

### Anexo C. pH óptimo para cada dosis óptima

Fuente: Autoría propia



<b>Turbidez Inicial</b>	<b>Dosis óptima Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (mg/L)</b>	<b>pH óptimo</b>
10	8	7
28	24	8
46	15	7
64	11	8
82	32	7 – 7,5
100	28	6 – 6,5
180	31	7 – 7,5
260	54	5,5 – 6,5
340	57	7
420	76	7,5 – 8
500	78	8
590	75	6,5
670	76	8
760	77	7,5
840	97	8
1000	80	7,5

**Anexo D.**

**Características del Medidor Multiparámetros**

<b>Equipo</b>	Medidor Multiparámetros
<b>Modelo</b>	HI 9829
<b>Marca</b>	HANNA
<b>Parámetros medidos, rangos y unidades</b>	Turbidez (0-1000 FNU) FNU equivalente a NTU Conductividad (0-900 microsiemens/cm) Temperatura (-5 - 55 °C) pH (0-14)

**Anexo E. Medidor Multiparámetros**



Fuente: Autoría propia

#### Anexo F. Características del Espectrofotómetro

<b>Equipo</b>	Espectrofotómetro Smart de operación manual
<b>Marca</b>	LaMotte
<b>Parámetros medidos, rangos y unidades</b>	Color (0-1000 CU) equivalentes a UPC, utiliza el método platino-cobalto  Mide el color aparente

#### Anexo G. Espectrofotómetro



Fuente: Autoría propia

**Anexo H. Color inicial y final en cada repetición del afine de la dosis óptima**

Turbidez inicial (NTU)	Color inicial (UPC)	Numero de jarra	Color final1 (UPC)	Color final2 (UPC)	Color final3 (UPC)
10	22	Jarra 1	77	82	78
		Jarra 2	68	72	77
		Jarra 3	49	79	80
		Jarra 4	10	3	19
		Jarra 5	78	85	79
		Jarra 6	67	70	81
28	104	Jarra 1	67	76	81
		Jarra 2	69	73	77
		Jarra 3	40	32	29

		Jarra 4	102	103	211
		Jarra 5	25	30	30
		Jarra 6	9	13	28
46	106	Jarra 1	75	99	82
		Jarra 2	34	102	94
		Jarra 3	67	59	47
		Jarra 4	36	27	19
		Jarra 5	76	81	76
		Jarra 6	82	91	88
64	128	Jarra 1	43	44	91
		Jarra 2	32	47	105
		Jarra 3	31	58	121
		Jarra 4	61	65	58
		Jarra 5	62	65	102
		Jarra 6	32	47	18
82	551	Jarra 1	31	36	9
		Jarra 2	53	58	56
		Jarra 3	53	49	51
		Jarra 4	67	61	59
		Jarra 5	26	86	41
		Jarra 6	33	33	35
100	657	Jarra 1	80	94	93
		Jarra 2	58	41	101
		Jarra 3	57	67	103
		Jarra 4	108	81	79
		Jarra 5	73	63	85
		Jarra 6	89	65	93
180	>1000	Jarra 1	55	42	98
		Jarra 2	46	49	99
		Jarra 3	42	78	77
		Jarra 4	33	83	82
		Jarra 5	85	99	87
		Jarra 6	102	101	95
260	>1000	Jarra 1	106	70	97
		Jarra 2	82	78	79
		Jarra 3	67	185	190
		Jarra 4	64	208	210
		Jarra 5	92	91	95

		Jarra 6	82	97	99
340	>1000	Jarra 1	131	149	104
		Jarra 2	117	86	82
		Jarra 3	101	82	79
		Jarra 4	75	94	101
		Jarra 5	104	99	88
		Jarra 6	127	104	91
420	>1000	Jarra 1	102	93	90
		Jarra 2	79	69	90
		Jarra 3	55	12	84
		Jarra 4	65	55	40
		Jarra 5	87	73	71
		Jarra 6	48	72	70
500	>1000	Jarra 1	180	182	182
		Jarra 2	155	102	207
		Jarra 3	48	108	147
		Jarra 4	85	67	126
		Jarra 5	96	79	129
		Jarra 6	92	81	61
580	>1000	Jarra 1	129	93	89
		Jarra 2	92	87	83
		Jarra 3	110	91	89
		Jarra 4	101	117	94
		Jarra 5	89	76	83
		Jarra 6	82	61	48
670	>1000	Jarra 1	106	101	190
		Jarra 2	84	92	160
		Jarra 3	123	104	198
		Jarra 4	101	99	116
		Jarra 5	93	104	104
		Jarra 6	79	118	98
760	>1000	Jarra 1	133	119	102
		Jarra 2	113	121	111
		Jarra 3	115	111	101
		Jarra 4	119	115	107
		Jarra 5	123	116	113
		Jarra 6	108	88	102
840	>1000	Jarra 1	156	149	138

		Jarra 2	126	130	128
		Jarra 3	94	70	22
		Jarra 4	102	99	88
		Jarra 5	120	126	110
		Jarra 6	125	101	112
1000	>1000	Jarra 1	147	127	115
		Jarra 2	149	133	124
		Jarra 3	165	157	146
		Jarra 4	130	153	186
		Jarra 5	136	154	199
		Jarra 6	140	133	129

Fuente: Autoría propia