

**INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD EN LOS COEFICIENTES DEL
MODELO DE SAN´S PARA EL CALCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE
PARTICULAS FLOCULENTAS**

PRESENTADO POR:

ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ SANCHEZ COD. 505685

DIEGO ALEXANDER SOTELO PINEDA COD. 505682



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C.

2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

**INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD EN LOS COEFICIENTES DEL
MODELO DE SAN´S PARA EL CALCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE
PARTICULAS FLOCULENTAS**

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

PRESENTADO POR:

ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ SANCHEZ COD. 505685

DIEGO ALEXANDER SOTELO PINEDA COD. 505682

DIRECTOR PROYECTO DE GRADO

ING. DIEGO ALEJANDRO PULGARIN MONTOYA

**BOGOTÁ, D. C., NOVIEMBRE DE
2018**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	10
SINTESIS	12
INTRODUCCIÓN	13
ALCANCE	14
1. GENERALIDADES	15
1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN	15
1.2 ANTECEDENTES	15
1.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.3.1 Formulación del problema	19
1.4 OBJETIVOS	23
1.4.1 Objetivo General	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
1.5 JUSTIFICACIÓN	24
1.6 MARCO DE REFERENCIA	26
1.6.1 Marco teórico	26
2. DISEÑO METODOLOGICO	32
2.1 RECOLECCIÓN Y ORDENAMIENTO DE INFORMACIÓN	33
2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR RANGOS TÍPICOS DE LA VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD Y pH A LA ENTREDA DE LAS PLANTAS .	33
2.2.1 Paso 1	33
2.2.2 Paso 2	34
2.2.3 Paso 3	35
2.2.4 Datos pH	37
2.3 RANGO DE TURBIEDAD DEFINITIVO	39

2.4 RANGO DE PH DEFINITIVO	40
2.5 PREPARACIÓN DEL AGUA PROBLEMA	42
2.5.1 Dosificación bentonita	42
2.5.2 Determinación de alcalinidad	43
2.5.3 Cantidad de coagulante	44
2.5.4 Parámetros de la muestra.....	44
2.5.5 Parámetros de mezcla.....	45
2.5.6 Prueba de sedimentación	46
2.5.7 Construcción de Curvas de Iso-concentración	46
2.5.8.1 Pasos para la regresión lineal	47
2.5.8.2 Regresión lineal.....	48
2.6 COAGULACIÓN.....	48
2.3.2 Instalaciones Y equipo requerido	49
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1 TOMA DE MUESTRAS EN LABORATORIO	51
3.1.1. Turbiedad NTU 2 (Rango 0.6-2.66)	51
3.1.2. Turbiedad NTU 4 (Rango 2.66-4.73)	54
3.1.3. Turbiedad NTU 6.1 (Rango 4.73-6.8)	55
3.1.4. Turbiedad NTU 8.8 (Rango 6.8-8.87)	59
3.1.5. Turbiedad NTU 9.1 (Rango 8.87-10.94)	62
3.1.6. Turbiedad NTU 11.8 (Rango 10.94-13.0)	64
3.1.7. Turbiedad NTU 14.9 (Rango 13.0-15.07)	66
3.2 CREACIÓN DE ECUACIONES.....	69
3.2.1 Pasos para la regresión lineal	70

3.2.2 Regresión lineal.....	71
4. ANALISIS DE RESULTADOS	74
4.1 PRUEBA DE LAS ECUACIONES ENCONTRADAS	74
4.1.1 tabla teórica porcentaje de remoción (2 NTU).	74
4.1.2 tabla teórica porcentaje de remoción (4 NTU).	75
4.1.3 tabla teórica porcentaje de remoción (6.1 NTU).	76
4.1.4 tabla teórica porcentaje de remoción (8.8 NTU).	77
4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (9.1 NTU).	78
4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (11.8 NTU).	79
4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (14.9 NTU).	80
4.2 COMPORTAMIENTO DE LAS ECUACIONES.....	80
5. CONCLUSIONES.....	83
6. RECOMENDACIONES	84
Bibliografía.....	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 DIAGRAMA DE FLUJO PASO A PASO.....	32
FIGURA 2. COMPORTAMIENTO DE LA TURBIEDAD	37
FIGURA 3. COMPORTAMIENTO DEL PH.....	38
FIGURA 4: TORRE SEDIMENTACIÓN LABORATORIO U CATÓLICA.	49
FIGURA 5. TORRE DE SEDIMENTACIÓN.....	50
FIGURA 6.MATRAZ.....	50
FIGURA 7.BALANZA DE PRECISIÓN	50
FIGURA 8.VASO DE PRECIPITACIÓN	50
FIGURA 9.TURBIDIMETRO	50
FIGURA 10.BURETA.....	50
FIGURA 11.CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 4.....	53
FIGURA 12: CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 4	55
FIGURA 13: CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 6.1	58
FIGURA 14: CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 8.8	61
FIGURA 15. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 9.1	63
FIGURA 16. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 11.	66
FIGURA 17. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN NTU 14.9	69
FIGURA 18. COMPORTAMIENTO COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE	81
FIGURA 19. COMPORTAMIENTO DE VARIABLE A	81
FIGURA 20 COMPORTAMIENTO DE VARIABLE B	82
FIGURA 21. COMPORTAMIENTO DE VARIABLE K	82

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. RECOPIACIÓN RESULTADOS TURBIEDAD	35
TABLA 2. RANGOS TURBIEDAD	36
TABLA 3. RECOPIACIÓN DATOS PH	37
TABLA 4. RANGOS PH.....	38
TABLA 5: DEFINICIÓN DE INTERVALOS TURBIEDAD	39
TABLA 6: DEFINICIÓN DE RANGOS TURBIEDAD.....	39
TABLA 7: RANGOS FINALES	40
TABLA 8: DEFINICIÓN DE INTERVALOS PH.....	41
TABLA 9: DEFINICIÓN PH ÓPTIMO	41
TABLA 6. DOSIS BENTONITA.....	43
TABLA 7: TURBIEDAD 2 NTU (DATOS LABORATORIO)	51
TABLA 8: PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 2	52
TABLA 9: TURBIEDAD 4 NTU (DATOS LABORATORIO).....	54
TABLA 10: PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 4	54
TABLA 11: TURBIEDAD 6.1 NTU (DATOS LABORATORIO)	56
TABLA 12: PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 6.1	57
TABLA 13: TURBIEDAD 8.8 NTU (DATOS LABORATORIO).....	59
TABLA 14: PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 8.8	60
TABLA 15. TURBIEDAD 9.1 NTU (DATOS LABORATORIO)	62
TABLA 16. PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 9.1	62
TABLA 17. TURBIEDAD 11.8 NTU (DATOS LABORATORIO).....	64
TABLA 18. PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 11.8	65
TABLA 19. TURBIEDAD 14.9 NTU (DATOS LABORATORIO	67
TABLA 20. PORCENTAJE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS NTU 14.9	68
TABLA 21. VALORES DE A, B Y K	71
TABLA 22. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE	73
TABLA 27. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (2 NTU).....	74
TABLA 28. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (4 NTU).....	75

TABLA 29. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (6.1 NTU).....	76
TABLA 30. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (8.8 NTU)	77
TABLA 31. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (9.1 NTU).....	78
TABLA 32. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (11.8 NTU).....	79
TABLA 33. PORCENTAJE DE REMOCIÓN TEÓRICO (14.9 NTU).....	80

GLOSARIO

AGUA POTABLE: Se denomina agua potable al agua que ha recibido un tratamiento destinado a hacerla apta para el consumo humano, para lo cual se toman en cuenta todos sus usos domésticos. (CEPIS 2002).

ALCALINIDAD: La capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. (Beltran 2011).

BENTONITA: Es una arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro. (Ripe 2014).

COAGULANTE: químico que, al agregarse en el agua, vuelve fácil la adherencia entre partículas. (Farrás 205).

CURVAS DE ISOCONCENTRACIÓN: Son curvas características del sistema de sedimentación tipo II, que definen el porcentaje de remoción y la tasa de sedimentación. (Portilla 2017)

FLOCULACIÓN: es una operación muy importante cuando tenemos coloides presentes en el agua. Los coloides son partículas netamente cargadas, por lo que no sedimentan por sí mismas. Mediante la adición de coagulantes y floculantes, conseguimos desestabilizar estas cargas y posibilitamos que estas partículas sedimenten. (Portilla 2017).

SEDIMENTACIÓN: Es un proceso natural en el cual por efecto de gravedad el material particulado presenta una decantación luego de haber sufrido un

movimiento o transición por factores de un agente externo tal como un fenómeno natural *ya sea viento, lluvia, variación de la temperatura o también por arrastre o erosión* (Beltran 2011).

TORRE DE SEDIMENTACIÓN: estructura que permite los ensayos de laboratorio de la sedimentación tipo II. (Portilla 2017)

TURBIEDAD: La falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. (Beltran 2011).

TURBIDÍMETRO: es un medidor portátil con una gran pantalla que cumple todas las exigencias para medir la turbidez in situ. (Portilla 2017)

SINTESIS

Se realizó un estudio detallado, de la variación del porcentaje de remoción de partículas, para determinadas turbiedades reales. Todo con el fin, de encontrar los coeficientes exactos para la ecuación de Sans'. Se tomaron los datos de 4 plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) de Cundinamarca; y se prepararon, en el laboratorio, los diferentes tipos de agua con su respectiva turbiedad, utilizando como dosificador bentonita (arcilla activada que ayuda a generar una mayor turbiedad). Finalmente, se realizó el test de jarras para cada muestra con la torre de sedimentación.

Con los datos encontrados se realizaron las curvas de iso-concentración, se hizo una regresión múltiple para encontrar los coeficientes necesarios, que nos generara la ecuación precisa para cada turbiedad. Ya con los datos encontrados; se analizaron las ecuaciones, se construyó la tabla de porcentaje de remoción teórico, y se identificó una correlación entre el porcentaje de remoción de partículas teórico y experimental.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se basa fundamentalmente en el análisis del modelo de la ecuación de Sans' (1989), que estudia los porcentajes de remoción de partículas flocúlenas del agua en condiciones normales, en un punto de captación. Aunque se tienen diversas metodologías para calcular este porcentaje, el presente documento se centrará en la metodológica de Sans' (1989). Claramente este estudio debe basarse en datos reales, por lo cual se tiene como base los datos reportados de diferentes plantas de tratamiento de agua potable – PTAP y así lograr el análisis deseado. Todas las muestras desarrolladas en laboratorio se simularon, acorde a las condiciones reales encontradas en las fuentes hídricas de estudio, a fin de obtener resultados reales para presentar un criterio de evaluación con respecto al modelo de la ecuación de Sans'.

De manera general se tendrá que realizar un proceso a las muestras, que consiste en coagulación, floculación y sedimentación, en la torre de sedimentación adoptada para este caso. Este proceso será el eje del estudio, por lo tanto, durante este desarrollo se tendrán diferentes estados de las muestras los cuales serán registrados, para posteriormente obtener curvas de Iso-concentración y de esta manera estudiar la ecuación de Sans' (1989), en diferentes rangos de turbiedad, que por condiciones reales de las fuentes hídricas tendrán niveles bajos de turbiedad y de esta manera evaluar el comportamiento de esta ecuación en condiciones de concentración de turbiedad inferiores a las planteadas en diferentes estudios.

ALCANCE

Se realizarán 7 ensayos de laboratorio con diferentes rangos de turbiedad, utilizando la torre de sedimentación. Se simulará el agua problema y se crearan las curvas de iso- concentración para cada una de las turbiedades. Con los datos encontrados se realiza el ajuste lineal múltiple, para llegar a la conclusión de las ecuaciones y su respectivo comportamiento.

1. GENERALIDADES

1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN

Línea de recursos hídricos y de ambiente, aceptado por la Universidad Católica de Colombia.

1.2 ANTECEDENTES

La sedimentación es un proceso natural en el cual por efecto de gravedad el material particulado presenta una decantación luego de haber sufrido un movimiento o transición por factores de un agente externo tal como un fenómeno natural *ya sea viento, lluvia, variación de la temperatura o también por arrastre o erosión* (Beltran 2011). De manera general la sedimentación se presenta en el transporte de material particulado en una corriente hídrica y que se lleva hasta un punto determinado de depósito ya sea natural o artificial. En consecuencia, la sedimentación es utilizada en el ámbito hidráulico e hidrológico para la potabilización del agua, proceso que se realiza en las plantas de tratamiento de agua potable (en adelante denominado PTAP). (Sáenz 1995)

Se puede determinar que los sedimentos son material particulado que durante un tiempo determinado sufre el proceso de decantación y posterior acumulación de dicho material particulado, que para el caso del presente estudio se convierte en el material removido ya sea artificial o naturalmente de las muestras de agua a ser analizado.

Actualmente se tiene de referencia cuatro tipos de sedimentación como fenómenos diferentes entre ellos:

Sedimentación tipo I: Es aquella que tiene una baja concentración de material

particulado y que además su tendencia es a decantarse de manera independiente y nunca presenta interacción o tendencia sedimentaria entre partículas. (Pérez 1992).

Sedimentación tipo II: Se conoce como sedimentación floculante y se caracteriza por contener un agente externo (material floculante) que genera químicamente una atracción entre las partículas y de esta manera se genera material particulado con una mayor dimensión y mayor peso, haciendo que este tipo de sedimentación presente una aceleración de decantación con respecto a los demás tipos.

Sedimentación tipo III: Se conoce como sedimentación retardada y se caracteriza principal porque entre las mismas partículas se obstaculizan entre si retardando la decantación, por lo general las partículas tienen diferentes tamaños. Este tipo de sedimentación se ve por lo general en fuentes hídricas naturales y lagunas a las que le llega una gran cantidad de material particulado para su respectiva decantación. (Pérez 1992)

Sedimentación tipo IV: La característica fundamental de este tipo de sedimentación es la gran concentración de material particulado generando una mayor precipitación de dicho material y posterior compactación de manera que garantice la mayor eliminación de aire en una sedimentación. (Pérez 1992)

Luego de un análisis de los tipos de sedimentación se opta por tomar como base para el presente estudio la sedimentación tipo II, la cual presenta los parámetros deseados para determinar la turbiedad en una muestra. Algunas de las características que favorecen el presente estudio son:

La suspensión diluida de las partículas floculantes durante el tiempo de sedimentación las partículas tienden a aglomerarse de tal manera que aumenta el volumen y peso de estas garantizando una mejor sedimentación.

Debido a la aglomeración presenta modificación de sus características físicas durante el proceso aumentado sus dimensiones y peso, lo cual garantiza una mejor decantación de estas.

De manera general el material orgánico e inorgánico que está presente en fuentes hídricas tienen propiedades aglomerantes, como por ejemplo arenas o lodos.

Perturbaciones en la fuente hídrica como variación en el caudal de la fuente o variación en los vientos que aumenta el contacto entre las partículas facilitando su aglomeración.

El Test de sedimentación tiene como base el ensayo de laboratorio conocido como Test de Jarras ensayo de laboratorio adecuado para validar las características anteriormente mencionadas. Este test de Jarras se utiliza para determinar la dosis adecuada de coagulante para ser utilizado en una PTAP. Su particularidad se fundamenta en que mediante la utilización de un agente coagulante que interactúan químicamente durante la agitación del agua muestra, generando una interacción química entre el material particulado que contiene dicha muestra creando partículas de mayor dimensión y peso, el cual genera nuevas partículas favoreciendo la decantación durante la sedimentación. Durante la transición entre la etapa de coagulación mediante el test de jarras e inicio de la etapa de sedimentación, se debe tomar los niveles de turbiedad inicial y posteriormente tomar estos datos en los tiempos deseados. Paso siguiente se logra determinar el porcentaje de remoción de partículas. (Moreno 2014)

El porcentaje de remoción de partículas en la sedimentación tipo II se determina mediante la recolección previa de las turbiedades a diferentes alturas y tiempos. Con base en lo anterior se toma como referencia inicial la turbiedad determinada en el tiempo inicial que para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas se denomina como C_0 , paso siguiente es el de identificar la turbiedad en los diferentes

tiempos que se denomina como C. De esta manera al tener el valor de C y Co, se procede a evaluar cada uno de los porcentajes de remoción de partículas en los diferentes tiempos y profundidades.

$$\% \text{Remoción} = \left(\frac{C - C_0}{C_0} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Con la anterior ecuación se estima que los porcentajes de remoción sean directamente proporcionales al tiempo que transcurre la sedimentación con respecto a la profundidad, es decir, que entre mayor se al tiempo de sedimentación a una mayor profundidad, mayor será el porcentaje de remoción de partículas.

Ahora bien, el procedimiento para determinar los niveles de turbiedad de una población (fuente hídrica objeto del análisis) se basa en utilizar un Turbidímetro que determina la intensidad de un rayo de luz que atraviesa una muestra de dicha población, este rayo se radia a 90 grados a fin de obtener la mejor revisión posible de la totalidad de la muestra. Las unidades obtenidas en dicho ensayo de laboratorio son NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

Entonces dados los parámetros iniciales que estarán contenidos en cada una de las muestras de laboratorio y sus respectivos resultados, se hace imperativo la identificación de un modelo a desarrollar a fin de obtener los datos deseados. Por lo tanto, se hace la identificación de diferentes modelos de análisis del porcentaje de remoción de partículas, los cuales unos se basan en determinar una ecuación que cumpla con los parámetros determinados y otros que se desarrollan con base en metodología gráfica y que presentan sus resultados aproximados.

Sans´ (1989)

Montgomery (1979)

Berthouex y Stevens (1982)

Ozer's (1994)

Piro y compañeros (2011)

Ramatsoma y Chirwa's (2012)

Los modelos anteriormente mencionados tienen la misma validez, no obstante, cada uno de estos contempla constantes o metodologías particulares propios de las condiciones particulares en que se analice las muestras de agua deseadas o los resultados.

Para el caso particular del presente estudio se toma como base la ecuación del modelo de Sans' (1989), ya que esta, contiene variables que también están determinadas en el test de sedimentación. Dicha ecuación del modelo de Sans' (1989) presenta como particularidad dentro de sus variables la profundidad y el tiempo de decantación de las partículas de las diferentes muestras, de igual forma esta ecuación contiene tres constantes que al ser analizadas se evidencia que estas parametrizan la ecuación en función de la variables, es decir, que para obtener porcentajes acordes a las turbiedades estudiadas, se necesita que la relación tiempo profundidad se constante y se mantenga la misma proporción durante la totalidad del análisis. (SITHEBE 2013)

$$\%P = \frac{T^b}{\alpha H^k + T^b} \quad \text{Ecuación 2}$$

1.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Formulación del problema

La turbiedad depende directamente de las condiciones propias de las fuentes hídricas y sus diferentes afluentes, generando características propias en cada una de estas, de lo cual uno de los principales análisis que se deben desarrollar en las PTAP es el del porcentaje de remoción de partículas que depende directamente de identificar los niveles de turbiedad.

Con base en las necesidades previamente establecidas toda PTAP está obligada a realizar una recopilación de datos a la entrada de la planta a fin de identificar la tendencia de los diferentes parámetros químicos y físicos del agua captada. Para el paso particular se revisará únicamente la tendencia de la turbiedad en las fuentes hídricas. Una vez se cuente con los datos deseados se procede a realizar el respectivo análisis de estos con base en el modelo planteado.

Ahora bien, bajo la premisa inicial de este estudio que es el de evaluar el comportamiento de la turbiedad con el modelo de la ecuación de Sans' (1989), se evidencia la tendencia de los datos estudiados previamente en este modelo, los cuales fundamentalmente contienen altas niveles de concentraciones de turbiedad en los estudios hechos, por consiguiente uno de los principales resultados de la evaluación del modelo de Sans' es que su estudio lo basa en niveles de turbiedad superiores a 20 NTU, lo que indica que la ecuación presenta resultados eficientes en dichos niveles. (San, Analytical approach for evaluation of settling column data 1994)

Los niveles elevados de turbiedad son característicos de fuentes hídricas de zonas de planicie, de los cuales sus ríos se caracterizan por lo general en que han tenido un gran recorrido y por consiguiente contienen una mayor cantidad de material por efectos de arrastre. Sin embargo, la demografía colombiana presenta grandes variaciones en su territorio, generando con esto condiciones totalmente diferentes dependiendo de la zona de análisis. Como se mencionó anteriormente la ecuación de Sans' aplica perfectamente para ríos que contengan niveles de turbiedad a 20 NTU es decir, ríos de planicies y llanuras, sin embargo no se evidencia un estudio detallado del comportamiento de dicho modelo en fuentes hídricas con condiciones diferentes, como por ejemplo que los ríos que contengan niveles de turbiedad por debajo de lo expuesto.

Por lo general los ríos que contienen niveles bajos de turbiedad son ríos de montaña, los cuales no han estado expuestos a recorridos largo, y por consiguiente no contienen grandes cantidades de material de arrastre y por otro lado no han sufrido de contaminación por parte de agentes externos. Es así como se evidencia que las condiciones favorables que tienen este tipo de ríos para la potabilización. De tal modo que las buenas características desde el punto de vista de turbiedad en los ríos de montaña han hecho que los diferentes modelos desarrollados para determinar el porcentaje de remoción de partículas desprecien el tipo de condiciones encontradas en dichos ríos.

De tal modo que se hace necesario conocer el comportamiento en este caso del modelo de Sans' en condiciones de turbiedad bajas, dado que se generan algunas incógnitas en cuenta al comportamiento de las diferentes variable y constantes que presenta el modelo, como por ejemplo cual es el comportamiento de los coeficientes del modelo si se varia la turbiedad inicial en rangos bajos o también si la variación de los rangos es directamente proporcional con la influencia de los coeficientes en la ecuación.

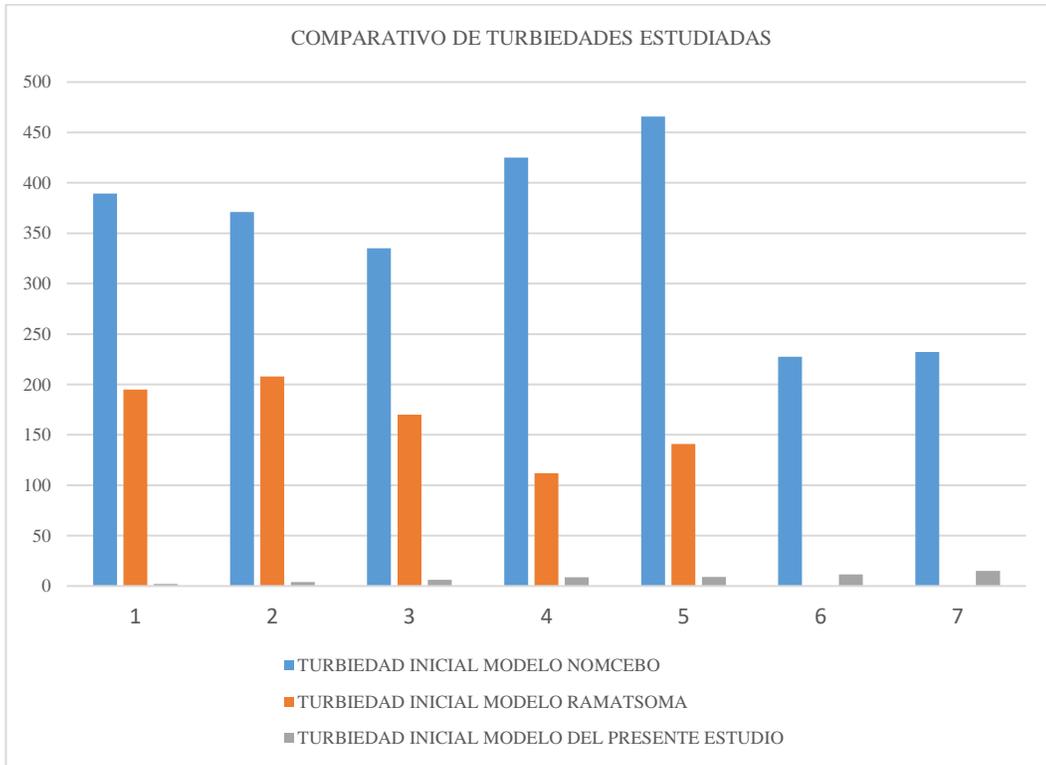
Es de resaltar la diferencia entre el presente estudio y los anteriores a este, pues las turbiedades que ingresan a las plantas no son tan altas.

Tabla 1. Comparación de turbiedades estudiadas

Turbiedad inicial modelo Nomcebo	Turbiedad inicial modelo Ramatsoma	Turbiedad inicial modelo del presente estudio
389,5	195,0	2,0
371,1	208,0	4,0
335,0	170,0	6,1
425,0	112,0	8,8
465,73	141,0	9,1
227,5	-	11,6
232,3	-	14,9

Fuente: (Autores 2018)

Figura 1. Comparación de turbiedades estudiadas



Fuente: (Autores 2018)

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Determinar la influencia que tiene la variación de la turbiedad inicial del agua en los coeficientes de la ecuación de Sans' (1989) para el cálculo de porcentaje de remoción de partículas floculantes

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento histórico de las variaciones que presenta la turbiedad en la entrada de cuatro plantas de agua potable ubicadas en el departamento de Cundinamarca, de tal manera que se puedan determinar los rangos típicos de turbiedad que ingresan a estas plantas.
- Construir las curvas de Iso-concentración para los rangos de turbiedad de mayor frecuencia que se presentan al ingreso de las cuatro plantas ubicadas en el departamento de Cundinamarca.
- Calcular los coeficientes del modelo de Sans' (1989), para cada una de las curvas de Iso-concentración.
- Determinar la influencia que tiene la turbiedad en los coeficientes del modelo se Sans'.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Existen diferentes investigaciones, acerca de la influencia de la turbiedad para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas. Pero se han usado turbiedades muy altas; En esta investigación se usaron turbiedades reales, lo que permite indagar y precisar un efectivo resultado. La necesidad se centra en obtener una ecuación, que nos sirva en la calibración del sistema, en las plantas de tratamiento de agua potable. por tal motivo se usaron dichos datos de plantas de Cundinamarca. Cabe aclarar que dicha ecuación se usara única y exclusivamente para determinados rangos de turbiedad; porque se sabe que la calidad del agua es muy cambiante conforme al territorio en el que se encuentra.

Presentadas las condiciones hidrológicas e hidráulicas de las zonas de montaña del departamento de Cundinamarca, se evidencia claramente que la riqueza hídrica de este departamento en la actualidad, es abundante y como característica principal es el nivel de pureza que se encuentra en dichas fuentes, de lo cual se concluye que los niveles de turbiedad a ser encontrados en estas fuentes son bajos con respecto a otras fuentes en zonas con características totalmente diferentes, como por ejemplo en zonas de planicie y llanura.

Por otro lado, se conoce el modelo de la ecuación de Sans' que fundamentalmente se basa en dos parámetros, uno es el tiempo de decantación y el otro es la profundidad a la que estarán expuestas las partículas. Este modelo como algunos otros evidencian un análisis detallado para porcentajes de remoción de partículas en niveles de turbiedad relativamente altos, sin embargo, al tener fuentes hídricas con condiciones totalmente diferentes a las planteadas se hace imperativo la investigación del comportamiento de este modelo en condiciones de ríos de montaña, los cuales se caracterizan fundamentalmente en contener niveles de turbiedad bajos y por consiguiente los porcentajes de remoción de partículas no evidencian mayores variaciones.

Otro aspecto importante es el de analizar si para el modelo de Sans' se tiene alguna relación directa entre los niveles de turbiedad y los coeficientes que se presentan en su modelo, es decir, y al presentar variaciones en la turbiedad se afecta directamente estos modelos. De lo anterior teóricamente se podría inferir de manera inicial, que no debe existir ningún tipo de variación, no obstante, como se mencionó anteriormente no se evidencia análisis importantes del modelo en condiciones como las planteadas en este estudio, así pues, se espera obtener un resultado que afirme la hipótesis y se pueda concluir que los niveles de turbiedad son directamente proporcionales a los coeficientes del modelo. De llegar a identificarse lo opuesto a la hipótesis planteada se podría afirmar que el modelo no se afecta directamente por las condiciones de la fuente hídrica **y**, por lo tanto, se debe afirmar que el modelo es idóneo para determinar en cualquier condición el porcentaje de remoción de partículas.

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1 Marco teórico

1.6.1.1 Sedimentación

“El proceso de sedimentación en una planta de tratamiento de agua potable convencional es en general el principal responsable en remoción de partículas causantes de turbiedad y color.” (Pignatta 1998) . Dado lo anterior, la sedimentación tiene como función principal el de garantizar una adecuada decantación del material particulado. Así pues, se puede afirmar que la sedimentación es un proceso que se genera por efectos de gravedad y depende directamente del tamaño y peso de las partículas, dicho material se presenta de diversas maneras, creando un proceso de sedimentación paulatina y dependiente del tipo de partículas.

Por otro lado, el material particulado a ser sedimentado se considera como impurezas de las fuentes hídricas y que dependiendo de su estado presenta variaciones en tiempo modo de sedimentación. *“Las impurezas naturales pueden encontrarse en las aguas según tres estados de suspensión en función del diámetro. Éstos son:”*

- a) *Suspensiones hasta diámetros de 10⁻⁴ cm.*
- b) *Coloides entre 10⁻⁴ y 10⁻⁶ cm.*
- c) *Soluciones para diámetros aún menores de 10⁻⁶ cm.*

Estos tres estados de dispersión dan igual lugar a tres procedimientos distintos para eliminar las impurezas. El primero destinado a eliminar las de diámetros mayores de 10⁻⁴ cm. constituye la "sedimentación simple". El segundo implica la aglutinación de los coloides para su remoción a fin de formar un "floc" que pueda sedimentar. Finalmente, el tercer proceso, que esencialmente consiste en transformar en insolubles los compuestos solubles, aglutinarlos para formar el "floc" y permitir así

la sedimentación.” (Farrás 205)

También se tiene de referencia cuatro tipos de sedimentación como fenómenos diferentes entre ellos:

Sedimentación tipo I: Es aquella que tiene una baja concentración de material particulado y que además su tendencia es a decantarse de manera independiente y nunca presenta interacción o tendencia sedimentaria entre partículas. (Pérez 1992)

Sedimentación tipo II: Se conoce como sedimentación floculante y se caracteriza por contener un agente externo (material floculante) que genera químicamente una atracción entre las partículas y de esta manera se genera material particulado con una mayor dimensión y mayor peso, haciendo que este tipo de sedimentación presente una aceleración de decantación con respecto a los demás tipos.

Sedimentación tipo III: Se conoce como sedimentación retardada y se caracteriza principal porque entre las mismas partículas se obstaculizan entre si retardando la decantación, por lo general las partículas tienen diferentes tamaños. Este tipo de sedimentación se ve por lo general en fuentes hídricas naturales y lagunas a las que le llega una gran cantidad de material particulado para su respectiva decantación. (Pérez 1992)

Sedimentación tipo IV: La característica fundamental de este tipo de sedimentación es la gran concentración de material particulado generando una mayor precipitación de dicho material y posterior compactación de manera que garantice la mayor eliminación de aire en una sedimentación. (Pérez 1992)

1.6.1.2 Test de Jarras

“El ensayo de jarras es utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable para hallar la dosificación del agente coagulante. Este ensayo es de bastante simplicidad y verifica solamente la variación del pH y la relaciona con la formación del floc, debido a que en el proceso de coagulación influyen muchas variables el proceso no ha podido estandarizarse; en este también influye el tipo de floculado y las características propias de cada uno de los mezcladores, pero para efectos prácticos el ensayo se hace a determinado número de revoluciones por minuto y se asumen los valores más óptimos de floculante en la jarra en la que se note como se formó más rápido y son de mayor tamaño las partículas de floc” (Ripe 2014)

En conclusión, para el presente estudio el test de jarras es un procedimiento el cual presenta como resultado los parámetros en que deben ser tratados las muestras a utilizar, las cuales en lo posible se simulan las condiciones reales encontradas en las diferentes fuentes hídricas.

1.6.1.3 Plantas de tratamiento de agua potable

Son estructuras de gran envergadura, cuyo fin es el buen tratamiento de agua, apta para consumo humano. El paso del agua por la planta consta de varias fases, dentro de las cuales esta:

Captación: es la primera fase, y en ella se extrae el agua de determinada fuente hídrica, ya sea quebrada, rio, o porque no una fuente subterránea.

Coagulación: esta es la fase donde se añade el producto coagulante, con el fin, de generar floc para que posteriormente se sedimenten, y el agua mejore su calidad. La mayor cantidad de partículas que se sedimentan son arcillas de mayor tamaño y peso. *“Esta aglomeración permite la clarificación del agua”* (Fibras y Normas 2017). Este proceso se lleva a cabo mediante una mezcla rápida y después pasa a una

mezcla lenta, donde se le añade “un polímero que actúa como floculante, el cual produce la agregación de los floculos, formando partículas de mayor peso y tamaño”. (Triple A S.A. E.S.P. 2016)

“La coagulación es un proceso que implica muchas reacciones de transferencia de masa. El proceso consta de varias etapas: 1) la desestabilización de las partículas, lo que permite 2) la interacción contaminante-coagulante y 3) favorece la agrupación de partículas (ofloculación)”. (Ripe 2014)

Sedimentación: “El proceso de sedimentación en una planta de tratamiento de agua potable convencional es en general el principal responsable en remoción de partículas causantes de turbiedad y color.” (Pignatta 1998) . Dado lo anterior, la sedimentación tiene como función principal el de garantizar una adecuada decantación del material particulado. Así pues, se puede afirmar que la sedimentación es un proceso que se genera por efectos de gravedad y depende directamente del tamaño y peso de las partículas, dicho material se presenta de diversas maneras, creando un proceso de sedimentación paulatino y dependiente del tipo de partículas.

Por otro lado, el material particulado a ser sedimentado se considera como impurezas de las fuentes hídricas y que dependiendo de su estado presenta variaciones en tiempo modo de sedimentación. “Las impurezas naturales pueden encontrarse en las aguas según tres estados de suspensión en función del diámetro. Éstos son”

- a) Suspensiones hasta diámetros de 10^{-4} cm.
- b) Coloides entre 10^{-4} y 10^{-6} cm.
- c) Soluciones para diámetros aún menores de 10^{-6} cm.

Estos tres estados de dispersión dan igual lugar a tres procedimientos distintos para eliminar las impurezas. El primero destinado a eliminar las de diámetros mayores

de 10-4 cm. constituye la "sedimentación simple". El segundo implica la aglutinación de los coloides para su remoción a fin de formar un "floc" que pueda sedimentar. Finalmente, el tercer proceso, que esencialmente consiste en transformar en insolubles los compuestos solubles, aglutinarlos para formar el "floc" y permitir así la sedimentación." (Farrás 205)

También se tiene de referencia cuatro tipos de sedimentación como fenómenos diferentes entre ellos:

Sedimentación tipo I: Es aquella que tiene una baja concentración de material particulado y que además su tendencia es a decantarse de manera independiente y nunca presenta interacción o tendencia sedimentaria entre partículas. (Pérez 1992)

Sedimentación tipo II: Se conoce como sedimentación floculante y se caracteriza por contener un agente externo (material floculante) que genera químicamente una atracción entre las partículas y de esta manera se genera material particulado con una mayor dimensión y mayor peso, haciendo que este tipo de sedimentación presente una aceleración de decantación con respecto a los demás tipos.

Sedimentación tipo III: Se conoce como sedimentación retardada y se caracteriza principal porque entre las mismas partículas se obstaculizan entre si retardando la decantación, por lo general las partículas tienen diferentes tamaños. Este tipo de sedimentación se ve por lo general en fuentes hídricas naturales y lagunas a las que le llega una gran cantidad de material particulado para su respectiva decantación. (Pérez 1992)

Sedimentación tipo IV: La característica fundamental de este tipo de sedimentación es la gran concentración de material particulado generando una mayor precipitación de dicho material y posterior compactación de manera que garantice la mayor eliminación de aire en una sedimentación. (Pérez 1992).

1.6.1.2 Alcalinidad

Se define como la capacidad el agua en neutralizar los ácidos que están en esta. De manera general los ácidos están compuestos por sales que se disuelven en las diferentes muestras de agua, los a cuáles se contrarrestan con las bases, sin embargo, las base se comportan como agente eliminador del ácido siempre y cuando se maneje en las proporciones necesarias. El agua se clasifica en diferentes niveles dependiendo de la alcalinidad inicial que tenga.

Para el ensayo de laboratorio se determina de manera general utilizar un químico que reaccione con el ácido o con la base, de tal manera que al identificar qué tipo de agente contiene el agua se puede atacar con el apuesto y de esta manera determinar la cantidad de agente opuesto se debe agregar al agua para lograr neutralizarla de tal manera que conserve un PH mínimo de 7.

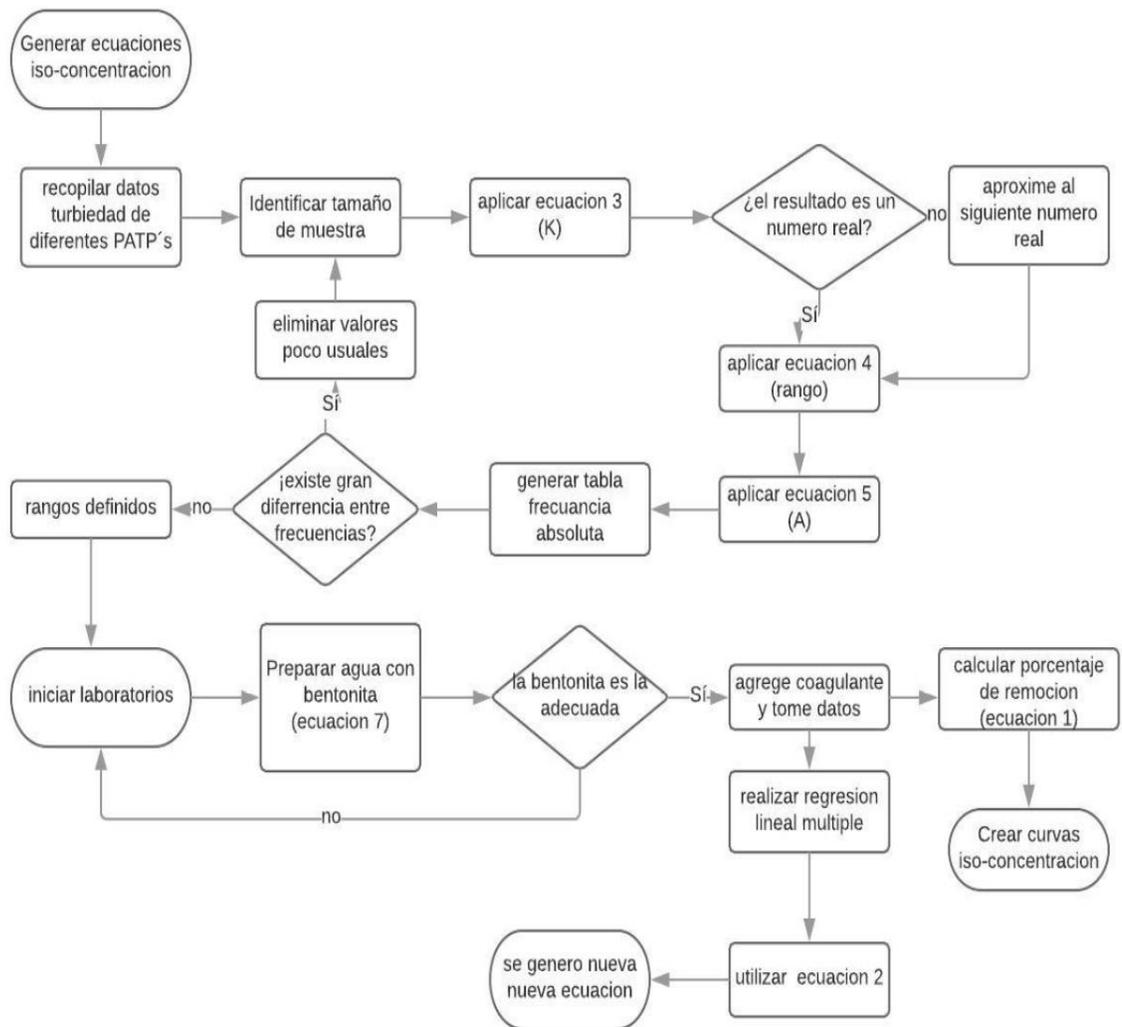
1.6.1.3 Test de Jarras

“El ensayo de jarras es utilizado en las plantas de tratamiento de agua potable para hallar la dosificación del agente coagulante. Este ensayo es de bastante simplicidad y verifica solamente la variación del pH y la relaciona con la formación del floc, debido a que en el proceso de coagulación influyen muchas variables el proceso no ha podido estandarizarse; en este también influye el tipo de floculado y las características propias de cada uno de los mezcladores, pero para efectos prácticos el ensayo se hace a determinado número de revoluciones por minuto y se asumen los valores más óptimos de floculante en la jarra en la que se note como se formó más rápido y son de mayor tamaño las partículas de floc” (Ripe 2014). En conclusión, para el presente estudio el test de jarras es un procedimiento el cual presenta como resultado los parámetros en que deben ser tratados las muestras a utilizar, las cuales en lo posible se simulan las condiciones reales encontradas en las diferentes fuentes hídricas.

2. DISEÑO METODOLOGICO

Los pasos Principales para el desarrollo del presente estudio se definen en la siguiente figura:

Figura 2 Diagrama de Flujo paso a paso



Fuente: (Autores 2018)

El anterior diagrama de flujo se creó en la plataforma lucid chart.

2.1 RECOLECCIÓN Y ORDENAMIENTO DE INFORMACIÓN

Con el objetivo de realizar un proyecto con datos reales para obtener una correcta muestra, se recolectó la información de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), de 4 municipios del departamento de Cundinamarca los cuales son: Bogotá, Facatativá, Madrid y Chipaque. La información fue extraída de la plataforma *sistema único de información de servicios públicos domiciliarios (SUI)*. La información que nos entrega esta página es netamente numérica, correspondiente a la toma de datos en la entrada de agua de la planta. Se encuentran datos como: caudal, nombre de captación, Ph, coliforme, oxígeno disuelto, turbiedad, nitrito, hierro, manganeso, entre otros. Tomados en diferentes periodos del año anterior (2017).

Los datos de relevancia para la investigación son el ph y la turbiedad, para generar una unificación se generaliza la información de las cuatro plantas, se revisa preliminarmente la totalidad de los datos y se desprecia los atípicos, los cuales no presentan una frecuencia o repetición constante.

2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR RANGOS TÍPICOS DE LA VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD Y pH A LA ENTREDA DE LAS PLANTAS

El método estadístico que se utilizara determinara la cantidad de valores que mayor frecuencia presentan. En una muestra que tiene cierta cantidad de datos

2.2.1 Paso 1.

Se identifica la cantidad de datos a trabajar ya sea de turbiedad o ph. Al número de datos de la muestra se llamará N, con este factor se calcula el número de intervalos con la siguiente formula:

(Hernandez 2016)

$$\# \text{ intervalos} = 1 + (3.3 * \log_{10}(N)) \quad \text{Ecuación 3}$$

Para el estudio, el número de datos es 2056, por ende, la forma de aplicar la

anterior ecuación sería la siguiente:

$$\# \text{ intervalos} = 1 + (3.3 * \log_{10}(2056))$$

$$\# \text{ intervalos} = 11.93 \text{ aprox } 12$$

Como se puede apreciar en el anterior resultado, se debe aproximar el número de intervalos a un número real.

2.2.2 Paso 2

Conociendo el número de intervalos, se procede a calcular el rango; esta es una variable que se necesita para encontrar la amplitud. El rango se calculó ubicando la muestra de manera ascendente, de tal manera que se pudiese conocer el valor mayor y el menor, ya conocidos estos dos valores se calcula la diferencia entre estos dos.

$$\text{Rango} = \text{mayor valor de muestra} - \text{menor valor de muestra} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para el presente estudio la forma adecuada de utilizar la anterior ecuación es la siguiente:

$$\text{Rango} = 70 \text{ NTU} - 0.6 \text{ NTU} \quad \text{Rango} = 69.4 \text{ NTU}$$

La amplitud determina la extensión que va a tener cada uno de los rangos previamente determinados.

$$\text{Amplitud} = \frac{\text{rango}}{\# \text{ intervalos}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Para el presente estudio la forma adecuada de utilizar la anterior ecuación es la siguiente:

$$\text{Amplitud} = \frac{69.4}{12} \quad \text{Amplitud} = 5.78$$

Se recopilan los resultados calculados anteriormente en una tabla:

Tabla 2. Recopilación resultados Turbiedad

Parámetro	Símbolo	Valor
Numero de datos	N	2056
Intervalos	K	≈ 12
Rango	-	69,40
Amplitud	A	5,78

Fuente: (Autores 2018)

Con la información anterior, ya se puede iniciar el proceso de generar la tabla de información, con los valores que más se repitan.

2.2.3 Paso 3

Se debe generar una tabla, para entender de una mejor manera la información que arroja el método estadístico. En esta tabla estará consignado los rangos que se generan, estos se definen por limites, el primero es el inferior y el segundo el superior, y se calculan de la siguiente manera: el primer límite inferior es el valor encontrado con el nombre de valor mínimo, y el límite superior es el límite inferior más la amplitud encontrada. Adicional a esto se calcula la frecuencia absoluta, que es el número de datos que se encuentran entre los limites inferiores y superiores (Rango). Y la frecuencia relativa que se calcula con la siguiente ecuación:

$$frecuencia\ relativa = \frac{frecuencia\ absoluta}{N} \times 100 \quad Ecuación\ 6$$

Aplicando el procedimiento anterior se puede construir la siguiente tabla:

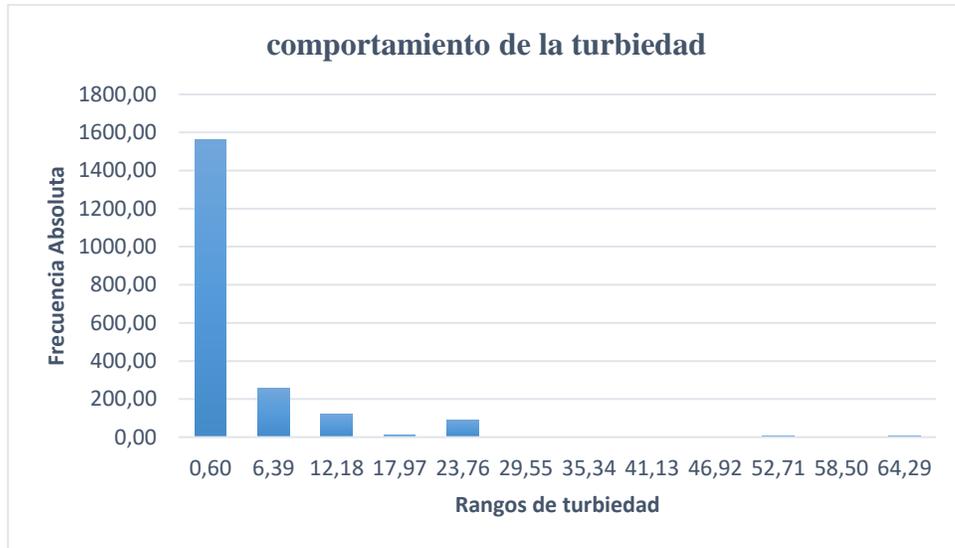
Tabla 3. Rangos turbiedad

Intervalos		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Límite inferior	Límite superior		
0,60	6,38	1562,00	75,97%
6,39	12,17	256,00	12,45%
12,18	17,96	120,00	5,84%
17,97	23,75	14,00	0,68%
23,76	29,54	90,00	4,38%
29,55	35,33	2,00	0,10%
35,34	41,12	0,00	0,00%
41,13	46,91	0,00	0,00%
46,92	52,70	0,00	0,00%
52,71	58,49	6,00	0,29%
58,50	64,28	0	0,00%
64,29	70,07	6	0,29%
		2056,00	100,00%

Fuente: (Autores 2018)

Se grafica el comportamiento de la frecuencia absoluta contra los rangos, para tener un resultado un poco más visual.

Figura 3. Comportamiento de la turbiedad



Fuente: (Autores 2018)

Para el análisis, se tienen en cuenta los Rangos que sean inferiores a 13 NTU, puesto que dichos rangos, representan las mayores frecuencias de los datos históricos que ingresan a las cuatro plantas.

2.2.4 Datos pH

Para determinar el pH que más se presentan en las plantas, se usa la misma metodología que se usó para la turbiedad. De esta manera los resultados que no genera son los siguientes:

Tabla 4. Recopilación datos pH

Parámetro	Símbolo	Valor
Numero de datos	N	2056
Intervalos	K	≈ 12
Rango	-	69,40
Amplitud	A	5,78

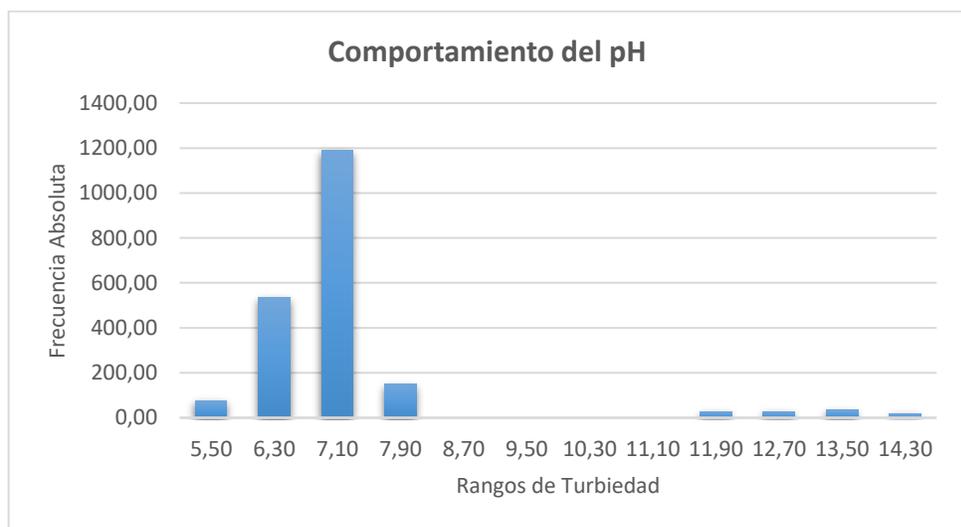
Fuente: (Autores 2018)

Tabla 5. Rangos pH

Intervalos		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Limite inf	Limite sup		
5,50	6,29	76,00	3,70%
6,30	7,09	534,00	25,97%
7,10	7,89	1188,00	57,78%
7,90	8,69	150,00	7,30%
8,70	9,49	0,00	0,00%
9,50	10,29	0,00	0,00%
10,30	11,09	0,00	0,00%
11,10	11,89	0,00	0,00%
11,90	12,69	28,00	1,36%
12,70	13,49	28,00	1,36%
13,50	14,29	34	1,65%
14,30	15,09	18	0,88%
		2056,00	

Fuente: (Autores 2018)

Figura 4. Comportamiento del pH



Fuente: (Autores 2018)

Verificando los filtros del pH, no se toman valores por encima de 9.36, porque no son muy normales en las plantas. Como se puede ver en la figura 2.

Se debe retirar la información que en los numerales 2.2.3 y 2.2.4, se dijo que no se usara. Para generar una tabla final de datos finales y crear los rangos con los que se trabajarán.

2.3 RANGO DE TURBIEDAD DEFINITIVO

Cuando se eliminan los datos que no servían, la muestra disminuye y esta generara nuevos rangos.

Tabla 6: definición de intervalos turbiedad

Parámetro	Símbolo	Valor
Numero de datos	N	1836
Intervalos	K	≈ 12
Rango	-	12.40
Amplitud	A	1.03

Fuente: (Autores 2018)

Tabla 7: definición de rangos turbiedad

Intervalos		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
Limite inf	Limite sup				
0,60	1,63	738	0,40	738,00	0,40
1,63	2,67	494	0,27	1232,00	0,67
2,67	3,70	134	0,07	1366,00	0,74
3,70	4,74	30	0,02	1396,00	0,76
4,74	5,77	56	0,03	1452,00	0,79
5,77	6,80	66	0,04	1518,00	0,83
6,80	7,84	90	0,05	1608,00	0,88
7,84	8,87	0	0,00	1608,00	0,88

Intervalos		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
Limite inf	Limite sup				
8,87	9,91	6	0,00	1614,00	0,88
9,91	10,94	66	0,04	1680,00	0,92
10,94	11,97	66	0,04	1746,00	0,95
11,97	13,01	90	0,05	1836,00	1,00
TOTAL		1836	1,00		

Fuente: (Autores 2018)

Paso a seguir es la definición de rangos de turbiedad, esta se hizo a criterio propio partiendo de la (Tabla 7: definición de rangos turbiedad). Se emparejan dos rangos para así definir 6, que son con los que se trabajaran las muestras. Para un mayor estudio se definió arbitrariamente un nuevo rango que será entre 13.00 y 15.07 NTU.

Tabla 8: rangos finales

Intervalos	
Límite inferior	Límite superior
0,6	2,66
2,66	4,73
4,73	6,8
6,8	8,87
8,87	10,94
10,94	13
13	15,07

Fuente: (Autores 2018)

2.4 RANGO DE PH DEFINITIVO

Para encontrar estos rangos, se utilizó la misma muestra que se usó en la turbiedad, y la misma metodología estadística.

Tabla 9: definición de intervalos pH

Parámetro	Símbolo	Valor
Numero de datos	N	1836
Intervalos	K	≈ 12
Rango	-	12.40
Amplitud	A	1.03

Fuente: (Autores 2018)

Tabla 10: definición pH óptimo

Intervalos		Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
Límite inferior	Límite superior				
6,14	6,41	84	0,05	84,00	0,05
6,41	6,68	130	0,07	214,00	0,12
6,68	6,94	206	0,11	420,00	0,23
6,94	7,21	262	0,14	682,00	0,37
7,21	7,48	326	0,18	1008,00	0,55
7,48	7,75	352	0,19	1360,00	0,74
7,75	8,02	330	0,18	1690,00	0,92
8,02	8,28	60	0,03	1750,00	0,95
8,28	8,55	60	0,03	1810,00	0,99
8,55	8,82	0	0,00	1810,00	0,99
8,82	9,09	0	0,00	1810,00	0,99
9,09	9,36	26	0,01	1836,00	1,00
TOTAL		1836	1,00		

Fuente: (Autores 2018)

El objetivo de encontrar los rangos para el pH, es verificar la frecuencia relativa más relevante. Se tomaron las cuatro (4) frecuencias más altas, que son de 14%,18%, 19% y 18%, correspondientes a pH entre 6.94 y 8.02. Para el presente estudio se verificará que el pH siempre se encuentre en este rango

2.5 PREPARACIÓN DEL AGUA PROBLEMA

Para generar el agua problema que se necesita en cada uno de los rangos, se extrajo agua potable de la llave, a esta se le adiciona una determinada cantidad de bentonita, pesada en la balanza de precisión. Con el fin de simular el agua que entra a la PTAP en realidad. La cantidad de bentonita agregada varía proporcionalmente a el grado de turbiedad; así que se tomaron seis diferentes dosis de bentonita. La dosificación de bentonita necesaria, para generar la simulación del agua problema, se determinó mediante varias pruebas, a fin de obtener la deseada.

1. se tomó un litro de agua y se le adiciono 0.015 g de bentonita
2. se agitó muy bien la mezcla, observando siempre una buena disolución.
3. Se tomó una cubeta del turbidímetro y se llena (no deben quedar burbujas y se debe limpiar muy bien la cubeta con un paño de gafas).
4. Se ingresó la cubeta al turbidímetro y se toma la lectura.

2.5.1 Dosificación bentonita

Para la correcta dosificación de la bentonita se tomaron dos muestras en un litro de agua, a la primera se adiciono 0.015 g y a la segunda 0.025 g, para una turbiedad de 6.3 y 11.8 NTU respectivamente. Se realizó una regresión lineal, para encontrar una fórmula que nos permita acceder a la dosis correcta en cierta cantidad de agua.

$$CB = v(0.003545 + 0.001818 * TU) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

CB= cantidad de bentonita en (g)

V = volumen de agua en (lts)

TU= turbiedad necesaria (NTU)

Ya visto el procedimiento para saber la cantidad de bentonita que se debe usar, se realiza el procedimiento para cada turbiedad que se va a manejar, cabe resaltar que la ecuación, no es en totalidad efectiva, tiene cierto error; pero de igual forma se usa y sirve para el estudio.

Tabla 11. Dosis bentonita

Turbiedad (NTU)	Dosis bentonita(g)
2	0
4	0.65
6.1	0.87
8.8	1.17
9.1	1.2
11.8	1.5
14.9	1.83

Fuente: (Autores 2018)

2.5.2 Determinación de alcalinidad

Se debe determinar la alcalinidad, Sans' o los indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo, para saber con exactitud la dosis de coagulante que debe ser añadida a la muestra.

Tomar dos muestras del agua problema en un matraz de 100 ml, se añadirá a una muestra anaranjado de metilo, y a la otra fenolftaleína. La cantidad de cada

indicador será cuando se torne el agua de algún color en específico. Por otro lado, se deben tener dos buretas, una con un ácido que será Nítrico HNO_3 y la otra con una base la cual será Hidróxido de sodio NOH , al 0.02 normal.

2.5.3 Cantidad de coagulante

La cantidad de coagulante varía conforme a la alcalinidad que contiene el agua problema, es decir, con base a la cantidad de ml/gr obtenidos en el proceso de alcalinidad se contempla el doble de coagulante a fin de garantizar la dosis suficiente de este químico y lograr desarrollar el proceso denominado coagulación.

2.5.4 Parámetros de la muestra

Teniendo como referencia la caracterización previamente establecida del agua problema, la muestra a desarrollar en laboratorio se presenta bajo dicha caracterización a fin de simular las condiciones reales encontradas a la entrada de cada una de las plantas de estudio, por lo tanto, las muestras desarrolladas en laboratorio tienen los siguientes parámetros:

- La turbiedad determinada en la muestra debe estar dentro de los rangos establecidos estadísticamente, como se muestra en el capítulo de Análisis estadístico para determinar rangos típicos de la variación de la turbiedad y pH a la entrada de las plantas.
- El pH que tiene la muestra sea el permisible para el desarrollo del laboratorio, el cual, debe considerarse como un pH neutro.
- La dosificación de Bentonita a ser utilizada se determina mediante una interpolación garantizando el contenido exacto de esta y generando la turbiedad deseada.
- La dosificación de coagulante se determina mediante la alcalinidad encontrada en la muestra y atendiendo a las instrucciones presentadas en

guía de laboratorio se preparará el doble del coagulante con respecto a la alcalinidad previamente determinada. (Moreno 2014)

2.5.5 Parámetros de mezcla

Una vez determinado los parámetros principales de la muestra, la mezcla también debe cumplir con unos parámetros para su correcto procedimiento y así obtener los datos deseados. Por otro lado dadas las condiciones del ensayo de laboratorio se determina realizar el procedimiento de coagulación y sedimentación en la torre de sedimentación con la cual cuenta la Universidad Católica de Colombia, la cual tiene como condiciones iniciales realizar el ensayo en una muestra de 60 Lt. Por lo tanto, se realiza la mezcla del test de jarras en esta torre tomando como referencia 5 PSI para la mezcla rápida y 1 PSI para la mezcla lenta. A continuación, se presenta los siguientes parámetros:

- Dosificación de Bentonita acorde al volumen empleado para el ensayo (se realiza una interpolación para determinar la dosificación en gr del químico).
- El coagulante esta previamente determinado según la alcalinidad de la muestra.
- Para realizar la mezcla rápida de la muestra del agua problema se determina realizarla a presión teniendo como parámetro 5 psi para la mezcla rápida durante 5 minutos
- Para realizar la mezcla lenta de la muestra del agua problema se determina realizar a presión teniendo como parámetro 1 psi para la mezcla lenta durante 20 minutos.

Los parámetros anteriormente definidos se realizan teniendo como finalidad la posterior toma de datos a los diferentes niveles definidos previamente durante el pedido de sedimentación que sufre esta muestra.

2.5.6 Prueba de sedimentación

De manera secuencial y teniendo como base los parámetros anteriormente descritos se procede a realizar la prueba de sedimentación, la cual se desarrolla en la torre de sedimentación, tomando los datos a los niveles predeterminados por esta torre y en los tiempos establecidos inicialmente los cuales variaran en un intervalo de 10 minutos. Según las características que se tiene de la torre los niveles de tomas de datos (turbiedad) se realizara cada 25 cm en una altura máxima de 175 cm y como se describió anteriormente cada 10 minutos.

Durante la toma de datos en los intervalos de tiempo establecidos se debe tomar la turbiedad en cada uno de los niveles y en cada tiempo con el Tubímetro, si pues, se tiene los datos de turbiedad en una tabla de laboratorio conde se cruza los niveles de la torre de sedimentación con los tiempos de toma de datos.

2.5.7 Construcción de Curvas de Iso-concentración

Posterior a la sedimentación y con los datos obtenidos, se procede a determinar el porcentaje de remoción de partículas el cual se describe mediante la ecuación 1 del este documento y así obtener los diferentes porcentajes durante el tiempo de sedimentación como se ilustra en el capítulo 3.1.

Para cada una de las turbiedades determinadas en el numeral anterior se debe determinar su respectivo porcentaje de remoción de partículas y así generando la nube de puntos se será base para la creación de las curvas de Iso-concentración a diferentes porcentajes. Para el caso del presente estudio se determinan las curvas de Iso-concentración para porcentajes de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90%. Estos porcentajes se toman siempre y cuando los datos lo permitan y las curvas de Iso-concentración presenten una secuencia lógica.

2.5.8 Ajuste estadístico mediante regresión lineal múltiple para cada uno de los rangos estudiados.

Para la creación de las siete (7) ecuaciones, se utilizó una regresión múltiple de tres variables; una dependiente y dos independientes, se usó la herramienta Microsoft Excel (operaciones 2017).

2.5.8.1 Pasos para la regresión lineal

Este estudio solo dependerá del porcentaje de remoción, eso quiere decir que se traerá a colación, las tablas ya calculadas anteriormente en el numeral 3.1. con una diferencia, y es que para un correcto uso de la información; las profundidades estarán ubicadas horizontalmente, y el tiempo de retención se ubicarán verticalmente.

Paso a seguir será la creación de una nueva tabla, esta tendrá el objetivo de incluir la primera variable que es la dependiente. Se tiene que dividir en 100 cada porcentaje de remoción, y se aplicara la siguiente ecuación (San, Analytical approach for evaluation of settling column data 1989).

$$\%P = \frac{T^b}{\alpha H^k + T^b} \text{Ecuación 8}$$

Todos los valores Y, calculados con anterioridad, se ubican en una única columna. Y adicionalmente se aplica el logaritmo natural para cada uno de los porcentajes de remoción. La variable independiente X1, será el logaritmo natural del tiempo, de cada uno de los porcentajes de la primera columna y. y por último la segunda variable independiente llamada X2, será nuevamente el logaritmo natural de la profundidad de cada uno de los porcentajes de retención.

Este sistema se debe repetir para cada una de las turbiedades trabajadas en el numeral 3.1. Donde se encontrará para cada turbiedad una ecuación correspondiente, que genere porcentajes de remoción teóricos.

$$\ln\left(\frac{1}{P} - 1\right) = \ln(a) - b * \ln(T) + k * \ln(H) \text{ Ecuación 9}$$

2.5.8.2 Regresión lineal

Después de realizar la regresión en el programa de Excel, este nos arroja una determinada cantidad de valores, que se muestran de la siguiente forma:

- Coeficiente de correlación múltiple
- Coeficiente de determinación R²
- Intercepción
- Variable X 1
- Variable X 2

Los valores de interés para construir las ecuaciones serán la intercepción, variable X1 y variable X2. Adicional a esto el valor intercepción es únicamente el exponente de Euler, que se necesita para el cálculo de α en la ecuación 2, de este presente trabajo. Para una mayor congruencia llamaremos a la variable X1 (β), y a la variable X2 (κ).

2.6 COAGULACIÓN

Para este proceso se utiliza la torre de sedimentación la cual tiene una capacidad de 60 Lt, se usa el producto floculante sulfato de aluminio granulado tipo B (Al₂(SO₄)₃·14H₂O). Los ensayos consistían en determinar la turbiedad a diferentes alturas (de 0 a 1.75m – cada 0.25 m), y en tiempos distintos (90minutos-cada 10 minutos).

Una vez llena la torre, se adiciona el producto sulfato de aluminio granulado tipo B (Al₂(SO₄)₃·14H₂O), totalmente disuelto. Donde tendrá una mezcla rápida, que consiste en la incorporación de aire comprimido, con una presión de cinco psis durante un minuto; de la misma manera se realizará una mezcla lenta durante 20

minutos y con una presión de un psi.

Figura 5: torre sedimentación laboratorio U católica.



Fuente: (Autores 2018)

2.3.2 Instalaciones Y equipo requerido

Para el presente proyecto se cuenta con la totalidad de los equipos y materiales en las instalaciones del laboratorio de la Universidad Católica de Colombia. A continuación, se relaciona la estimación de los equipos a utilizar y los materiales.

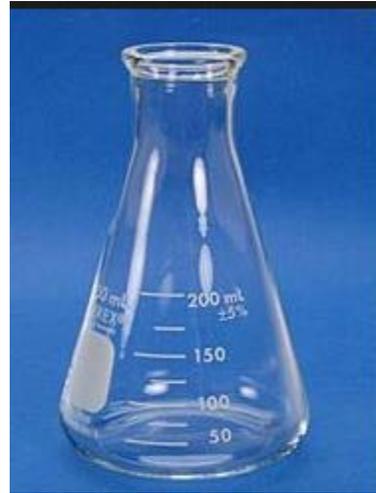
Equipos

Figura 6. Torre de sedimentación



Fuente: (Autores 2018)

Figura 7. Matraz



Fuente: (monografias.com 2016)

Figura 8. Balanza de precisión



Fuente: (Autores 2018)

Figura 9. Vaso de precipitación



Fuente: (Autores 2018)

Figura 10. Turbidímetro



Fuente: (Autores 2018)

Figura 11. Bureta



Fuente: (monografias.com 2016)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos que se muestran a continuación son los resultados de cada uno de los laboratorios y análisis, que de cierto modo ayudo para un proyecto con veracidad.

3.1 TOMA DE MUESTRAS EN LABORATORIO

3.1.1. Turbiedad NTU 2 (Rango 0.6-2.66)

Para preparar esta agua, no hubo necesidad del uso de bentonita; puesto que es una turbiedad muy baja, y el agua ya viene con esta por defecto. Adicionalmente se verifica que el ph este dentro del rango que se estipulo en el capítulo 4.

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 12: turbiedad 2 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	2	2	2	1,8	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4
	25		2	2	1,9	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5	1,4	1,4
	50		2	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6	1,5	1,4	1,4
	75		1,9	1,8	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,7	1,6	1,5
	100		1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6	1,5	1,7	1,5	1,6
	125		1,9	2	1,7	1,4	1,5	1,6	1,5	1,7	1,6	1,6
	150		1,9	1,9	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6
	175		1,9	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	1,6

Fuente: (Autores 2018)

se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato de tabla.

Tabla 13: porcentaje remoción de partículas NTU 2

Profundidad (m)	Tiempo (min)										
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,0	0,0	0,0	10,0	20,0	20,0	20,0	25,0	25,0	25,0	30,0
25		0,0	0,0	5,0	20,0	20,0	25,0	20,0	25,0	30,0	30,0
50		0,0	10,0	10,0	15,0	20,0	25,0	20,0	25,0	30,0	30,0
75		5,0	10,0	20,0	20,0	25,0	20,0	20,0	15,0	20,0	25,0
100		10,0	10,0	15,0	20,0	25,0	20,0	25,0	15,0	25,0	20,0
125		5,0	0,0	15,0	30,0	25,0	20,0	25,0	15,0	20,0	20,0
150		5,0	5,0	15,0	15,0	25,0	20,0	20,0	15,0	20,0	20,0
175		5,0	5,0	10,0	10,0	20,0	20,0	15,0	10,0	10,0	20,0

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas. La forma correcta de construir cada curva, es mediante el sistema de interpolación,

$$D_{min} = \frac{(Lg - P_{min}) * d \text{ tiempo}}{P_{max} - P_{min}}$$

Donde

D_{min} = distancia desde porcentaje de remoción anterior

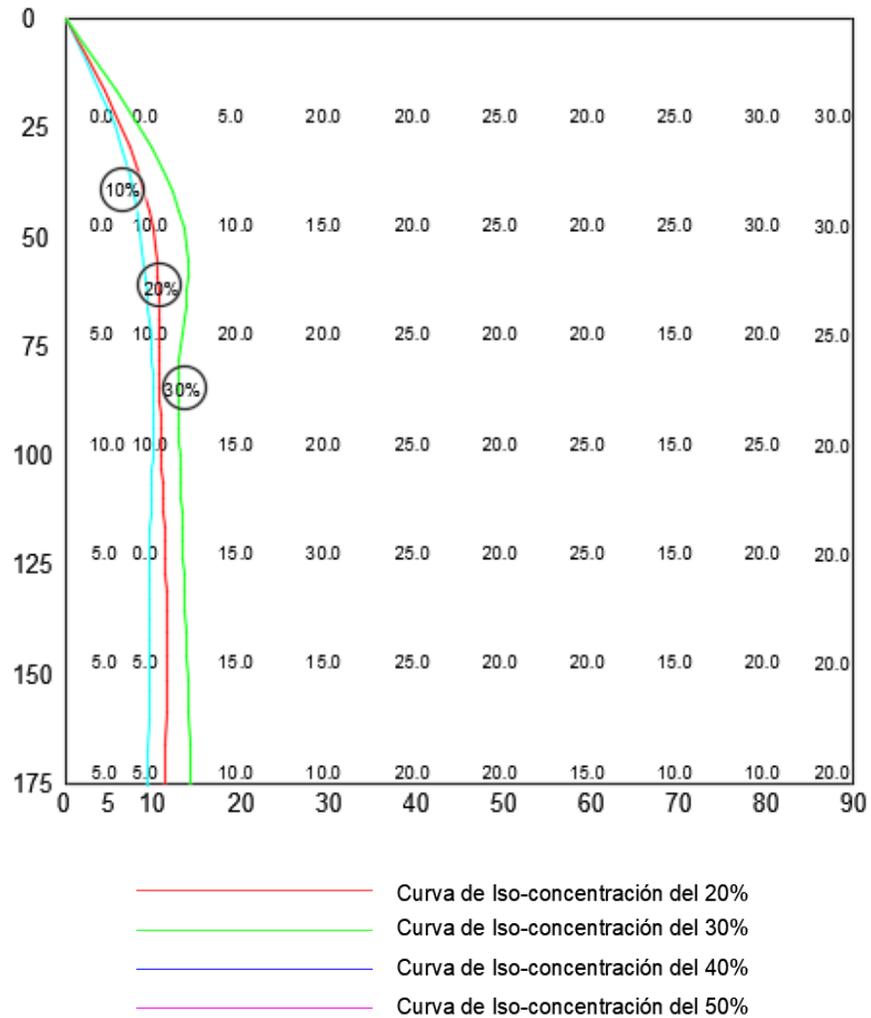
Lg = porcentaje que se desea graficar (%)

P_{min} = porcentaje de remoción inicial (%)

$d \text{ tiempo}$ = distancia de tiempo sentido horizontal (min)

P_{max} = porcentaje de remoción final (%)

Figura 12. curva de isoconcentración NTU 2



Fuente: (Autores 2018)

se evidencia un bajo porcentaje de remoción, esto se debe a la buena calidad de agua que se está manejando, de no ser así se podría decir que el agua potable que llega a la ciudad de Bogotá tiene una baja calidad con respecto sus cantidades de partículas.

3.1.2. Turbiedad NTU 4 (Rango 2.66-4.73)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplicó fue de 0.65 g

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 14: turbiedad 4 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	4	4	3,7	3,4	2,8	2,5	2,2	2	1,9	1,8	1,6
	25		3,8	3,6	3,3	2,8	2,4	2,1	2	1,8	1,8	1,7
	50		3,4	3,5	3,1	2,7	2,2	2	2,1	2	1,9	1,7
	75		3,5	3,6	3,3	2,9	2,5	2,3	2,2	2	1,8	1,8
	100		3,6	3,8	3,5	3,1	2,6	2,4	2,2	2,2	2	1,9
	125		3,6	3,8	3,4	3	2,6	2,3	2,1	2,1	2	1,8
	150		3,7	3,7	3,7	3,4	2,5	2,3	2,1	1,9	2	1,7
	175		3,7	3,8	3,8	3,5	2,4	2,5	2,1	1,8	1,9	1,9

Fuente: (Autores 2018)

se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato.

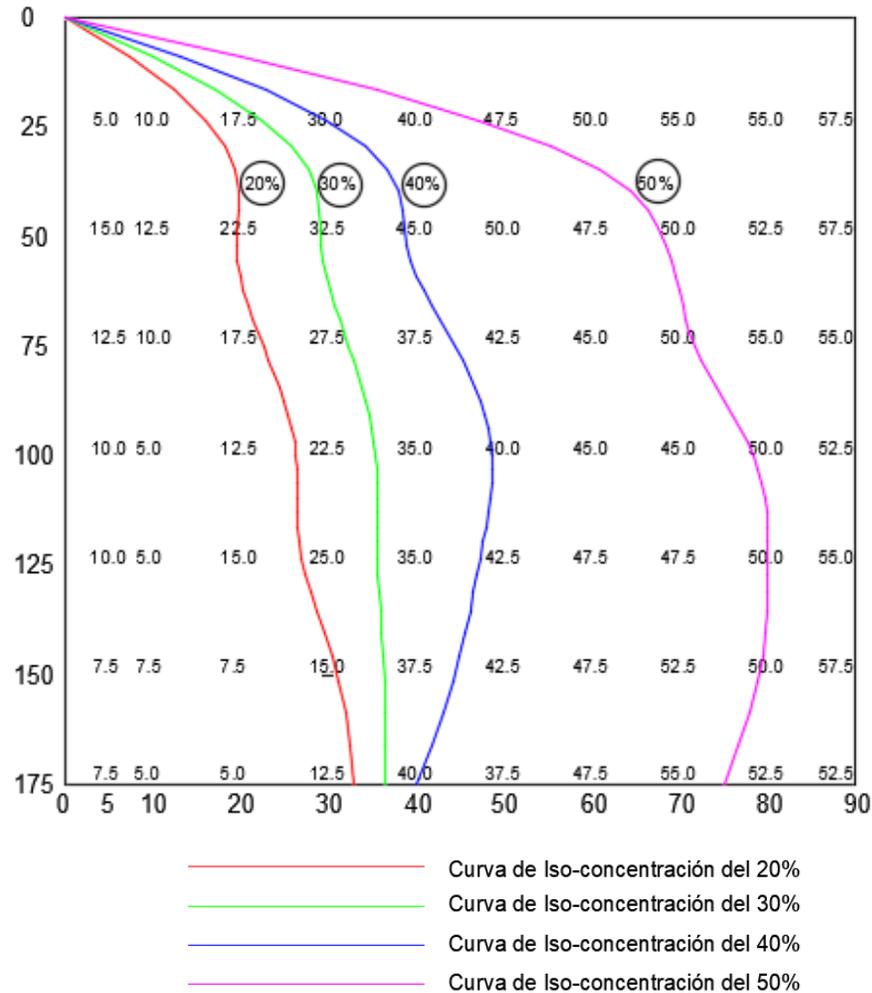
Tabla 15: porcentaje remoción de partículas NTU 4

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	0,0	0,0	7,5	15,0	30,0	37,5	45,0	50,0	52,5	55,0	60,0
	25		5,0	10,0	17,5	30,0	40,0	47,5	50,0	55,0	55,0	57,5
	50		15,0	12,5	22,5	32,5	45,0	50,0	47,5	50,0	52,5	57,5
	75		12,5	10,0	17,5	27,5	37,5	42,5	45,0	50,0	55,0	55,0
	100		10,0	5,0	12,5	22,5	35,0	40,0	45,0	45,0	50,0	52,5
	125		10,0	5,0	15,0	25,0	35,0	42,5	47,5	47,5	50,0	55,0
	150		7,5	7,5	7,5	15,0	37,5	42,5	47,5	52,5	50,0	57,5
	175		7,5	5,0	5,0	12,5	40,0	37,5	47,5	55,0	52,5	52,5

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas.

Figura 13: curva de isoconcentración NTU 4



Fuente: (Autores 2018)

Para esta grafica se muestra un mayor porcentaje de remoción con respecto a la turbiedad de 2 NTU, ya aparece un porcentaje de remoción de 50%, lo cual es un resultado lógico porque eso quiere decir que hay mayor cantidad de partículas en suspensión.

3.1.3. Turbiedad NTU 6.1 (Rango 4.73-6.8)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplicó fue de 0.87 g

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 16: turbiedad 6.1 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	6,1	5,31	5,13	5,15	4,91	4,78	4,06	3,58	3,11	2,87	2,58
	25		5,48	5,41	5,12	4,78	4,64	4,39	3,35	3,14	2,96	2,24
	50		5,79	5,33	5,25	5,34	4,62	4,22	3,38	3,03	3,09	2,36
	75		5,66	5,01	4,3	5,43	4,6	4,5	3,22	2,98	3,05	2,39
	100		5,22	5,30	4,87	5,12	4,71	4,36	3,23	3,14	3,04	2,08
	125		5,65	5,15	4,66	5,18	4,57	4,31	3,43	3,24	3,08	2,02
	150		5,53	5,25	4,9	5,24	4,58	4,37	4,39	3,22	3,1	2,06
	175		5,5	5,46	5,3	5,1	4,19	4,61	4,31	3,58	3,31	2,12

Fuente: (Autores 2018)

Se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato de tabla.

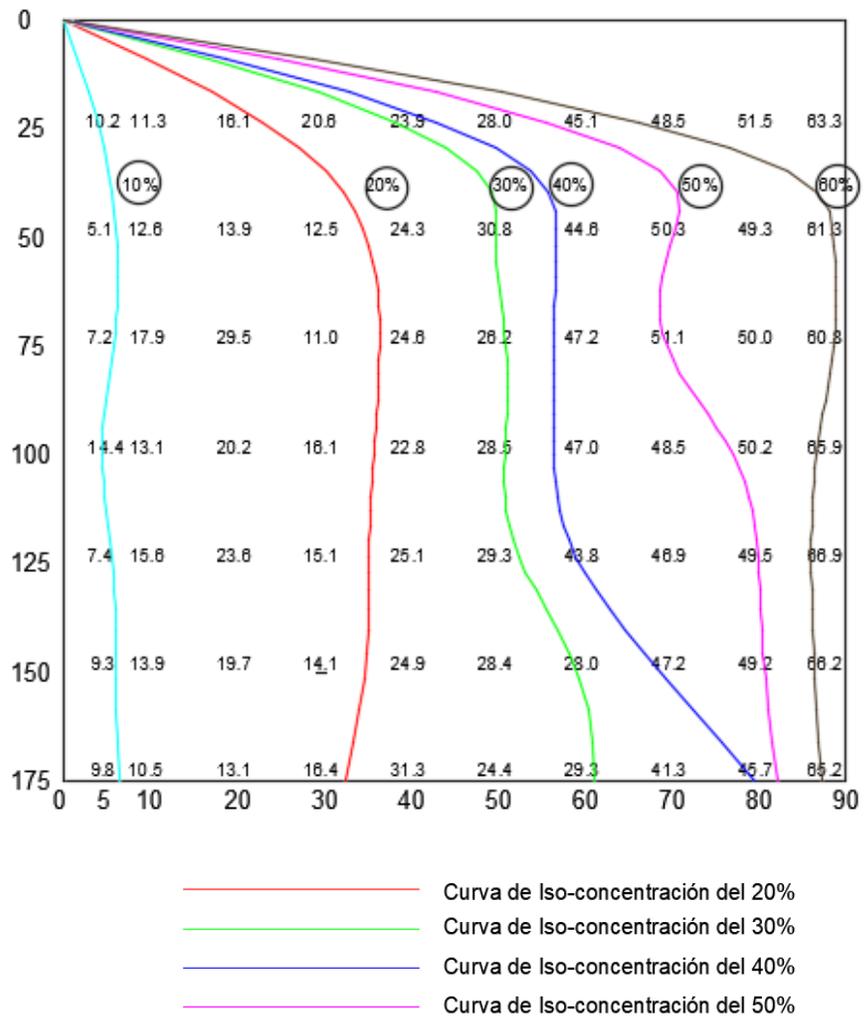
Tabla 17: porcentaje remoción de partículas NTU 6.1

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	0,0	13,0	15,9	15,6	19,5	21,6	33,4	41,3	49,0	53,0	57,7
	25	0,0	10,2	11,3	16,1	21,6	23,9	28,0	45,1	48,5	51,5	63,3
	50	0,0	5,1	12,6	13,9	12,5	24,3	30,8	44,6	50,3	49,3	61,3
	75	0,0	7,2	17,9	29,5	11,0	24,6	26,2	47,2	51,1	50,0	60,8
	100	0,0	14,4	13,1	20,2	16,1	22,8	28,5	47,0	48,5	50,2	65,9
	125	0,0	7,4	15,6	23,6	15,1	25,1	29,3	43,8	46,9	49,5	66,9
	150	0,0	9,3	13,9	19,7	14,1	24,9	28,4	28,0	47,2	49,2	66,2
	175	0,0	9,8	10,5	13,1	16,4	31,3	24,4	29,3	41,3	45,7	65,2

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas.

Figura 14: curva de isoconcentración NTU 6.1



Fuente: (Autores 2018)

Para esta turbiedad y con respecto a las anteriores se aprecia un comportamiento un poco lineal, pues a medida que incrementa la turbiedad, el porcentaje de remoción tiende a ser mayor, pues en este rango ya tenemos porcentaje de remoción de partículas mayor a 60 %.

3.1.4. Turbiedad NTU 8.8 (Rango 6.8-8.87)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplicó fue de 1.17 g .

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 18:turbiedad 8.8 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	8,81	7,99	6,46	6,05	6,15	5,67	5,37	5,29	4,07	3,71	3,6
	25		8,03	6,31	6,37	6,3	6,13	5,75	5,99	5,17	4,07	3,81
	50		8,22	6,28	5,99	6,15	6,17	5,96	5,86	4,96	4,01	3,91
	75		7,65	6,55	6,65	6,24	6,26	5,8	5,77	5,88	3,75	3,75
	100		8,5	6,58	6,31	6,34	6,21	5,81	6,06	5,42	4,01	3,61
	125		8,31	6,78	6,35	6,22	6,15	6,06	5,9	5,77	4,02	3,62
	150		8,62	6,58	6,51	6,22	6,23	6,12	5,81	5,83	4,07	3,56
	175		8,61	6,4	6,69	6,41	5,67	5,77	5,16	5,07	4,11	3,59

Fuente: (Autores 2018)

se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato de tabla. Con respecto a los datos del laboratorio, no tuvo una disminución de la turbiedad que se hubiese querido, pues tan solo removió 4 NTU aproximadamente.

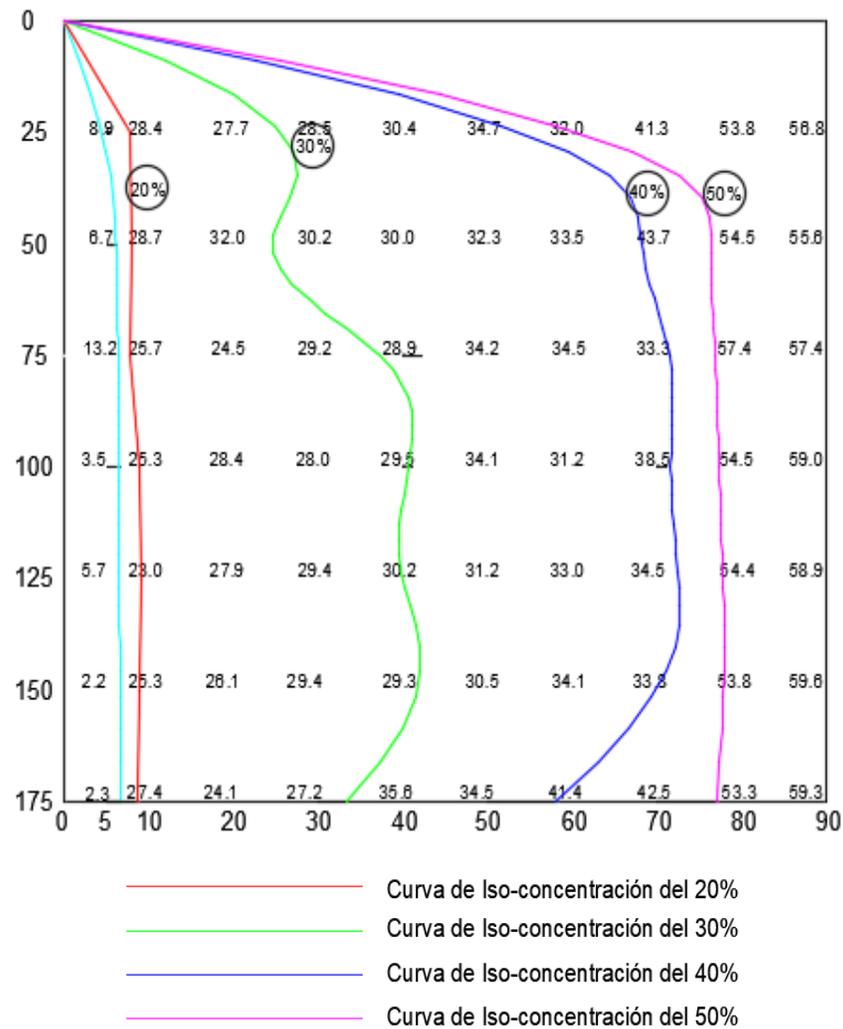
Tabla 19: porcentaje remoción de partículas NTU 8.8

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	0,0	9,3	26,7	31,3	30,2	35,6	39,0	40,0	53,8	57,9	59,1
	25		8,9	28,4	27,7	28,5	30,4	34,7	32,0	41,3	53,8	56,8
	50		6,7	28,7	32,0	30,2	30,0	32,3	33,5	43,7	54,5	55,6
	75		13,2	25,7	24,5	29,2	28,9	34,2	34,5	33,3	57,4	57,4
	100		3,5	25,3	28,4	28,0	29,5	34,1	31,2	38,5	54,5	59,0
	125		5,7	23,0	27,9	29,4	30,2	31,2	33,0	34,5	54,4	58,9
	150		2,2	25,3	26,1	29,4	29,3	30,5	34,1	33,8	53,8	59,6
	175		2,3	27,4	24,1	27,2	35,6	34,5	41,4	42,5	53,3	59,3

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas. Cabe aclarar que estas graficas se realizaron en el programa Autocad de Auto desk, y cada curva de isoconcentración esta debidamente interpolada.

Figura 15: curva de isoconcentración NTU 8.8



Fuente: (Autores 2018)

En esta curva de isoconcentración existe un porcentaje de remoción algo parecido a la turbiedad de 4 NTU, con la diferencia que en el minuto treinta (30) y el minuto sesenta (60) el coagulante se comportó variante; en pocas palabras no tiene una remoción lineal. Y adicionalmente no logra el 60% en los noventa (90) minutos.

3.1.5. Turbiedad NTU 9.1 (Rango 8.87-10.94)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplicó fue de 1.2 g

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 20. turbiedad 9.1 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	9,1	7,89	7,17	5,84	5,34	5,19	5,13	4,82	4,64	3,79	3,21
	25		7,54	7	5,56	5,51	5,31	5,16	4,97	4,75	3,84	3,81
	50		6,87	7,02	5,53	5,29	5,19	5,19	5,15	4,85	4,09	3,85
	75		6,69	5,86	5,76	5,64	5,27	5,27	5,01	4,81	3,98	3,29
	100		7,82	5,97	5,78	5,55	5,28	5,23	5,02	4,97	4,03	3,24
	125		7,78	6,02	5,91	5,59	5,23	5,18	5,22	4,89	4,69	3,15
	150		7,42	6,13	5,81	5,53	5,35	5,24	5,28	4,95	4,01	3,42
	175		7,44	6,38	5,8	5,87	5,51	5,34	5,48	4,9	3,99	3,49

Fuente: (Autores 2018)

se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato.

Tabla 21. porcentaje remoción de partículas NTU 9.1

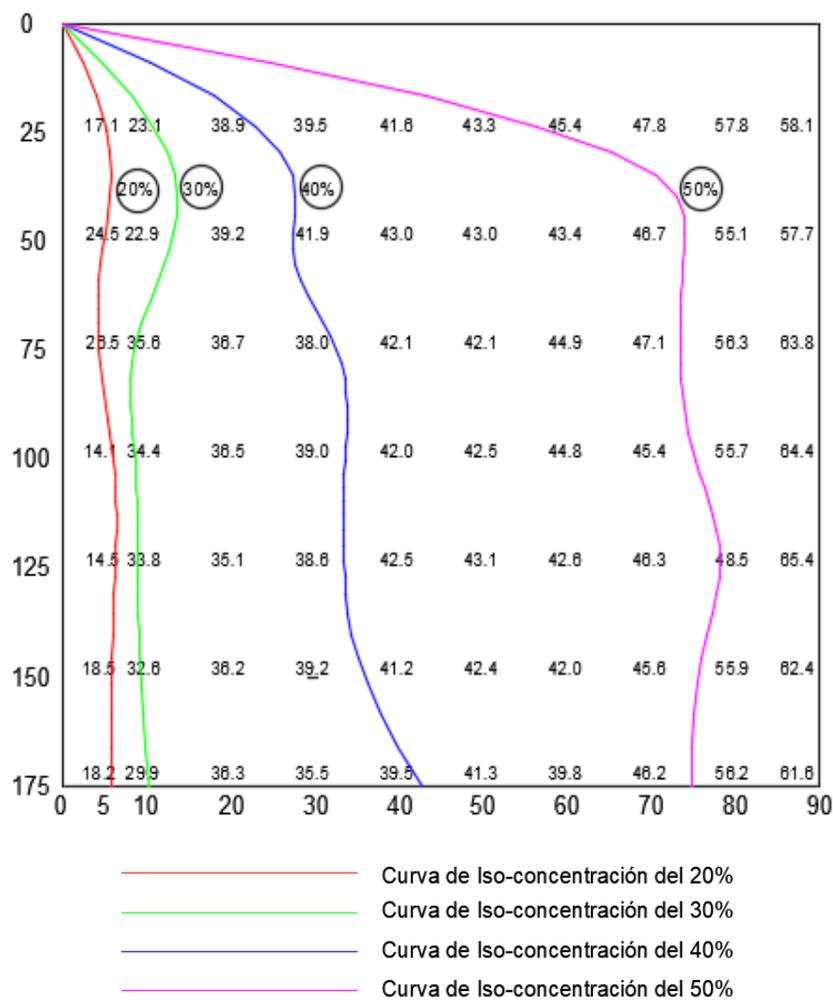
		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	0,0	13,3	21,2	35,8	41,3	43,0	43,6	47,0	49,0	58,4	64,7
	25		17,1	23,1	38,9	39,5	41,6	43,3	45,4	47,8	57,8	58,1
	50		24,5	22,9	39,2	41,9	43,0	43,0	43,4	46,7	55,1	57,7
	75		26,5	35,6	36,7	38,0	42,1	42,1	44,9	47,1	56,3	63,8

100		14,1	34,4	36,5	39,0	42,0	42,5	44,8	45,4	55,7	64,4
125		14,5	33,8	35,1	38,6	42,5	43,1	42,6	46,3	48,5	65,4
150		18,5	32,6	36,2	39,2	41,2	42,4	42,0	45,6	55,9	62,4
175		18,2	29,9	36,3	35,5	39,5	41,3	39,8	46,2	56,2	61,6

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas.

Figura 16. curva de isoconcentración NTU 9.1



Fuente: (Autores 2018)

Esta grafica presenta una anomalía en su variación de 40% a 50 %, representando un menor rendimiento del coagulante desde el minuto cuarenta (40) al minuto setenta (70), lo que si es cierto, es que no se llegó a la turbiedad que se quisiera haber esperado.

3.1.6. Turbiedad NTU 11.8 (Rango 10.94-13.0)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplico fue de 1.5 g

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 22. Turbiedad 11.8 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	11,8	11,09	10,69	10,29	9,19	7,83	6,43	5,93	5,35	4,65	4,15
	25		11,09	10,79	10,69	9,49	7,43	6,73	5,93	5,45	4,45	4,15
	50		11,29	10,99	10,79	9,09	7,73	6,93	6,03	5,45	4,65	3,75
	75		11,29	11,09	9,89	9,39	8,03	6,83	5,43	5,75	4,45	4,65
	100		10,89	10,89	9,89	9,69	8,13	6,33	5,33	5,85	4,25	4,45
	125		10,69	10,59	10,89	9,69	8,13	6,43	5,23	5,85	4,15	4,35
	150		10,99	10,49	10,79	9,89	8,33	6,53	5,73	5,95	4,25	4,55
	175		11,09	10,74	10,89	9,99	8,43	6,53	5,93	6,15	4,25	4,85

Fuente: (Autores 2018)

se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato de tabla.

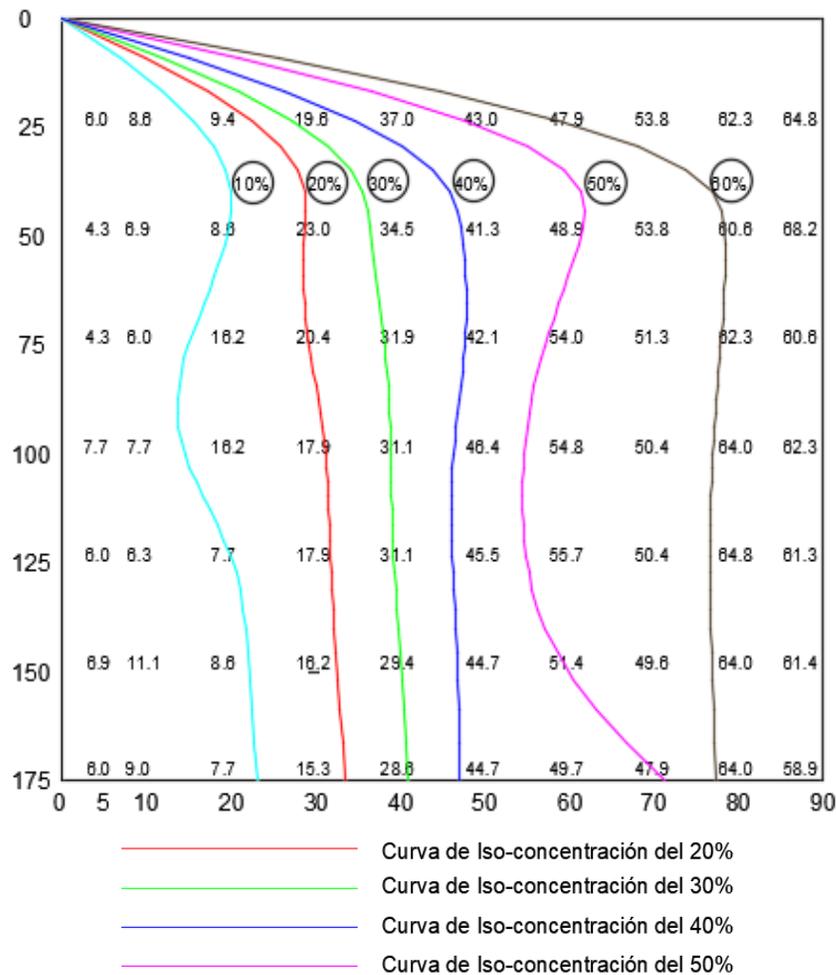
Tabla 23. porcentaje remoción de partículas NTU 11.8

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	6,0	6,0	9,4	12,8	22,1	33,6	45,5	49,7	54,7	60,6	64,8
	25		6,0	8,6	9,4	19,6	37,0	43,0	49,7	53,8	62,3	64,8
	50		4,3	6,9	8,6	23,0	34,5	41,3	48,9	53,8	60,6	68,2
	75		4,3	6,0	16,2	20,4	31,9	42,1	54,0	51,3	62,3	60,6
	100		7,7	7,7	16,2	17,9	31,1	46,4	54,8	50,4	64,0	62,3
	125		9,4	10,3	7,7	17,9	31,1	45,5	55,7	50,4	64,8	63,1
	150		6,9	11,1	8,6	16,2	29,4	44,7	51,4	49,6	64,0	61,4
	175		6,0	9,0	7,7	15,3	28,6	44,7	49,7	47,9	64,0	58,9

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas.

Figura 17. curva de isoconcentración NTU 11.8



Fuente: (Autores 2018)

Para el caso de la turbiedad de 11.8 NTU, se observa una gráfica con un porcentaje de remoción de partículas de una forma continua, y mostrando un coagulante que funciona de manera seguida. Se dice lo anterior porque el coagulante en 9.1 NTU no se comportó constante sino por el contrario actuó de manera sinusoidal.

3.1.7. Turbiedad NTU 14.9 (Rango 13.0-15.07)

Para preparar esta agua, se tuvo en cuenta el uso de bentonita; puesto que ya

empiezan a ser turbiedades que deben tener una cierta cantidad de partículas en suspensión, la dosis que se aplicó fue de 1.83 g

Se realizó una tabla de toma de datos en el laboratorio, donde horizontalmente se encuentran los tiempos, y verticalmente la profundidad en la que se toma cada turbiedad:

Tabla 24. turbiedad 14.9 NTU (datos Laboratorio)

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	14,9	10,2	9,1	8,5	7,6	6,9	5,9	5,8	5,4	5,1	4,6
	25		10,4	8	8	7,7	7,2	6	5,9	4,7	4,7	4,4
	50		9,8	8,2	7,9	7,8	7,3	6,2	5,9	5,5	4,8	4,4
	75		9,6	7,9	7,8	6,8	6,6	6	5,5	5,3	4,8	4,9
	100		9,7	7,3	7,3	7,2	6,4	5,7	5,3	5,3	4,6	4,8
	125		9,4	7,3	6,9	6,3	6,2	5,8	5,5	5,4	5	4,9
	150		9,4	7,4	6,8	6,5	6,2	5,4	5,4	5	4,9	4,8
	175		9,4	7,4	6,8	6,2	6,1	5,8	5,6	5,2	5,2	5

Fuente: (Autores 2018)

Se calculó el porcentaje de remoción de partículas, utilizando el mismo formato de tabla.

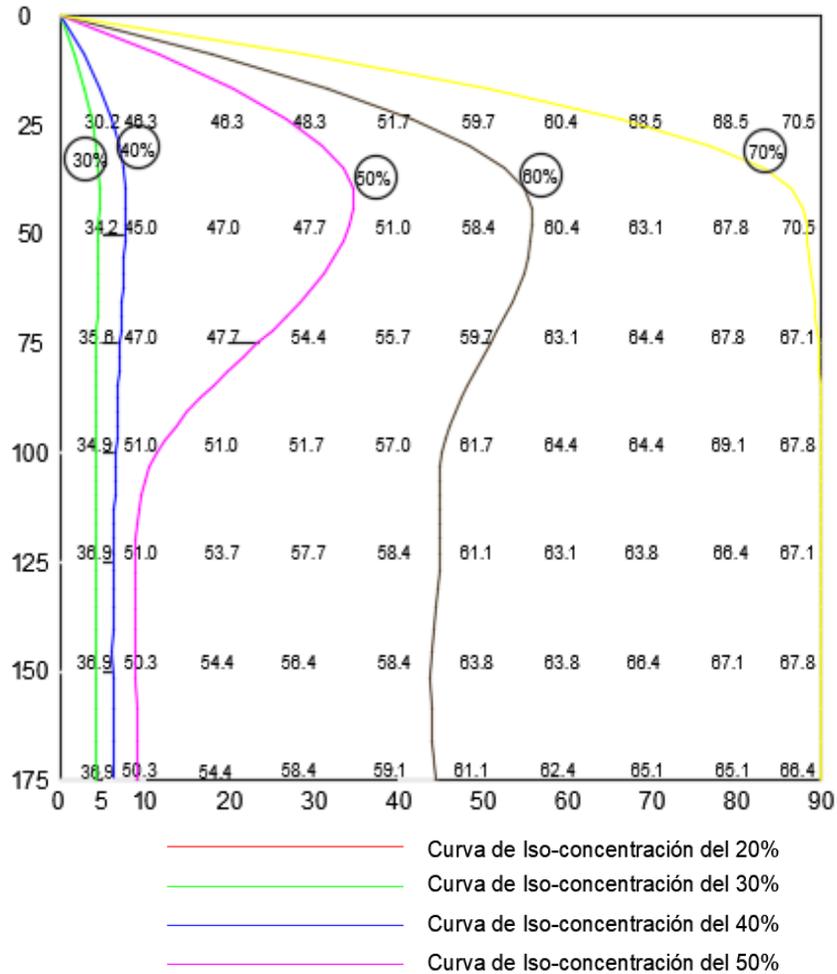
Tabla 25. porcentaje remoción de partículas NTU 14.9

		Tiempo (min)										
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Profundidad (m)	0	31,5	31,5	38,9	43,0	49,0	53,7	60,4	61,1	63,8	65,8	69,1
	25		30,2	46,3	46,3	48,3	51,7	59,7	60,4	68,5	68,5	70,5
	50		34,2	45,0	47,0	47,7	51,0	58,4	60,4	63,1	67,8	70,5
	75		35,6	47,0	47,7	54,4	55,7	59,7	63,1	64,4	67,8	67,1
	100		34,9	51,0	51,0	51,7	57,0	61,7	64,4	64,4	69,1	67,8
	125		36,9	51,0	53,7	57,7	58,4	61,1	63,1	63,8	66,4	67,1
	150		36,9	50,3	54,4	56,4	58,4	63,8	63,8	66,4	67,1	67,8
	175		36,9	50,3	54,4	58,4	59,1	61,1	62,4	65,1	65,1	66,4

Fuente: (Autores 2018)

Posteriormente se deben graficar las curvas de isoconcentración, donde cada color de línea es un porcentaje de remoción de partículas.

Figura 18. curva de isoconcentración NTU 14.9



Fuente: (Autores 2018)

Esta última grafica es particular porque inicia con un porcentaje de remoción de 30%, esto quiere decir que durante el proceso de mezcla rápida y mezcla lenta removi6 gran cantidad de part6culas. Adicional a esto, es el 6nico porcentaje de remoci6n que llego a un 70%, dejando entredicho que a mayor turbiedad mayor porcentaje de remoci6n, siempre y cuando su dosis sea la adecuada.

3.2 ECUACIONES DE ISOCONCENTRACI6N

Para la creaci6n de las siete (7) ecuaciones, se utiliz6 una regresi6n m6ltiple de tres

variables; una dependiente y dos independientes, se usó la herramienta Microsoft Excel (operaciones 2017).

3.2.1 Pasos para la regresión lineal

Este estudio solo dependerá del porcentaje de remoción, eso quiere decir que se traerá a colación, las tablas ya calculadas anteriormente en el numeral 3.1. con una diferencia, y es que para un correcto uso de la información; las profundidades estarán ubicadas horizontalmente, y el tiempo de retención se ubicarán verticalmente.

Paso a seguir será la creación de una nueva tabla, esta tendrá el objetivo de incluir la primera variable que es la dependiente. Se tiene que dividir en 100 cada porcentaje de remoción, y se aplicara la siguiente ecuación (San, Analytical approach for evaluation of settling column data 1989).

$$y = \left(\frac{1}{p} - 1\right) \text{ Ecuación 10}$$

Donde P = porcentaje de remoción en décimas.

Todos los valores Y, calculados con anterioridad, se ubican en una única columna. Y adicionalmente se aplica el logaritmo natural para cada uno de los porcentajes de remoción. La variable independiente X1, será el logaritmo natural del tiempo, de cada uno de los porcentajes de la primera columna y. y por último la segunda variable independiente llamada X2, será nuevamente el logaritmo natural de la profundidad de cada uno de los porcentajes de retención.

Este sistema se debe repetir para cada una de las turbiedades trabajadas en el numeral 3.1. Donde se encontrará para cada turbiedad una ecuación correspondiente, que genere porcentajes de remoción teóricos.

3.2.2 Regresión lineal

Después de realizar la regresión en el programa de Excel, este nos arroja una determinada cantidad de valores, que se muestran de la siguiente forma:

- Coeficiente de correlación múltiple
- Coeficiente de determinación R^2
- Intercepción
- Variable X 1
- Variable X 2

Los valores de interés para construir las ecuaciones serán la intercepción, variable X1 y variable X2. Adicional a esto el valor intercepción es únicamente el exponente de Euler, que se necesita para el cálculo de α en la ecuación 2, de este presente trabajo. Para una mayor congruencia llamaremos a la variable X1 (β), y a la variable X2 (κ).

Tabla 26. valores de α , β y κ

NTU Inicial	α	b	k	R^2
2	14,73	0,52	0,18	0,79
4	36,92	1,05	0,21	0,92
6,1	54,01	0,90	0,03	0,89
8,8	27,77	0,83	0,09	0,86
9,1	8,96	0,53	0,01	0,92
11,8	177,26	1,25	0,02	0,95
14,9	5,04	0,44	-0,08	0,96

Fuente: (Autores 2018)

Los valores anteriores, son el resultado de hacer la regresión lineal múltiple, para cada una de las turbiedades que se trabajaron. De acuerdo a esta tabla las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\%P(NTU 2) = \frac{T^{0.5}}{14.73H^{0.18}+T^{0.52}} \text{ Ecuación 11}$$

$$\%P(NTU 4) = \frac{T^{1.05}}{36.92H^{0.21}+T^{1.05}} \text{ Ecuación 12}$$

$$\%P(NTU 6.1) = \frac{T^{0.90}}{54.01H^{0.02}+T^{0.90}} \text{ Ecuación 13}$$

$$\%P(NTU 8.8) = \frac{T^{0.82}}{27.76H^{0.08}+T^{0.82}} \text{ Ecuación 14}$$

$$\%P(NTU 9.1) = \frac{T^{0.53}}{8.96H^{0.01}+T^{0.53}} \text{ Ecuación 15}$$

$$\%P(NTU 11.8) = \frac{T^{1.25}}{177.25H^{0.01}+T^{1.25}} \text{ Ecuación 16}$$

$$\%P(NTU 14.9) = \frac{T^{0.43}}{5.04H^{-0.08}+T^{0.43}} \text{ Ecuación 17}$$

Ya con las fórmulas se puede notar un resultado; pero además de esto, se debe mirar el coeficiente de correlación múltiple, pues como ya se ha visto anteriormente, este nos ayuda a revisar la asociación de las variables; es decir, si el valor está cercano a cero (0), es una mala relación lineal. Pero si, por el contrario, el valor es muy cercano a uno (1), indica una excelente asociación, y por ende la ecuación será más confiable (Universidad de Huelva 2008). A continuación, se muestra cada turbiedad, con su correspondiente coeficiente de correlación múltiple.

Tabla 27. Coeficiente de correlación múltiple

Turbiedad inicial	Coeficiente de correlación múltiple (R²)
2	0,79
4	0,92
6,1	0,88
8,8	0,86
9,1	0,91
11,8	0,94
14,9	0,95

Fuente: (Autores 2018)

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Ya realizados los laboratorios, la toma de datos, la organización de la información, la regresión lineal y la creación de las ecuaciones. se definen ciertos resultados que genera un avance en el estudio de la sedimentación tipo II.

4.1 PRUEBA DE LAS ECUACIONES ENCONTRADAS

Uno de los objetivos más claros del presente estudio, es la obtención de determinadas ecuaciones para encontrar el porcentaje de remoción, para cierta turbiedad en un determinado tiempo y diferente altura. Se debe probar cada ecuación, con el fin de construir el comportamiento que tiene el sulfato de aluminio tipo B, en las turbiedades definidas en el numeral 3.

4.1.1 tabla teórica porcentaje de remoción (2 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 9. Ya consignadas en el numeral 3.2.2 regresión lineal.

Tabla 28. porcentaje de remoción teórico (2 NTU)

		profundidad (cm)							
		0	25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	10	11,2	10,0	9,3	8,9	8,6	8,3	8,1	
	20	15,3	13,7	12,9	12,3	11,9	11,5	11,2	
	30	18,2	16,4	15,4	14,8	14,3	13,9	13,5	
	40	20,6	18,6	17,5	16,8	16,2	15,7	15,4	
	50	22,6	20,4	19,3	18,4	17,8	17,4	17,0	
	60	24,3	22,0	20,8	19,9	19,3	18,8	18,3	
	70	25,8	23,4	22,1	21,2	20,6	20,0	19,6	
	80	27,1	24,7	23,4	22,4	21,7	21,2	20,7	
	90	28,4	25,9	24,5	23,5	22,8	22,2	21,7	

		Profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
Tiempo (min)	0	11,2	10,0	9,3	8,9	8,6	8,3	8,1
	10	15,3	13,7	12,9	12,3	11,9	11,5	11,2
	20	18,2	16,4	15,4	14,8	14,3	13,9	13,5
	30	20,6	18,6	17,5	16,8	16,2	15,7	15,4
	40	22,6	20,4	19,3	18,4	17,8	17,4	17,0
	50	24,3	22,0	20,8	19,9	19,3	18,8	18,3
	60	25,8	23,4	22,1	21,2	20,6	20,0	19,6
	70	27,1	24,7	23,4	22,4	21,7	21,2	20,7
	80	28,4	25,9	24,5	23,5	22,8	22,2	21,7
	90							

Fuente: (Autores 2018)

Comparando el porcentaje de remoción teórico con el experimental, se identifica cierta varianza, y se deduce que su poca precisión se debe al factor de correlación múltiple, pues es un valor que se aleja del número uno e indica una mala relación lineal. Pero los valores que nos arroja esta ecuación no son del todo descabellados, porque si se realiza un análisis dato a dato se encuentra que la mayor variación en un 3%.

4.1.2 tabla teórica porcentaje de remoción (4 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 10.

Tabla 29. porcentaje de remoción teórico (4 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0	13,4	11,8	10,9	10,3	9,9	9,6	9,3
	10	24,3	21,7	20,3	19,3	18,6	18,0	17,5
	20	33,0	29,8	28,0	26,8	25,9	25,2	24,6
	30	40,0	36,5	34,5	33,2	32,1	31,3	30,6
	40	45,8	42,1	40,0	38,6	37,5	36,6	35,8
	50	50,5	46,9	44,7	43,2	42,1	41,1	40,3
	60	54,6	50,9	48,8	47,2	46,1	45,1	44,3
	70	58,1	54,4	52,3	50,8	49,6	48,6	47,8
	80	61,0	57,5	55,4	53,9	52,7	51,7	50,9
	90							

		Profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
Tiempo (min)	0							
	10	13,4	11,8	10,9	10,3	9,9	9,6	9,3
	20	24,3	21,7	20,3	19,3	18,6	18,0	17,5
	30	33,0	29,8	28,0	26,8	25,9	25,2	24,6
	40	40,0	36,5	34,5	33,2	32,1	31,3	30,6
	50	45,8	42,1	40,0	38,6	37,5	36,6	35,8
	60	50,5	46,9	44,7	43,2	42,1	41,1	40,3
	70	54,6	50,9	48,8	47,2	46,1	45,1	44,3
	80	58,1	54,4	52,3	50,8	49,6	48,6	47,8
	90	61,0	57,5	55,4	53,9	52,7	51,7	50,9

Fuente: (Autores 2018)

Siempre existe un error relativo cuando se trata de regresiones lineales, para este caso se realizó un promedio, de error relativo entre porcentaje de remoción teórico y experimental, este arrojo 4.06% de error, lo cual no influye demasiado. Por otro lado, su coeficiente de correlación múltiple se encuentra en 0.92, este sería otro valor positivo para generar viabilidad a la formula.

4.1.3 tabla teórica porcentaje de remoción (6.1 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 11.

Tabla 30. porcentaje de remoción teórico (6.1 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	12,0	11,8	11,6	11,6	11,5	11,4	11,4
	20	20,2	19,9	19,8	19,6	19,5	19,5	19,4
	30	26,8	26,4	26,2	26,1	25,9	25,8	25,8
	40	32,2	31,8	31,5	31,4	31,2	31,1	31,0
	50	36,8	36,3	36,1	35,9	35,7	35,6	35,5
	60	40,7	40,2	39,9	39,7	39,6	39,5	39,4
	70	44,1	43,6	43,3	43,1	43,0	42,8	42,7
	80	47,0	46,6	46,3	46,1	45,9	45,8	45,7
	90	49,7	49,2	49,0	48,8	48,6	48,5	48,4

		Profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
Tiempo (min)	0							
	10	12,0	11,8	11,6	11,6	11,5	11,4	11,4
	20	20,2	19,9	19,8	19,6	19,5	19,5	19,4
	30	26,8	26,4	26,2	26,1	25,9	25,8	25,8
	40	32,2	31,8	31,5	31,4	31,2	31,1	31,0
	50	36,8	36,3	36,1	35,9	35,7	35,6	35,5
	60	40,7	40,2	39,9	39,7	39,6	39,5	39,4
	70	44,1	43,6	43,3	43,1	43,0	42,8	42,7
	80	47,0	46,6	46,3	46,1	45,9	45,8	45,7
	90	49,7	49,2	49,0	48,8	48,6	48,5	48,4

Fuente: (Autores 2018)

De acuerdo a los coeficientes de correlación ya encontrados, se puede deducir una cierta des congruencia en el modelo de regresión, puesto que para estas turbiedades tan bajas que entran a las plantas, no se está comportando de la mejor manera el porcentaje de remoción teórico contra el experimental.

4.1.4 tabla teórica porcentaje de remoción (8.8 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 12.

Tabla 31. porcentaje de remoción teórico (8.8 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	15,5	14,7	14,2	13,9	13,7	13,5	13,3
	20	24,5	23,4	22,8	22,3	22,0	21,7	21,5
	30	31,3	30,0	29,2	28,7	28,3	28,0	27,7
	40	36,6	35,2	34,4	33,8	33,4	33,0	32,7
	50	41,0	39,5	38,7	38,1	37,6	37,2	36,9
	60	44,7	43,2	42,3	41,7	41,2	40,8	40,5
	70	47,9	46,4	45,5	44,8	44,4	44,0	43,6
	80	50,7	49,1	48,2	47,6	47,1	46,7	46,4
	90	53,1	51,6	50,7	50,0	49,5	49,1	48,8

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
Tiempo (min)	0							
	10	15,5	14,7	14,2	13,9	13,7	13,5	13,3
	20	24,5	23,4	22,8	22,3	22,0	21,7	21,5
	30	31,3	30,0	29,2	28,7	28,3	28,0	27,7
	40	36,6	35,2	34,4	33,8	33,4	33,0	32,7
	50	41,0	39,5	38,7	38,1	37,6	37,2	36,9
	60	44,7	43,2	42,3	41,7	41,2	40,8	40,5
	70	47,9	46,4	45,5	44,8	44,4	44,0	43,6
	80	50,7	49,1	48,2	47,6	47,1	46,7	46,4
	90	53,1	51,6	50,7	50,0	49,5	49,1	48,8

Fuente: (Autores 2018)

La regresión muestra una poca asociación de las variables, para generar valores cercanos al porcentaje de remoción real, aunque en las partes intermedias tiende a ser algo preciso, su dispersión en los extremos lo hace ser inadecuado. Y vuelve al tema su factor de correlación, un poco bajo, para acertar en la mayoría de las muestras.

4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (9.1 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 13.

Tabla 32. porcentaje de remoción teórico (9.1 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	26,9	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,5
	20	34,8	34,6	34,5	34,4	34,4	34,3	34,3
	30	39,8	39,6	39,5	39,5	39,4	39,3	39,3
	40	43,6	43,4	43,3	43,2	43,1	43,1	43,0
	50	46,5	46,3	46,2	46,1	46,1	46,0	46,0
	60	49,0	48,8	48,6	48,6	48,5	48,4	48,4
	70	51,0	50,8	50,7	50,6	50,6	50,5	50,5
	80	52,8	52,6	52,5	52,4	52,3	52,3	52,2
	90	54,4	54,2	54,1	54,0	53,9	53,9	53,8

Fuente: (Autores 2018)

De cierto modo va mostrando mejoría en lo que se refiere a distancia de datos, aunque no se encuentra dentro de un error aceptable, el estudio se va dirigiendo a una conclusión; el formato de ecuación no es el adecuado para determinado tipo de turbiedad.

4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (11.8 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 14.

Tabla 33. porcentaje de remoción teórico (11.8 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	8,7	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	8,4
	20	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	18,0	18,0
	30	27,3	27,1	26,9	26,8	26,8	26,7	26,7
	40	35,0	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2
	50	41,6	41,3	41,1	41,0	40,9	40,8	40,8
	60	47,2	46,9	46,7	46,6	46,5	46,4	46,4
	70	52,0	51,7	51,5	51,4	51,3	51,2	51,2
	80	56,1	55,8	55,7	55,6	55,5	55,4	55,3
	90	59,7	59,4	59,3	59,2	59,1	59,0	58,9

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	8,7	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	8,4
	20	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	18,0	18,0
	30	27,3	27,1	26,9	26,8	26,8	26,7	26,7
	40	35,0	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2
	50	41,6	41,3	41,1	41,0	40,9	40,8	40,8
	60	47,2	46,9	46,7	46,6	46,5	46,4	46,4
	70	52,0	51,7	51,5	51,4	51,3	51,2	51,2
	80	56,1	55,8	55,7	55,6	55,5	55,4	55,3
	90	59,7	59,4	59,3	59,2	59,1	59,0	58,9

Fuente: (Autores 2018)

A medida que la turbiedad se va incrementando, el porcentaje de remoción teórico se va acercando gradualmente al experimental. Es una afirmación lógica, si se trae a interpretación el factor de correlación, este se va incrementando a la misma medida que los valores empiezan a ser más exactos.

4.1.5 tabla teórica porcentaje de remoción (14.9 NTU).

Para generar la siguiente tabla es necesario el uso de la ecuación 15.

Tabla 34. porcentaje de remoción teórico (14.9 NTU)

		profundidad (cm)						
		25	50	75	100	125	150	175
tiempo (min)	0							
	10	41,4	42,8	43,6	44,2	44,6	45,0	45,3
	20	48,9	50,3	51,1	51,7	52,2	52,5	52,8
	30	53,3	54,7	55,5	56,1	56,5	56,9	57,2
	40	56,4	57,8	58,6	59,2	59,6	60,0	60,3
	50	58,8	60,1	60,9	61,5	61,9	62,3	62,6
	60	60,7	62,0	62,8	63,4	63,8	64,1	64,4
	70	62,3	63,6	64,4	64,9	65,3	65,7	65,9
	80	63,6	64,9	65,7	66,2	66,6	67,0	67,2
	90	64,8	66,1	66,8	67,4	67,8	68,1	68,4

Fuente: (Autores 2018)

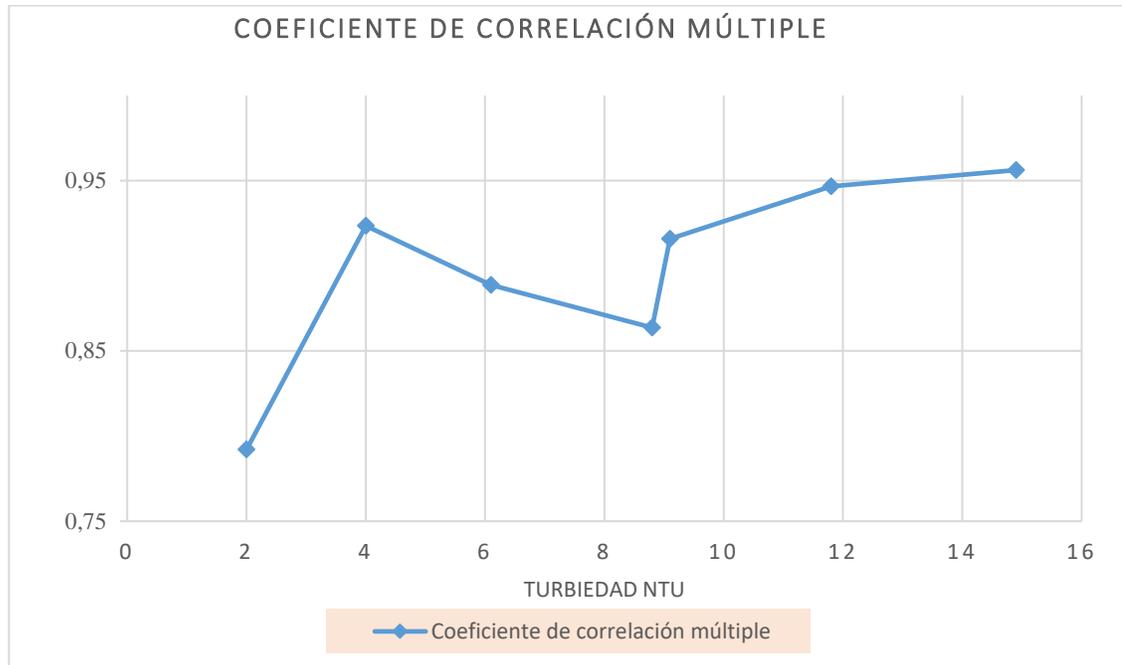
Esta es la última turbiedad y ecuación de estudio, y se confirma el comportamiento de la ecuación. Dando así un resultado valedero, que gira en torno a poner en cuestionamiento, las ecuaciones que se podrían estar usando en plantas de tratamiento, para calcular el porcentaje de remoción en partículas, sin tener en cuenta la calidad de agua que está entrando.

4.2 COMPORTAMIENTO DE LAS ECUACIONES.

Se pudo observar el comportamiento de cada una de las ecuaciones, pero no se ha

materializado, este es el motivo de la siguiente gráfica:

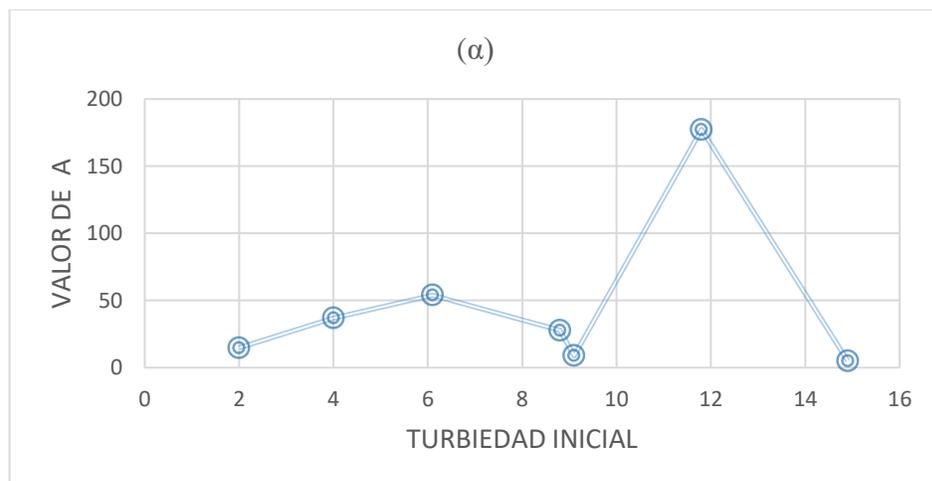
Figura 19. comportamiento coeficiente de correlación múltiple



Fuente: (Autores 2018)

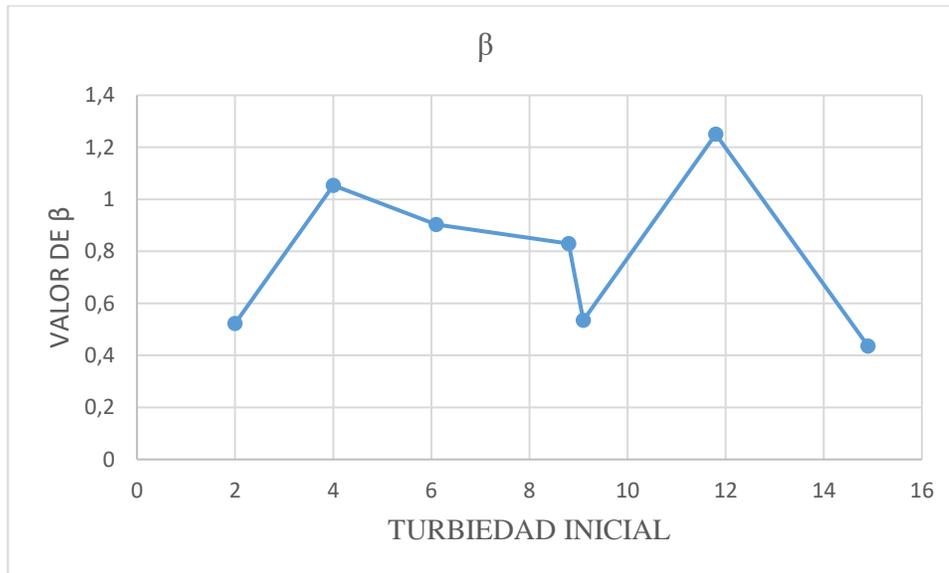
Adicional a esto se realizaron las gráficas que presentan el comportamiento de las tres variables que arroja la regresión lineal múltiple.

Figura 20. Comportamiento de variable α



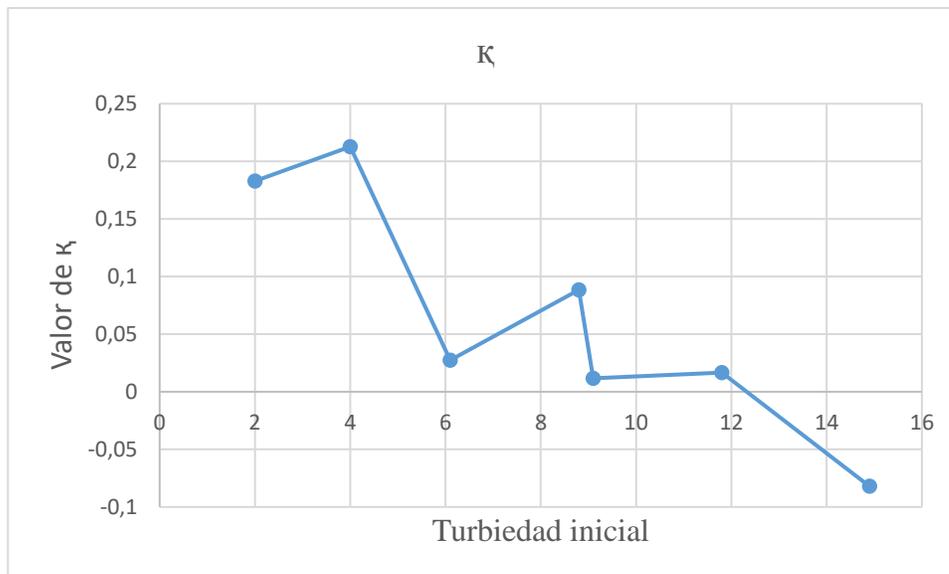
Fuente: (Autores 2018)

Figura 21 Comportamiento de variable β



Fuente: (Autores 2018)

Figura 22. Comportamiento de variable κ



Fuente: (Autores 2018)

Se puede evidenciar que los coeficientes no poseen relación alguna, por este motivo se afirma que el modelo de San's no aplica para turbiedades bajas.

5. CONCLUSIONES

- Los estudios de este presente trabajo indican valores, tablas, ecuaciones y graficas que simulan de la mejor manera, el comportamiento del agua en cuanto a turbiedad en la entrada de las PTAPS. Encontrando rangos en los que se sitúa la turbiedad con mayor frecuencia, ese fue el punto alto de esta investigación, puesto que no se tomaron valores tomados aleatoriamente. Sino por el contrario, datos reales en las plantas del municipio de Cundinamarca.
- Las curvas de iso-concentración indican en buena medida, el comportamiento del coagulante sulfato de aluminio tipo B (granulado), demostrando la poca disminución de turbiedades, por causa de los rangos bajos que se manejan, por ende, la remoción de partículas no va a ser grande.
- Se crearon 7 nuevas ecuaciones, para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas en condiciones ideales de pH, de las cuales, las más confiables son la ecuación 14 y la ecuación 15, por dos factores; el primero, el factor de correlación de estas dos ecuaciones es el más alto, quiere decir que no existe una dispersión muy grande y el modelo de regresión funciona en gran medida. Segundo, un análisis visual de comparación de datos, entre las tablas de porcentaje de remoción teórico y experimental, dictaminó una frecuente exactitud en las dos turbiedades mayores.
- Se identificó en gran medida, que las ecuaciones que están representado el comportamiento del porcentaje de remoción de partículas, no es el adecuado, cuando se trata de turbiedades bajas, como las que realmente están ingresando a las PTAPS. En cuanto la turbiedad sea más alta, el modelo se acerca más a la efectividad, y esto se puede demostrar con datos del coeficiente de correlación, donde indica un crecimiento proporcionalmente directo a el incremento de la turbiedad.
- Adicionalmente el coeficiente de correlación aumento de una forma lineal, indicando una mejoría de las ecuaciones (véase figura 15).

6. RECOMENDACIONES

- Para una mayor exactitud, sería bueno realizar una mayor cantidad de laboratorios para cada rango de turbiedad, generando así ecuaciones más confiables, y de no ser así, indagar en la búsqueda de un nuevo modelo que simule de mejor forma, el comportamiento del porcentaje de remoción de partículas en función de tres variables, las cuales podrían ser: turbiedad, profundidad y tiempo.

Bibliografía

- Autores. *variacion turbiedad en porcentaje de particulas*. investigativo, Bogotá: Universidad Catolica, 2018.
- Beltran, Luis. *Turbiedad, floculacion y sedimentacion de aguas*. 12 de 12 de 2011. <http://procesosdeclarificaciondelagua.blogspot.com/> (último acceso: 06 de 10 de 2018).
- CEPIS. «La calidad fisicoquimica del agua y su influencia en el tratamiento.» *La calidad fisicoquimica del agua y su influencia en el tratamiento*. 2002. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14455/1/PROYECTO%20SEDIMENTACION%20TIPO%20II.pdf> (último acceso: 05 de 10 de 2018).
- Farrás, Luis E. Pérez. «Teoria de la Sedimentación.» 01 de 08 de 205. http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoria_sedimentacion.pdf (último acceso: 30 de 10 de 2018).
- Fibras y Normas. *Potabilizacion: efinicion, Etapas del proceso e importancia*. Bucaramanga, junio de 2017.
- Hernandez, Gabriel Jaime Posada. «3. Tabulacion de datos estadisticos.» En *ELEMENTOS BASICOS DE LA ESTADISTICA DESCRIPTIVA PARA EL ANALISIS DE DATOS*, de Gabriel Jaime Posada Hernandez, 33-39. Medellin: Funlam, 2016.
- monografias.com. *monografias.com*. 16 de 04 de 2016. <https://www.monografias.com/trabajos93/materiales-e-instrumentos-laboratorio/materiales-e-instrumentos-laboratorio.shtml> (último acceso: 25 de Octubre de 2018).
- Moreno, Ruthbel Yesid Ovalle Celis - Cristian Alonso. *Cartilla guía para la ejecución de prácticas de laboratorio en saneamiento de agua potable*. Guía, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2014.
- operaciones, Gestion de. *REgresion lineal multiple para Excel*. Madrid, 2017.
- Pérez, Jorge Arturo. *Tratamiento de Aguas*. Argumentativo, Bogotá: Universidad Nacional, 1992.
- Pignatta, Danilo Andrés Ríos. *Utilización de parametros "Eficiencia" en remoción*

- de turbiedad en sedimentos*. Informe, Montevideo: En linea, 1998.
- Portilla, Oscar Iván Orduz - Jessica Cirstina. *Determinación de las curvas características de la sedimentación tipo II con diferentes coagulantes comerciales a nivel laboratorio*. Tesis, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2017.
- Regla de Sturges. *Regla de Sturges*. Medellin, Antioquia, 2012.
- Ripe, Ruthbel Yesid Ovalle Celis - Cristian Alonso Moreno. «Cartilla guía para la ejecución de prácticas de laboratorio en saneamiento de agua potable.» <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1797/1/Proyecto.pdf>. 15 de 11 de 2014.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1797/1/Proyecto.pdf> (último acceso: 02 de 10 de 2018).
- Rojas, Jairo Alberto Romero. «tipos de sedimentacion.» En *Potabilizacion de Agua*, de Jairo Alberto Romero Rojas, 252. Ciudad de Mexico: ALFA OMEGA GRUPO EDITOR, 1999.
- Sáenz, Germán Monsalve. *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- San, Hasan Ali. *Analytical approach for evaluation of settling column data* . Gran Bretaña: J Environ, 1989.
- San, Hasan Ali. «Analytical approach por evaluation of settling column data.» *J. Environ. Eng*, 1994: 455-461.
- SITHEBE, NOMCEBO PRINCESS. *FLOCCULATION MODELLING OF DIFFERENTIAL SEDIMENTATION BASED ON FUNDAMENTAL PHYSICS OF SETTLING PARTICLES AND FRACTAL THEORY* . Tesis, Pretoria, Sudafrica: University of Pretoria, 2013.
- Triple A S.A. E.S.P. *Etapas de la poltablilizacion del agua*. Barranquilla: Triple A S.A. E.S.P., 2016.
- Universidad de Huelva. *CORRELACIÓN MULTIPLE Y CORRELACIÓN CANÓNICA*. Cordoba: Universidad d´ Cordoba, 2008.