

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FILTRACIÓN (λ) GLOBAL, PARA 3 TIPOS DE
LECHOS FILTRANTES UTILIZANDO LA TURBIEDAD INICIAL EN PTAP A NIVEL
CUNDINAMARCA.**

NOMBRE: ASTRID TATIANA HERNÁNDEZ CRUZ - CÓDIGO: 506611

NOMBRE: YEIMER ANDREY TAUTIVA VILLALOBOS - CÓDIGO: 507113



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ, D. C., 17 DE NOVIEMBRE DE 2020

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FILTRACIÓN (λ) GLOBAL, PARA 3 TIPOS DE LECHOS FILTRANTES UTILIZANDO LA TURBIEDAD INICIAL EN PTAP A NIVEL CUNDINAMARCA.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

NOMBRE: ASTRID TATIANA HERNÁNDEZ CRUZ - CÓDIGO: 506611

NOMBRE: YEIMER ANDREY TAUTIVA VILLALOBOS - CÓDIGO: 507113

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR

INGENIERO FELIPE SANTAMARÍA ÁLZATE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ, D. C., 17 DE NOVIEMBRE DE 2020



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.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Procesos de plantas de tratamiento de agua potable.....	26
--	----

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Estructura para filtros.....	43
Imagen 2. Espesor de materiales filtrantes de practica	44
Imagen 3. Dosificación de bentonita.....	46
Imagen 4. Agua cruda del rio Teusacá.....	47
Imagen 5. Turbiedades obtenidas - con disolución de agua cruda del rio Teusacá	47
Imagen 6. Aguas problema diluidas del agua cruda de rio Teusacá	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de filtro.....	17
Figura 2. Medios de filtración.....	17
Figura 3. Filtro rápido convencional.....	23
Figura 4. Espesores de materiales filtrantes.....	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Modelos matemáticos de filtración.....	10
Tabla 2. Caracterización del filtro 1	12
Tabla 3. Caracterización del filtro 2	12
Tabla 4. Caracterización del filtro 3	13
Tabla 5. Caracterización del filtro 4	13
Tabla 6. Caracterización de turbidez antes y después de los 4 filtros	13
Tabla 7. Indicadores de eficiencia	14
Tabla 8. Eficiencias de remoción de turbidez en los 4 filtros.	14
Tabla 9. Principales características de filtros.....	18
Tabla 10. Características de filtración convencional.....	19
Tabla 11. Rangos de tasa de filtración lenta en múltiples etapas (FIME)	19
Tabla 12. Serie estándar americana.....	22
Tabla 13. Clasificación de filtros	23
Tabla 14. Arena en filtros rápidos.....	27
Tabla 15. Carbón de tipo antracita.....	28
Tabla 16. Fase 1 – Fase de recolección y elección de datos de turbiedad a ensayar.....	32
Tabla 17-. Fase 2 - Fase de ajuste de equipos y preparación de materiales.....	33
Tabla 18. Fase 3 - Fase de preparación de aguas problema	34
Tabla 19. Fase 4 - Fase de filtración de aguas problema	34
Tabla 20. Fase 5 - Fase de cálculo de coeficientes de filtración.....	35

Tabla 21. Fase 6 - Fase de consolidación del trabajo y conclusiones de la investigación.....	36
Tabla 22. Presupuesto del proyecto	37
Tabla 23. Turbiedades de agua cruda en las ptap de los municipios de Cundinamarca	38
Tabla 24. Análisis estadístico de NTU para determinación de aguas problema	40
Tabla 25. Valores de representación gráfica – diagrama de caja y bigotes.....	40
Tabla 26. D60 - D10, Arena sílice.....	41
Tabla 27. D60 - D10, Antracita	42
Tabla 28. Parámetros de cumplimiento de Arena sílice.....	42
Tabla 29. Valores de turbiedades a evaluar	45
Tabla 30. Dosis de bentonita requerida	46
Tabla 31. Valores de turbiedad teórica vs turbiedad experimental	48
Tabla 32. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita	49
Tabla 33. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita	50
Tabla 34. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada con bentonita	51
Tabla 35. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada con bentonita	52
Tabla 36. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada experimentalmente	53
Tabla 37. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada experimentalmente	54
Tabla 38. Coeficientes de filtración calculados	56
Tabla 39. Eficiencia de remoción.....	57
Tabla 40. Caudal y carga superficial.....	58

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Variación de la concentración en función del espesor del lecho filtrante, para (t=0).....	9
Grafica 2. Eficiencia de remoción de Turbidez	15
Grafica 3. Diagrama de caja y bigotes.....	41
Grafica 4. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q1	59
Grafica 5. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q2	60
Grafica 6. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q3	60
Grafica 7. Eficiencias de remoción cuartil Q1	61
Grafica 8. Eficiencias de remoción cuartil Q2	61
Grafica 9. Eficiencias de remoción cuartil Q3	62
Grafica 10. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q1	62
Grafica 11. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q2	63
Grafica 12. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q3	63

TÍTULO.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FILTRACIÓN (λ) GLOBAL, PARA 3 TIPOS DE LECHOS FILTRANTES UTILIZANDO LA TURBIEDAD INICIAL EN PTAP A NIVEL CUNDINAMARCA.

ALTERNATIVA: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: SANEAMIENTO DE COMUNIDADES

EJE TEMÁTICO: OPERACIONES UNITARIAS DE PTAP.

1. INTRODUCCIÓN.

Este proyecto se basa fundamentalmente en determinar el coeficiente de filtración global (λ) para tres tipos de lechos filtrantes comúnmente utilizados en las plantas potabilizadoras de agua: arena, antracita y la unión de estos dos materiales como un solo lecho. Entendiendo que el coeficiente de filtración o también llamado módulo de impedimento hace referencia a un factor de proporcionalidad entre la profundidad de la capa del lecho filtrante y la concentración de partículas del mismo, se pretende analizar mediante el modelo matemático de IVES, acompañado de un procedimiento experimental de laboratorio, el comportamiento de los filtros utilizados en las plantas de tratamiento de agua potable – PTAP.

De manera general, por medio de este estudio de busca que este coeficiente de filtración global (λ) esté basado además en una caracterización general que incluya los procesos fisicoquímicos y biológicos que suceden en la filtración, por lo que, este proyecto tiene en cuenta las turbiedades reales del agua de entrada de las plantas potabilizadoras a nivel Cundinamarca, ya que estas son objeto de estudio principal para un análisis y determinación de concentración global, la cual contribuirá a la preparación de tres muestras de agua problema, por medio de las cuales se estudiara cada uno de los lechos filtrantes, pues con ello, se busca evaluar los factores más influyentes en el proceso de la filtración, tales como: el tiempo, la velocidad y la remoción de partículas suspendidas.

Si bien, al final de este proceso podrá observarse la variación de la concentración de turbiedad en función del espesor del lecho filtrante para un tiempo dado, puesto que la colmatación progresiva del lecho varía con respecto a la eficiencia de remoción de las partículas según las capas utilizadas como medios filtrantes.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

2.1. ANTECEDENTES

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que ocurre a través de un medio poroso [1]. Su objetivo principal se trata de separar las partículas y los microorganismos, que no han quedado retenidos en los procesos anteriores de potabilización, como la coagulación y la sedimentación [2].

Para describir el proceso de la filtración, pueden existir diferentes maneras para su efectucción, ya sea dependiendo de su carga superficial (filtros lentos o rápidos), el medio filtrante (poroso o granular), su dirección de flujo (descendente o ascendente) y por último su trabajo, ya que este puede generarse por gravedad o por presión.

Filtración Rápida

La función de los filtros rápidos como tratamiento consiste en aclarar el agua mediante la eliminación de pequeñas partículas, sin embargo, en otras circunstancias se encuentran otros beneficios: por ejemplo, los filtros primarios en el tratamiento del agua pueden oxidar el amoníaco en el agua a nitrito y nitrato por la acción de Nitrosomonas y Nitrobacter, además de los sólidos en suspensión que se

pueden llegar a retener en los granos del filtro, ya que el proceso de filtración rápida a comparación de la filtración lenta tiene que ver más con la acción de los procesos fisicoquímicos y no con los procesos biológicos, que a pesar de ser muy importantes incurren menos en este sistema [3].

En la historia de la filtración, los filtros que se utilizaron inicialmente, tenían como propósito un carácter doméstico, donde generalmente estos estaban conformados en toda su profundidad por piedras porosas, sin embargo, también hubo muchos otros, que se conformaban por materiales fibrosos.

Para la descripción general en cuanto al comportamiento de los filtros, no se ha podido encontrar un modelo matemático exacto que así lo describa, no obstante, diferentes autores han desarrollado expresiones matemáticas, las cuales establecen relaciones entre las diferentes variables de este proceso [2].

En la actualidad de manera general los modelos matemáticos que describen la variación de la concentración en los medios filtrantes, están dados por la siguiente formula:

$$-\frac{dC}{dL} = F \quad \text{Ecuación (1)}$$

Según la Ecuación (1) se establece que la reducción de la concentración de partículas (C) a través de la profundidad del medio filtrante (L) es función de la concentración de partículas (C), del depósito específico (σ) y de parámetros específicos del modelo. La primera tentativa para determinar la función F fue hecha en 1937 por Iwasaki. A partir de estudios realizados con una variedad de partículas discretas, sin aplicación de coagulantes y con una velocidad de aproximación inferior a $12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$, Iwasaki propuso la siguiente ecuación [1]:

$$-\frac{dC}{dL} = \lambda \cdot C \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

λ = Es el Coeficiente del filtro o módulo de impedimento, dado en (L^{-1})

C = Es la concentración remanente de la suspensión, dado en (L^3/L^3)

La ecuación (2), es desarrollada en un principio para los filtros lentos, en los cuales se tiene en cuenta que la acción física del cernido es dominante y a su vez que el medio filtrante este limpio. Pues esta ecuación se basa en que cualquier subcapa del filtro presenta la misma eficiencia de remoción, a partir de la cual se obtiene:

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda_0 L} \quad \text{Ecuación (3)}$$

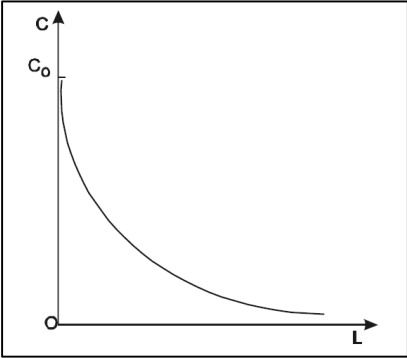
Donde:

C_0 = Es la concentración inicial de partículas suspendidas o NTU, dada en (L^3/L^3).

λ_0 = Es igual al coeficiente inicial de filtración, dado en (L^{-1}).

La ecuación (3) puede evidenciar la variación de la concentración en función de una exponencial con respecto al espesor del lecho filtrante para un $(t=0)$, tal como se evidencia en la siguiente figura [1]:

Grafica 1. Variación de la concentración en función del espesor del lecho filtrante, para $(t=0)$



Fuente: Ing. Maldonado Víctor. Ingeniería Sanitaria

Tabla 1. Modelos matemáticos de filtración

Autor	Año	Expresión	Variables
Iwasaki	1937	$\frac{dI}{dL} = + \lambda I$	I = concentración por cm ²
Ives	1962	$\frac{dC}{dL} = - \lambda C$ $\lambda = \lambda_i K\sigma - \frac{\theta\sigma^2}{\rho_0 - \sigma}$	σ, C, ρ_0
Ives	1969	$\lambda = \lambda_i \left(1 + \frac{\beta\sigma}{\rho_0}\right)^y \left(1 + \frac{\sigma}{\rho_0}\right)^z \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_v}\right)^x$	β, ρ_0, σ
Deb	1970	$C = \frac{V}{\rho_0 - \sigma} \frac{dC}{dL} + \frac{dC}{dt}$	C ρ_0
Adín y Rebhun	1970	$\frac{d\sigma}{dt} = K_1 C (F - \sigma) - K_2 \sigma J$	F = capacidad del filtro J = gradiente hidráulico K ₁ , K ₂ = coeficiente de adherencia y desprendimiento. σ, C
Ginn y Otros	1992	$\frac{dC}{dZ} = 1,5 \left(\frac{1 - \rho_0}{dc}\right) \alpha n_0 C$	d = diámetro del grano n ₀ = eficiencia de remoción del colector α = factor de eficiencia de las colisiones

Fuente: Ing. Maldonado Víctor. Ingeniería Sanitaria

Avances en la filtración de lechos profundos

La filtración en un lecho profundo es una práctica de ingeniería de larga duración, que normalmente se utiliza para eliminar partículas coloidales de suspensiones líquidas diluidas. Debido a las complejidades que se presentan en el proceso de la filtración, tales como: la eficiencia de la retención de partículas, el cambio del filtro debido a la deposición y su efecto en el rendimiento, se han desarrollado avances con el fin de interpretar estos procesos, los cuales pueden representarse en dos enfoques complementarios: fenomenológicos y teóricos. El enfoque fenomenológico describe la dinámica del proceso, mientras que, el enfoque teórico hace parte del uso de formulaciones matemáticas como las ecuaciones diferenciales parciales, en las cuales se aplican las características propias de la filtración mediante mecanismos de acción y aplicaciones dadas en general por valores obtenidos en experimentos a escala de banco [4].

Otros estudios específicos, basados en modelos de medios porosos (Capilar y Brinkman), fueron también utilizados para el estudio de filtración de lecho profundo, en el cual se incluye el cálculo del coeficiente del filtro y la caída de presión. Si bien, mientras que en el modelo capilar el coeficiente del filtro se estima con el cálculo de la trayectoria, por medio de iones que determinan el cambio de las partículas a medida que pasan por el filtro, por otro lado el modelo de Brinkman fue encontrado para dar un buen acuerdo también para el coeficiente del filtro pero solo por medio de resultados experimentales, de lo cual al final se obtiene que, de los dos modelos, el Capilar tan solo estuvo entre uno y dos órdenes de magnitud más bajos que los datos experimentales de Brinkamn, por lo que en conclusión se obtiene que son los granos del filtro quienes controlan la mayor parte de esta eficiencia [5].

Filtración Biología y Microfiltración

Se debe tener en cuenta que, en la producción de agua potable de una instalación de recuperación de recursos hídricos, el afluente puede utilizar dos enfoques principales. El primer enfoque se basa en tecnologías de membrana, microfiltración (MF), inversa ósmosis (RO), ultravioleta (UV) y proceso avanzado de oxidación (AOP) en secuencia (MF-RO-UV-AOP), mientras que el segundo enfoque se minimiza el uso de membranas y en su lugar se utiliza una combinación de floculación, sedimentación, ozonización, filtración biológicamente activa o filtro biológicamente activo (BAF), carbón activado granular (GAC), e irradiación ultravioleta (UV) [6] que en secuencia se denomina (O₃-BAF-GAC-UV) [7]. No obstante, este proyecto se profundiza únicamente en una parte del segundo enfoque mencionado, el cual reside especialmente en la filtración, ya que, en esta configuración se hace general el tratamiento de potabilización, pues la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos conllevan principalmente a la eliminación de partículas, materiales orgánicos, nutrientes coloidales y solubles [8], como principales aspectos de impureza en el agua.

Otros estudios realizados para el proceso de filtración muestran por ejemplo comparaciones detalladas entre la filtración de arena (SF) y la ultrafiltración (UF), con el fin de proporcionar soporte sistemático para tecnologías alternas en estos procesos de tratamiento. Conforme a esto, los resultados obtenidos demuestran que el proceso de (UF) exhibió un mayor rendimiento de eliminación para aspectos y materiales como el amoníaco, la turbidez y los microorganismos, mientras que el sistema (SF) fue ligeramente más eficiente para disminuir la absorción de rayos UV, sustancias

húmicas y proteínas similares [9], por lo que en conjunto estos procesos pueden también, obtener configuraciones ampliamente eficientes.

2.2 ESTADO DEL ARTE

En el proyecto, **Estudio de la eficiencia de lechos filtrantes para la potabilización de agua proveniente de la quebrada la despensa en el municipio Guaduas Cundinamarca vereda la Yerbabuena** [10] de las estudiantes de la universidad de la Salle, se puede evidenciar la eficiencia que tienen los lechos filtrantes propuestos.

- Lecho filtrante No 1

Tabla 2. Caracterización del filtro 1

Material	Grosor (cm)
Piedra media zonga	15
Piedra triturada	10
Grava	10
Arena Fina	20
Piedra de media zonga	5

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

- Lecho filtrante No 2

Tabla 3. Caracterización del filtro 2

Material	Grosor (cm)
Piedra media zonga	15
Grava	10
Piedra triturada	15
Trozos de pvc	12
Piedra de media zonga	5

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

- Lecho filtrante No 3

Tabla 4. Caracterización del filtro 3

Material	Grosor (cm)
Piedra media zonga	15
Piedra triturada	10
Grava	15
Carbón activado	8
Piedra de media zonga	5

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

- Lecho filtrante No 4

Tabla 5. Caracterización del filtro 4

Material	Grosor (cm)
Piedra media zonga	15
Piedra triturada	15
Grava	10
Trozos de pvc	12
Piedra de media zonga	5

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

A continuación, se muestran los resultados obtenidos luego de filtrar el agua cruda:

Tabla 6. Caracterización de turbidez antes y después de los 4 filtros

Turbidez (NTU)		
Filtro 1	Antes del filtro	Después del filtro
José - arena fina	3,3	0,37
Turbidez (NTU)		
Filtro 2	Antes del filtro	Después del filtro
Efrain – tubería pvc	3,4	0,11
Turbidez (NTU)		
Filtro 3	Antes del filtro	Después del filtro
Antonio – carbón activado	3,2	0,25
Turbidez (NTU)		
Filtro 4	Antes del filtro	Después del filtro
Replica - tubería pvc	2,9	0,12

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

Con los anteriores resultados y mediante la siguiente ecuación se puede obtener la eficiencia de los filtros así:

Tabla 7. Indicadores de eficiencia

NOMBRE	VARIABLES		UNIDAD	EXP	ECUACIÓN
IESFT	TANF	TAF	NTU	%	$\text{IESFT} = 1 - \left(\frac{\text{TAF}}{\text{TANF}} \right) * 100$ Max: 100% Min: 0%
Indicador de eficiencia del sistema de filtración para turbidez	Turbidez del agua no filtrada	Turbidez del agua filtrada			

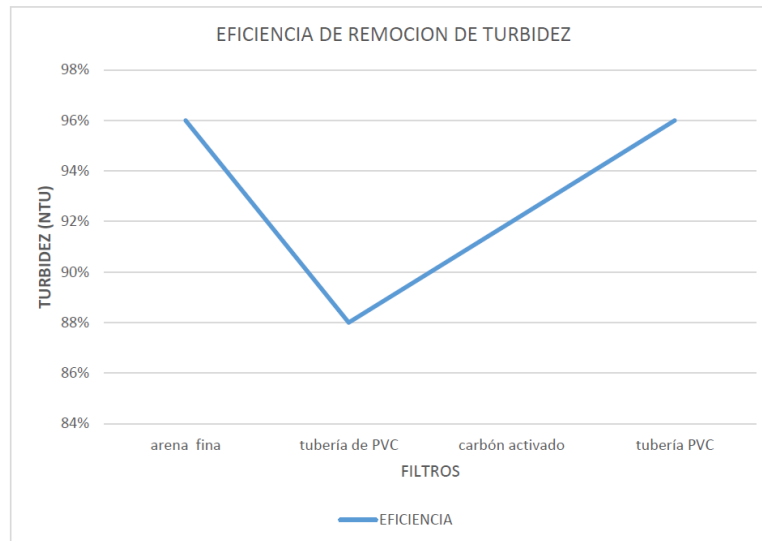
Fuente: Unipamplona, 2012

Tabla 8. Eficiencias de remoción de turbidez en los 4 filtros.

Eficiencia de remoción de Turbidez (NTU)	
Filtro 1 José - arena fina	IESFT
	$\text{IESFT} = 1 - \left(\frac{0,37}{3,3} \right) * 100 = 88\%$
Eficiencia de remoción de Turbidez (NTU)	
Filtro 1 Filtro 2 Efrain – tubería pvc José - arena fina	IESFT
	$\text{IESFT} = 1 - \left(\frac{0,11}{3,4} \right) * 100 = 96\%$
Eficiencia de remoción de Turbidez (NTU)	
Filtro 3 Antonio – carbón activado	Antes del filtro Después del filtro
	$\text{IESFT} = 1 - \left(\frac{0,25}{3,2} \right) * 100 = 92\%$
Eficiencia de remoción de Turbidez (NTU)	
Filtro 4 Replica - tubería pvc	Antes del filtro Después del filtro
	$\text{IESFT} = 1 - \left(\frac{0,12}{2,9} \right) * 100 = 96\%$

Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

Grafica 2. Eficiencia de remoción de Turbidez



Fuente: GUALTEROS DÍAZ, Leidy Johana - CHACÓN RODRÍGUEZ María Angelica

En esta grafica se puede evidenciar dos picos que representan las mayores eficiencias representados en los filtros de arena fina y de tubería de PVC; al igual que en la graficas anteriores el filtro de PVC y su réplica han tenido las mayores eficiencias de remoción, por lo cual se recomienda utilizar este filtro con más frecuencias que los otros 3. [10]

Este proyecto permitió conocer eficiencias en lechos filtrantes propuestos, cabe aclarar que estos lechos filtrantes los realizan para filtración lenta.

2.3. JUSTIFICACIÓN

Universalmente, el agua es uno de los recursos naturales extremadamente invaluable y vulnerables, por lo que existe una necesidad urgente de proteger y mejorar el agua especialmente para la salud de los seres humanos. Las fuentes de agua potable están bajo amenaza creciente de la contaminación, con repercusiones trascendentales en la salud sobre todo de los niños y el crecimiento socioeconómico de la comunidad. En los últimos años, la contaminación del agua ha resultado ser un problema grave en la mayoría de los países del mundo, especialmente en aquellos en vía de desarrollo, lo cual ocurre principalmente por la eliminación indiscriminada de efluentes no tratados como desechos químicos y agrícolas [11]. Debido a lo anterior, cada vez se hace más necesario buscar alternativas que contribuyan a la mejora continua y eficaz de la calidad del agua potable para la población, por lo que, mediante este proyecto se estudia la filtración y los coeficientes resultantes en cuanto su proceso de remoción de partículas y potabilización de agua.

Los avances realizados para la determinación y el análisis del proceso y técnica de la filtración, han sido objeto de estudio y resultado de esfuerzo de diferentes autores, quienes han posibilitado a través

de sus investigaciones, entender la manera de prever y diseñar la operación detallada de una unidad de filtración [1]. Específicamente, la influencia que tiene la turbiedad de las aguas, es considerado uno de los factores más importantes en el proceso de la filtración, ya que esta se puede relacionar directamente con el volumen de los sólidos presentes en el agua. Como el proceso normal que se lleva a cabo en las plantas potabilizadoras anterior al proceso de la filtración, existe la coagulación y la sedimentación, los cuales contribuyen a la purificación del agua siempre y cuando las condiciones de esta, así lo requieran. Por razón tal, este proyecto se basa en la caracterización de los filtros y el análisis de las turbiedades de entrada de las aguas a potabilizar en las plantas de tratamiento a nivel Cundinamarca.

Si bien, la necesidad de conocer y establecer de manera global un coeficiente de filtración que permita consolidar la mayor parte de las características fisicoquímicas y biológicas existentes en el proceso de la filtración, hacen que este proyecto sea parte de una fuente de investigación para el desarrollo de los filtros comúnmente utilizados y diseñados en el departamento de Cundinamarca, puesto que con ello, se pueden determinar las variables más relevantes para el funcionamiento de los filtros, tales como; el tiempo de operación para cierta cantidad de agua, la velocidad de remoción y en especial la variación de la concentración con respecto a la profundidad del lecho filtrante utilizado. Además de estas variables, se busca por medio de este estudio, determinar la eficiencia que tienen los lechos filtrantes comúnmente utilizados en las plantas potabilizadoras de Cundinamarca; Arena, antracita y la relación de estos dos lechos como un solo medio filtrante.

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

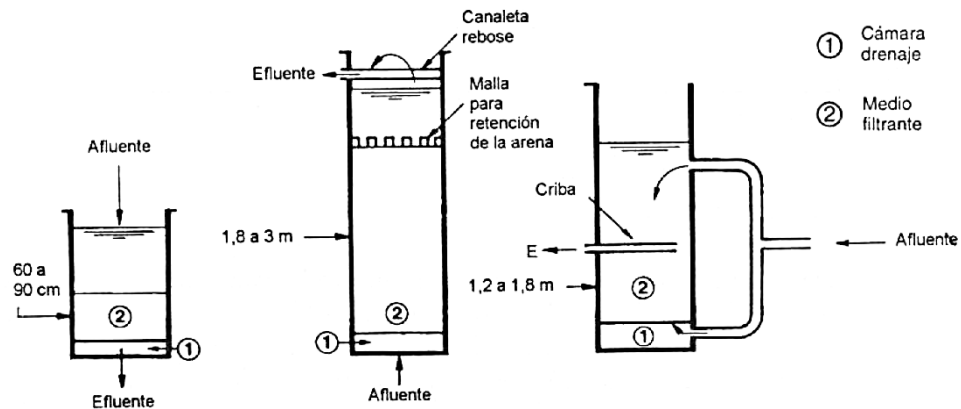
El coeficiente de filtración en plantas de tratamiento de agua potable, no es un parámetro fijo de diseño, ni relevante a la hora de determinar el periodo de mantenimiento del filtro, ya que comúnmente la tasa de filtración es medida mediante una carga superficial la cual relaciona el caudal y área del filtro, discriminando así, la eficiencia por lecho filtrante utilizado en el sistema. En tal sentido no se tiene en cuenta un coeficiente de filtración de partículas en función del material granular filtrante, ni en la eficiencia de adhesión de las partículas con el lecho; debido a esto, el periodo de limpieza del filtro puede aumentar o disminuir su tiempo y es aquí donde la investigación toma rumbo.

En la actualidad el proceso unitario de filtración se diseña con carga superficial, dirección del flujo, fuerza impulsora, método de control de tasa de filtración: [12]

- **Dirección del flujo**

De acuerdo con la dirección de flujo, los filtros pueden ser de flujo hacia abajo, hacia arriba, o de flujo dual como se esquematiza en la siguiente figura:

Figura 1. Tipos de filtro

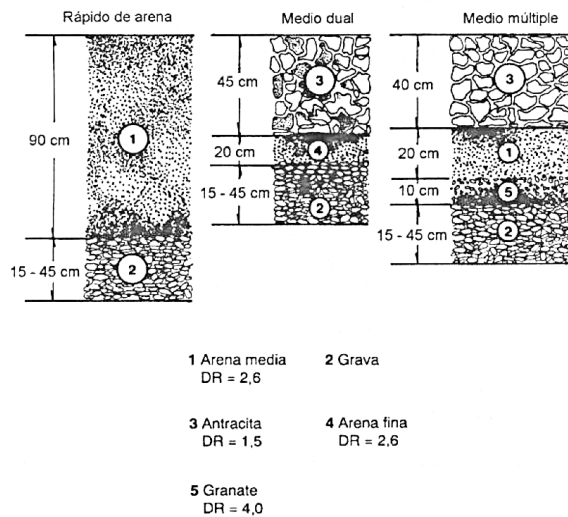


Fuente: ROMERO ROJAS Jairo Alberto - Potabilización del agua - 3a Edición

- **Tipo de lecho filtrante**

Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado: arena, antracita y granate o ilmenita. La figura 6.3 permite comparar los tres tipos de medios filtrantes comúnmente usados en tratamientos de aguas. [12]

Figura 2. Medios de filtración



Fuente: ROMERO ROJAS Jairo Alberto - Potabilización del agua - 3a Edición

- **Fuerza impulsora**

De acuerdo con la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante, El filtro por gravedad es el más usado en plantas de purificación de agua, El filtro a presión se ha utilizado principalmente en la filtración de aguas para piscinas y en pequeñas plantas donde su instalación es ventajosa. [12]

- **Tasa de filtración**

Los primeros filtros usados para tratamiento de agua fueron los lentos, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1 m, soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0.30 m. Estos filtros fueron luego reemplazados por los filtros rápidos, filtros de arena, generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores y, por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente con el uso de lechos filtrantes duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros rápidos convencionales. [12]

Tabla 9. Principales características de filtros

Característica	Filtros lentos de arena	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	2-5 (<12m/d)	120 m/d	180-480 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: Fino a grueso	Estratificado: Grueso a fino
Duración carrera	20-60 días	12-36 horas	12-36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0,6 m Final: 1,2 m	Inicial: 0,3 m Final: 2,4-3 m	Inicial: 0,3 m Final: 2,4-3 m
Agua de lavado	No usa	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0,6 - 1,0 m	0,60-0,75 m	Antracita: 0,4 - 0,6 m Arena; 0,15 - 0,3 m
Profundidad de grava	0,30 m	0,30 - 0,45 m	0,30-0,45 m
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada Falsos fondos	Tubería perforada Falsos fondos

Fuente: ROMERO ROJAS Jairo Alberto - Potabilización del agua - 3a Edición

- **Método de control**

La tasa de filtración puede expresarse así: [12]

$$\text{Tasa de filtración} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia del filtro}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Por otro lado se tiene en cuenta el tamaño del grano de los materiales filtrantes, distribución granulométrica del grano de los lechos, porosidades del filtro, profundidad o espesores de los lechos y calidad del agua, viendo lo anterior, el proceso de diseño de estas unidades de filtración deben

cumplir la resolución Colombiana 0330 de 2017, donde indica, “ teniendo en cuenta la turbiedad objetivo de salida, el dimensionamiento de las unidades deberá tener como referencia los criterios de la tabla 10 y la tabla 11” [13].

Tabla 10. Características de filtración convencional

Parámetro	Filtración lenta con lecho simple	Filtración rápida con lecho simple	Filtración rápida con lecho mixto
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	7-14	<120	180-350
Profundidad del medio (m)	0,8 - 1,0	0,6- 0,9	Antracita: 0,4-0,6 Arena: 0,15 - 0,30

Fuente: Tabla 10 - Características de filtración convencional - Ras 0330 de 2017

Tabla 11. Rangos de tasa de filtración lenta en múltiples etapas (FIME)

Parámetro	Filtración lenta con lecho simple	Filtración rápida con lecho simple	Filtración rápida con lecho mixto
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	7-14	48 - 72	7,2 - 14,4
Profundidad del medio (m)	0,8 - 1,0	0,6 - (0,2 cada capa)	0,4 - 0,9

Fuente: Tabla 11 - Rangos de tasa de filtración lenta en múltiples etapas (FIME) - Ras 0330 de 2017

Es así como conociendo la carga superficial se realiza la elección del tipo de lecho y su debida profundidad, pero no se tiene en cuenta la eficiencia de esos lechos, al analizar los lechos filtrantes en este proyecto, se podrán mejorar los diseños hidráulicos de filtrado en las plantas de tratamiento de la región de Cundinamarca, ya que, los cálculos estarán más cerca de la verdadera eficiencia del filtro.

Para lo anterior será necesario estudiar la eficiencia de los lechos según la remoción de partículas, es decir, utilizar el modelo matemático de IVES inicial que contiene datos de concentración de turbiedad de las aguas a tratar y la profundidad del filtro rápido (y el tiempo que tarda el sistema en

remover las partículas), de esta manera se podrá identificar el coeficiente (λ) global para distintas plantas de tratamiento de agua potable en el departamento de Cundinamarca.

Lo que busca el proyecto con el coeficiente de filtración (λ), es evidenciar la eficiencia de los lechos filtrantes ensayados, para que así este coeficiente sea una variable a considerar en el diseño del proceso de filtración de las PTAP

3.1. PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuál sería el coeficiente (λ) global en el proceso de filtración para la remoción de turbiedad, cuando se utilizan lechos granulares típicos de las plantas de tratamiento de agua potable en la región Cundinamarqués?

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. MARCO TEÓRICO.

Mecanismos responsables de la Filtración

Los mecanismos responsables en el proceso de la filtración dependen del agua que entra al filtro, ya que esta contiene generalmente una alta variedad de partículas en suspensión, las cuales se requieren sean removidas en mayor parte. El tamaño de los flóculos, pueden cambiar relativamente dependiendo de su tamaño, siendo los más grandes desde 1 mm de diámetro hasta incluso poder presentar coloides, bacterias y virus en los que su tamaño puede llegar a ser inferiores a 10^{-3} mm. El floc grande, cuyo volumen es mayor que el de los poros del medio granular, queda removido por simple cernido por medio de los intersticios del material del lecho; en cambio, el material finalmente dividido, en donde su orden de magnitud es varias veces menor que el de los poros, las bacterias son hasta 100 veces menores que ellos, lo cual genera, que a pesar de su diminuto tamaño, queden retenidos estos microorganismos debido a diferentes variedades de fenómenos que logran actuar y separar dentro del filtro según sea generalmente su tipo de suspensión y material del lecho [2].

Según el tamaño de los poros del material filtrante utilizado, las partículas de menor diámetro que los poros, entran al material granular atravesando toda la longitud de la capa del lecho, permitiendo así la ocurrencia de dos fenómenos: El transporte de las partículas dentro de los poros y la adherencia a los granos del medio.

Los mecanismos que pueden realizar el transporte son:

- Cernido
- Sedimentación
- Intercepción
- Difusión
- Impacto inercial

Los mecanismos que pueden realizar la adherencia son:

- Fuerzas de Van der Waals
- Fuerzas electroquímicas
- Puente químico

Factores que influyen en la filtración

- Tipo de medio filtrante: Generalmente para las plantas de tratamiento, el medio filtrante está constituido por materiales granulares de arena silícea, antracita, granate o tradicionalmente una combinación entre estos.

Se debe tener en cuenta que la eficiencia (λ) es inversamente proporcional al diámetro de las partículas, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\lambda \propto \frac{1}{d^n} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde (n) es un coeficiente con valores asignados de 3, 2.5, 2, 1.7, 1.67 y 1. [1]

- Velocidad de filtración: Es inversamente proporcional a la eficiencia y se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda \propto \frac{1}{v^n} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde (n) tiene valores asignados de 0.7 a 1. [1]

- Tipo de suspensión: Se le denomina suspensión al líquido a filtrar, el cual afecta de manera considerable el comportamiento de los filtros.

Características Físicas

Están dadas a partir del volumen, la densidad y el tamaño del floc, las cuales su vez están relacionadas con la rapidez y la pérdida de carga en el filtro especialmente.

Características Químicas

Estudiado generalmente para la interrelación entre el PH, la potencia zeta y la eficiencia del filtro.

- Influencia de la temperatura: Es de gran importancia ya que afecta todos los mecanismos físicos y químicos que intervienen en la filtración.
- Dureza del floc: El conjunto de los factores mencionados anteriormente intervienen en el proceso de filtración, lo que conlleva a la aparición del floc en el afluente.

Análisis granulométrico de materiales granulares

El material requerido para los filtros es seleccionado a partir del proceso de cernido por tamices, con base a la serie estándar americana:

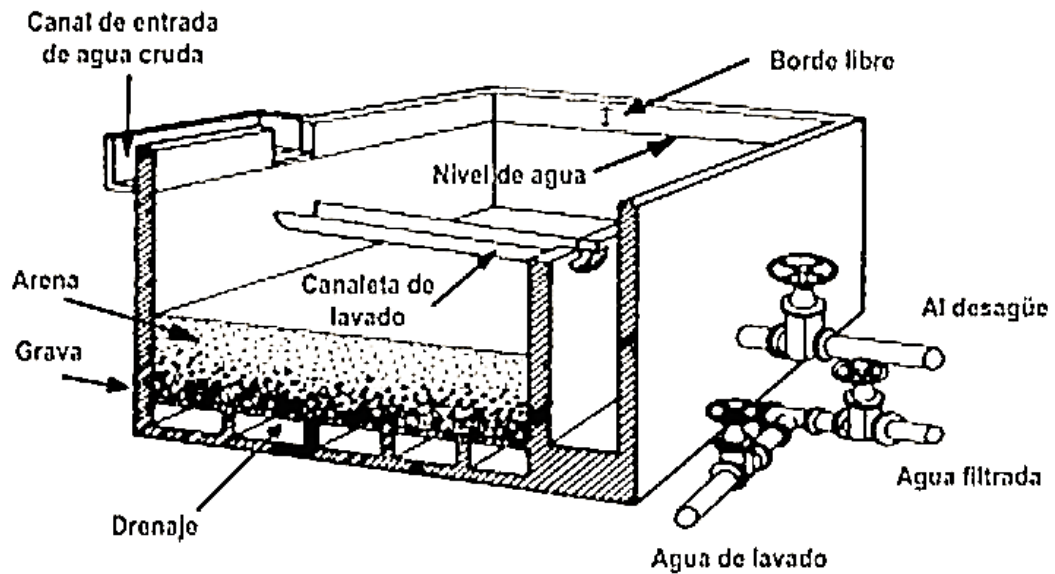
Tabla 12. Serie estándar americana

Serie americana de tamices (Estados Unidos)					
No. de serie	Tamaño de aberturas		No. de serie	Tamaño de aberturas	
	mm	pulg.		mm	pulg.
2 1/2	8.00	0.315	18	1.00	0.039
3	6.72	0.265	20	0.84	0.033
3 1/2	5.66	0.223	25	0.71	0.029
4	4.76	0.187	30	0.59	0.023
5	4.00	0.157	35	0.50	0.020
6	3.36	0.132	40	0.42	0.017
7	2.83	0.111	45	0.35	0.014
8	2.38	0.094	50	0.30	0.012
10	2.00	0.079	60	0.25	0.010
12	1.68	0.066	70	0.21	0.008
14	1.41	0.056	80	0.18	0.007
16	1.19	0.047	100	0.15	0.006

Fuente: Arboleda Valencia J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua

Filtros rápidos convencionales con lecho filtrante de un solo material:

Figura 3. Filtro rápido convencional



Fuente: Arboleda Valencia J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua

Tabla 13. Clasificación de filtros

Clasificación de filtros			
Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante usado	Según el sentido del flujo	Según la carga sobre el lecho
Rápidos 120 -360 m ³ /m ² /día	1. Arena (h = 60-75 cms)	Ascendentes	Por gravedad
	2. Antracita (h = 60-75 cms)	Descendentes	Por presión
	3. Mixtos: antracita (50-60 cms) y arena (15-20 cms)	-	-
	4. Mixtos: arena, antracita, granate.	Flujo mixto	-
Lentos 7-14 m ³ /m ² /día	Arena (h=60-100 cms)	Descendente Ascendente	Por gravedad

Fuente: Arboleda Valencia J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua

Los filtros convencionales más utilizados para la filtración rápida, trabajan por gravedad con flujo descendente a través de una sola capa de arena como lecho filtrante. El filtro rápido tiene, como lo indica su nombre una diferencia de rendimiento con el filtro lento o común: como término medio puede tratar por metro cuadrado maso menos 120 m^3 en las 24 horas, mientras que el filtro lento trabaja solo a razón de 2 a 3 m^3 al día. Adicionalmente tiene una diferencia específica de funcionamiento y es que necesita que el agua haya sufrido un tratamiento previo con un coagulante y un comienzo de sedimentación [14].

Es importante que se tengan en cuenta los siguientes aspectos:

- Rata de filtración o carga superficial: Hace parte de la proporcionalidad y variación en el tiempo. Se le atribuye a George Fuller, haber fijado en 1898, lo que hoy se conoce como rata normal de la filtración $2 \text{ gpm}/\text{p}^2$ [2].
- Perdida de carga: Básicamente la perdida de carga depende del tamaño y dureza del floc a remover. En otras palabras, la mayor o menor distribución de la perdida de carga en un lecho filtrante, está en función de la penetración del floc [2].
- Perdida de carga negativa: En cuanto menor sea la capa de agua que va sobre el lecho filtrante, se obtienen presiones negativas más fácilmente, por lo que habrá mayor probabilidad a que se presenten mayores obstrucciones por el aire.
- Profundidad de la capa de agua sobre el filtro: Para no generar pérdidas de carga negativas, generalmente se construyen filtros con capas de agua entre 1.4 m a 1.8 m.

Eficiencia de los filtros

La eficiencia de los filtros se puede determinar de diferentes maneras, sin embargo, esta investigación solo tratará la medición de la turbiedad del afluente, la cual es actualmente el método más común en la filtración.

Entendiendo que la turbiedad es la propiedad óptica que tiene una sustancia transparente líquida o sólida, de diseminar en todas direcciones la luz que pasa por ella, esta implica tener una interrelación en la luz incidente y la sustancia diseminante [2], pues estos efectos contribuyen a que la caracterización del agua una vez sea filtrada, permita conocer en qué medida o proporción fueron removidas las partículas y/o microorganismos presentes inicialmente en el agua.

4.2. MARCO CONCEPTUAL.

Potabilización del agua: Sistema donde se le realiza un tratamiento al agua cruda captada de un afluente hídrico para convertirla en agua potable, es decir en agua apta para el consumo humano.

Afluente hídrico: El afluente hídrico hace referencia a un cuerpo de agua ya sea superficial (rio, lago, laguna, mares u océanos) o subterráneo (acuíferos).

Tratamiento de agua: Suma de procesos fisicoquímicos que se le realizan al agua cruda, con el fin de potabilizar el recurso.

Procesos fisicoquímicos: Los procesos químicos son aquellos donde el agua cruda necesita de componentes químicos para desarrollar su debida función, por ejemplo, en el proceso de coagulación que es uno de los primeros procesos dependiendo de la turbiedad y color del agua, se adiciona generalmente sulfato de aluminio, aluminio de sodio, cloruro de aluminio, sulfato férrico entre otros al agua cruda generando unión de microorganismos con el fin de crear partículas más grandes y sea más fácil su eliminación. Por otro lado, los procesos físicos aprovechan la aceleración de la gravedad como herramienta en su función, por ejemplo, luego de haberse generado las partículas de mayor tamaño gracias a la coagulación, estas partículas aumentan su peso y de esta manera se vendrán al fondo de los tanques de floculación o sedimentación con mayor facilidad.

Agua cruda: El agua cruda es aquella que no ha recibido ningún tratamiento y es captada en su medio natural.

Agua potable: Agua cruda que paso por un tratamiento fisicoquímico y puede ser consumida ya que es apta debido a cumplimientos sanitarios, no presenta riesgo a la humanidad.

Captación: La captación es el proceso mediante el cual el agua cruda es atraída por un sistema y llevada a la planta de tratamiento de agua potable.

Consumo: Cantidad de agua que requiere un habitante de una comunidad para suplir su necesidad básica.

Filtración: Proceso en plantas de tratamiento de agua potable, donde se retienen las partículas suspendidas u organismos que no se retuvieron en procesos directamente anteriores (sedimentación, floculación y coagulación) [15], generalmente se utilizan medios porosos o también conocidos con el nombre de lechos filtrantes como arenas, gravas, antracitas y en dadas ocasiones carbón activado; de este modo la filtración es el proceso donde se elimina la turbiedad restante del agua antes de entrar al proceso de coloración y tanque de almacenamiento.

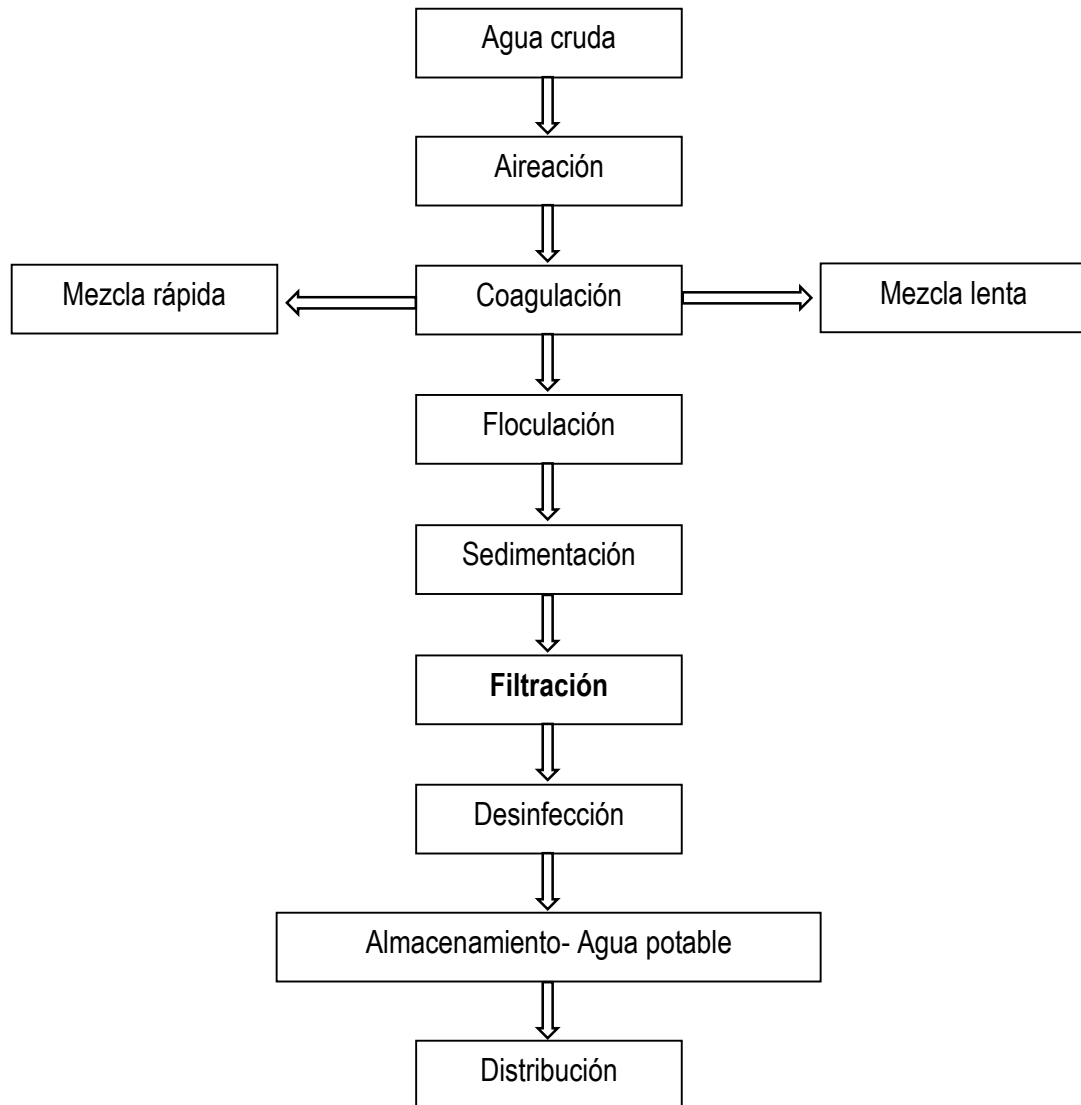
La filtración puede efectuarse en muchas formas distintas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos o en medios granulares, con flujo ascendente de abajo hacia arriba o descendente de arriba hacia abajo o también mixto. Por último, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad. [2]

Lechos filtrantes o medios porosos: Los lechos filtrantes son conformados por materiales generalmente dispuestos por granos, que serán tamizados con el fin de obtener el tamaño de grano

adecuado para la retención de sólidos. “Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado: arena, antracita. [12]

Planta de tratamiento de agua potable (PTAP): Una PTAP es el sistema donde se unen estructuras comúnmente en concreto, destinadas para la potabilización del agua de consumo humano, generalmente se ven los siguientes procesos:

Ilustración 1. Procesos de plantas de tratamiento de agua potable



Fuente: Autores

Grava y arena de río lavada: Durante el proceso de erosión y meteorización natural de las rocas o también por procesos industriales (triturado de rocas), se generan partículas de menor tamaño.

La arena es el medio filtrante más usado, posiblemente por ser el más económico. En filtros rápidos de arena la profundidad del lecho es de 60-70 cm, el **TE** (Tamaño efectivo) de 0,45-0,55 mm y el **CU** (Coeficiente de uniformidad) de 1,2-1,7. El manual de diseño de plantas de tratamiento de la **AWWA** señala: la mayoría de los filtros rápidos de arena usan arena con **TE** de 0,35-0,50 mm, aunque algunos tienen arena con **TE** de 0,7 mm. El **CU** es generalmente 1,3-1,7 y la profundidad de 60-75 cm. [12]

Tabla 14. Arena en filtros rápidos.

Arena típica para filtros rápidos			
N° Tamiz	Abertura mm	% Retenido sobre el tamiz	
		Mínimo	Máximo
70	0,208	0	1
50	0,295	0	9
40	0,417	40	60
30	0,589	40	60
20	0,833	0	9
16	1,168	0	1

Fuente: Romero Rojas. J.A. Libro potabilización del agua

La arena de filtros debe tener una solubilidad en ácido clorhídrico al 40%, en 24 horas, menor al 5%; una densidad relativa mayor de 2,5 y debe ser limpia y bien gradada, según la norma AWWA B100-53. [12],

Para el lecho de grava el ingeniero (Rojas, 1999) indica:

El tamaño y la profundidad de la capa inferior de grava depende del sistema de drenaje usado; asimismo; el tamaño y la profundidad de la capa superior de grava depende del tamaño de la capa inferior de medio fino (arena o antracita) que lo soporte. [12]

El lecho de grava ideal es uno en el cual esta es casi esférica en forma y existe un incremento uniforme en tamaño desde el techo hasta el fondo. La profundidad del lecho de grava puede variar entre 15 y 60 cm; es usual una profundidad de 45 cm en filtros rápidos. La grava debe ser dura, redondeada, con una densidad relativa promedio no menor de 2,5. [12]

Antracita: La antracita es el carbón mineral de más alto rango con concentraciones de carbón más grandes por unidad de volumen. Tiene su origen en el proceso denominado carbonificación que es la transformación de los materiales orgánicos por migración paulatina a temperaturas moderadas y alta presión en turbas y carbones, gracias a la deshidrogenación incompleta, es un material de dureza alta, presenta un brillo casi metálico. [16]

Este material se comporta óptimamente en el proceso de filtración de distintas plantas de tratamiento según las estadísticas, ya sea de manera individual o en conjunto con otro material filtrante como la arena, según el ingeniero

En ocasiones se usa el carbón de antracita triturado en vez de arena como medio granular filtrante. Según AWWA, estándar b100-72, la antracita para filtros debe ser limpia, dura, con dureza mayor a 2,7 en la escala de MOHS, de densidad relativa mayor de 1,4, solubilidad en ácido menor del 1% y coeficiente de uniformidad (**CE**) menor de 1,7. En filtros de antracita se puede usar un lecho de 60-70 cm con tamaño efectivo (**TE**) de 0,70 mm o mayor, según el estándar D388-84 de la ASTM, se clasifica un carbón como antracita cuando tiene carácter no aglomerante y cumple las siguientes especificaciones: [12]

Tabla 15. Carbón de tipo antracita

Carbones de clase antracita	
Grupo	% Material volátil
1. Metaantracita	≤ 2
2. Antracita	> 2 y ≥ 8
3. Semiantracita	> 8 y ≥ 14

Fuente: Romero Rojas. J.A. Libro potabilización del agua

CU Y TE: Para el ingeniero Jairo Romero y según teoría de Allen Hazen, **Allen Hazen (1892) definió el tamaño efectivo, TE**, como el tamaño de partículas o del grano, en mm, tal que un 10% del material en peso es más pequeño que dicho tamaño. En otras palabras, él TE es el tamaño del tamiz, en mm, que permite el paso del 10% del medio filtrante. El TE corresponde, aproximadamente, al tamaño promedio por conteo y es un parámetro usado para caracterizar medios filtrantes. De la misma manera, Hazen definió el coeficiente de uniformidad, CU, como la relación del tamaño de granos que tiene un 60% más fino que el mismo, al tamaño que tiene un 10% más fino que el mismo: [12],

$$TE = d$$

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{\text{Tamaño partícula del 60\% que pasa}}{\text{Tamaño partícula del 10\% que pasad10}} = \frac{d_{60}}{TE} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Retención de partículas: La retención de partículas de agua cruda en el proceso de filtración, hace referencia a la acción que realizan los lechos filtrantes de impedir el paso de sólidos que no son sedimentables, es decir sólidos suspendidos, estos quedan atrapados físicamente en los poros de los lechos filtrantes o también pueden ser atraídos químicamente.

Sólidos suspendidos: Son aquellos sólidos que no superan el peso para ser removidos por medio de sedimentación, es decir su densidad es muy baja y no podrán ir al fondo de los tanques de sedimentación o floculación. Estos sólidos son los causales de generar colores y olores no deseados.

Velocidad de retención: La velocidad se obtiene al medir el tiempo que tarda una gota de agua cruda en atravesar la capa de lecho filtrante, pero se debe tener en cuenta que esta velocidad es diversa, es decir, si se disponen los materiales de los lechos filtrantes limpios, se obtiene una velocidad mayor, pero esta velocidad reduce cuando el filtro debido a su uso de colmata de partículas y la gota tardara

más tiempo en pasar. Por otro lado, si se colmatan los lechos filtrantes se disminuye la efectividad de reducción de turbiedad del agua, dicho de otro modo, cuando ingresa el agua cruda al filtro se conoce su turbiedad y cuando sale del filtro se toman lecturas de turbiedad nuevamente para consignar si el filtro hizo su trabajo y disminuyo los números de turbiedad, si no se disminuye los indicadores de turbiedad quiere decir que el filtro no está siendo efectivo, y así, se podrá conocer el periodo de mantenimiento de los lechos filtrantes según el agua cruda evaluada en las plantas de tratamiento.

Colmatación: El espacio que existe entre un grano y otro de los materiales de los lechos filtrantes, es ocupado por solidos retenidos, disminuyendo la capacidad de retención.

Turbiedad: La turbidez disminuye transparencia en el agua cruda debido a la cantidad de solidos suspendidos, es medida por sus unidades de NTU (Unidades nefelométricas de turbiedad), a mayor cantidad de sólidos, mayor turbiedad, la presencia de turbiedad puede generar contaminación por bacterias

Aguas discretas: Las aguas discretas son aquellas las cuales no reciben ningún tipo de trato químico para aumentar su peso y tamaño

5. OBJETIVOS

5.1. GENERAL

Determinar el coeficiente de filtración global (λ), para la remoción de turbiedad en tres lechos filtrantes, aplicando las propiedades fisicoquímicas del agua al inicio de las plantas de potabilización a nivel Cundinamarca.

5.2. ESPECÍFICOS

- Realizar el ajuste granulométrico de los materiales a utilizar como lechos filtrantes, para dar cumplimiento a parámetros de tamaño efectivo (TE) y coeficiente de uniformidad (CU)
- Preparar las muestras de agua problema según el análisis estadístico de los registros de turbiedad de la base datos (SUI), conforme a las plantas de tratamiento de agua potable a nivel del departamento de Cundinamarca.
- Analizar los cambios de velocidad y eficiencia de remoción de turbiedad en los lechos filtrantes típicamente utilizados en las plantas de tratamiento de agua del departamento de Cundinamarca.
- Generar los coeficientes de remoción de cada uno de los lechos filtrantes utilizados en este estudio.

6. ALCANCES Y LIMITACIONES

6.1. ALCANCE

Se determinará un coeficiente de filtración para tres lechos filtrantes dispuestos de la siguiente manera: el primero será compuesto de solo arena, el segundo compuesto de solo antracita y el tercero compuesto de la una unión entre los lechos de arena y antracita. Lo anterior, con el fin de estudiar la eficiencia individual para los distintos valores de concentración de turbiedad de las aguas crudas a la entrada de las PTAP de Cundinamarca.

Para tener en cuenta, se estudiarán los lechos filtrantes en la peor condición de trabajo, dicho de otro modo, el agua cruda ingresara a los lechos filtrantes directamente sin eliminación de partículas en procesos de floculación y sedimentación. Esto permitirá conocer el periodo máximo de mantenimiento del filtro en la peor condición, facilitará la elección de material filtrante a utilizar en reformas de filtros o nuevos proyectos y así mismo, servirá de guía para cálculos de diseño de PTAP en etapas de prefactibilidad.

6.2. LIMITACIÓN

Este coeficiente no servirá como dato guía para plantas de otros departamentos, ya que, solo se estudian aguas crudas tratadas en plantas de tratamiento del municipio de Cundinamarca, de igual modo, este coeficiente está previsto como una variable de un modelo matemático que permite identificar un valor probable para la remoción de partículas, por lo que, para ser utilizado en diseños definitivos de procesos de filtración de las PTAP se deben tener en cuenta valores típicos adicionales en cuanto al compartimiento de los filtros respecto a su profundidad y tipo de lecho.

La contingencia generada a nivel mundial, debido al virus COVID-19, no afectara la fase No 1 del proyecto de investigación, ya que, estos datos se pueden obtener por solicitud virtual al SUI o en su defecto a cada municipio, así mismo la solicitud de uso de las instalaciones del laboratorio de la universidad se podrá realizar por vía telefónica o correo electrónico. Sin embargo, a partir del 22 de junio del 2020 las fechas programadas podrán tener un retraso si el aislamiento persiste, ya que el proyecto necesariamente requiere del uso del laboratorio y el aislamiento preventivo no permitirá que las universidades realicen actividades presenciales.

Debido a que es incierto el tiempo de emergencia sanitaria, se estará en continua comunicación con el departamento de laboratorios de ingeniería civil de la universidad, para programación de las prácticas requeridas según cronograma de actividades. Sin embargo, en dado caso de no poder lograr hacer uso del laboratorio, se tiene pensado mitigar esta eventualidad de la siguiente manera:

- Solicitud virtual de turbiedad del agua cruda de diferentes PTAP del departamento de Cundinamarca.
- Generación de un tipo de estructura casera, que pueda cumplir con los requerimientos físicos de los filtros que se encuentran en el laboratorio de la universidad.

- Adquisición de los materiales granulares a empresas certificadas ya sea por compra presencial o domicilio. De igual manera los ensayos requeridos se solicitarán a una compañía especializada que certifique la granulometría exigida.
- Solicitud de alquiler de un laboratorio privado, por medio del cual puedan realizarse ensayos de turbiedad, posterior al proceso de filtración.

Si bien, se entiende que se puede generar un posible hecho de retraso debido a la restricción de ingreso a las instalaciones de la universidad, en este proyecto se tiene contemplado ejecutar las actividades descritas anteriormente en los tiempos programados conforme al desarrollo de esta investigación, no obstante, si se debe repetir algún procedimiento la idea es que este no altere ni afecte de manera directa el cronograma general.

7. METODOLOGÍA

Para que la idea de este proyecto sea lógica y pueda ser desarrollada como trabajo de grado, se realiza la investigación apropiada como anteriormente se ha ilustrado en el marco teórico y marco conceptual, de igual manera, la formulación del problema surge al conocer los métodos comúnmente utilizados en la elección de los lechos filtrantes para las PTAP, es acá cuando la idea del proyecto toma lógica, ya que, por medio de este proyecto se busca aportar un factor que generalice las propiedades de los lechos en los procesos de diseños hidráulicos y diseños de lavado de las unidades de filtrado de las PTAP de la región de Cundinamarca, es decir, que se podrá conocer con mayor argumentación la elección del tipo de lecho y estructura del filtro con base a la efectividad de remoción de partículas de los materiales evaluados.

Para tal fin, se ha organizado esta metodología por medio de diferentes fases, cada fase posee una serie de actividades y estas actividades a su vez están descritas de manera específica, ya que, el fin es obtener una mejor interpretación y organización de los resultados conforme al desarrollo de este proyecto.

Fase No 1

Esta fase determinara los datos de turbiedad a ensayar, serán datos de valor máximo, mínimo y moda, las plantas de la región de Cundinamarca podrán elegir el tipo de lecho filtrante según el nivel de turbiedad del agua tratada.

Tabla 16. Fase 1 – Fase de recolección y elección de datos de turbiedad a ensayar

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
<p align="center">Recolección y elección de datos de turbiedad a ensayar</p>	<p align="center">Solicitud de permiso y/o alquiler de laboratorio de Plantas</p>	<p>Se solicitará a la universidad el permiso de ingreso o se realizará alquiler de laboratorio externo, para hacer uso de las instalaciones y equipos de plantas de tratamiento de agua. De tal manera se busca agendar los diferentes procesos que se requieren en el desarrollo del proyecto.</p>
	<p align="center">Búsqueda en base de datos (SUI) - Turbiedad de aguas</p>	<p>Crear usuario o búsqueda de usuario para el ingreso a la plataforma. En caso dado realizar solicitud a los diferentes municipios.</p>
		<p>Solicitud de datos de turbiedad de aguas crudas, captadas para potabilización.</p>
		<p>Descargar datos de turbiedad.</p>
	<p align="center">Unificación de datos a ensayar</p>	<p>Debido a que el departamento de Cundinamarca, abarca alrededor de 116 municipios, la idea es tomar una muestra de estos para generalizar los valores típicos del departamento.</p>
	<p align="center">Análisis estadístico de datos</p>	<p>Mediante el diagrama de caja y bigotes seleccionar los datos de máximo, medio y mínimo valor de turbiedad</p>

Fuente: Autores

Fase No 2

En esta fase se ajustarán los equipos del laboratorio a utilizar y se prepararán los materiales requeridos conforme a la normatividad exigida.

Tabla 17-. Fase 2 - Fase de ajuste de equipos y preparación de materiales

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Ajuste de equipos y preparación de materiales	Ajuste granulométrico de materiales	Se caracterizarán por granulometría cada uno de los materiales requeridos para los lechos del filtro.
		Realizar cálculo de d10 y d60.
		Cálculo de TE y Cu con el fin de dar cumplimiento normativo.
	Ajuste o creación prototipo de filtro	Revisar condiciones de filtro existentes en laboratorio. En caso de ser requerido construir nuevos filtros que sirvan como apoyo del proyecto a realizar.
	Ajuste de funcionamiento a sistema de filtración	Revisar que funcione perfectamente los filtros, drenaje y conducción de agua filtrada.
Disposición de materiales granulares en batería de filtros	Disposición de materiales granulares tamizados por capas, cumpliendo espesores y especificaciones de filtros rápidos de flujo descendente.	

Fuente: Autores

Fase No 3

En esta fase se preparan las muestras de agua problema, es decir que se buscaran los niveles de turbiedad adquiridos en el análisis estadístico realizado, conforme a los cuales se harán los controles y ensayos pertinentes.

Tabla 18. Fase 3 - Fase de preparación de aguas problema

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Preparación de aguas problema	Preparación de aguas problema	Determinados los datos de turbiedad a ensayar, mediante un análisis práctico - experimental se prepara el agua problema mediante una muestra de agua cruda a la cual se le adicionara agua de grifo en caso de querer disminuir su concentración, o por el contrario se le agregara arcilla en caso de querer aumentarla, ya que la idea es lograr obtener la concentración de turbiedad solicitada por el análisis estadístico, simulando poseer el agua captada de los afluentes que alimentan las plantas del departamento de Cundinamarca.

Fuente: Autores

Fase No 4

En esta fase, las aguas problema serán filtradas mediante los lechos construidos, respectivamente se tomarán los principales datos de entrada, que conllevarán finalmente a determinar la eficiencia de los filtros respecto al lecho utilizado.

Tabla 19. Fase 4 - Fase de filtración de aguas problema

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Filtración de aguas problema	Filtración de aguas problema	Luego de obtener el agua preparada, se dispondrá para el debido paso por los lechos filtrantes propuestos.
	Registro y toma de datos laboratorio	Registro de concentración y profundidad de lechos filtrantes
	Lecturas de turbiedad (Postfiltración)	Ensayos en turbidímetro para conocer la concentración posterior al proceso de filtración.
	Análisis de tiempos de filtración	Análisis de tiempos y eficiencia de lechos filtrantes.

Fuente: Autores

Fase No 5

Luego de dar cumplimiento a la Ras 0330 de 2017 en parámetros de turbiedad en los ensayos realizados, se realizará el cálculo del coeficiente de filtración de cada lecho.

Tabla 20. Fase 5 - Fase de cálculo de coeficientes de filtración

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Cálculo de coeficientes de filtración	Desarrollo modelo matemático referente	Los datos de concentración iniciales y finales y las profundidades de lechos se ingresarán al modelo matemático de IVES, [3] para realizar los debidos cálculos.
	Obtención de coeficiente (λ) conforme a resultados de laboratorio.	Luego de realizar los debidos cálculos, se obtendrá el coeficiente para cada lecho filtrante.
	Elaboración análisis de resultados	Analizar coeficientes de filtración obtenidos, aquí se evaluarán las eficiencias y los periodos de mantenimiento de los lechos filtrantes.

Fuente: Autores

Fase No 6

En esta fase se consolidará el trabajo final del proyecto de investigación, teniendo en cuenta las observaciones dadas por el director del proyecto y acatando cada recomendación para el buen desarrollo del proyecto, se describirán las correspondientes conclusiones de la investigación y se hará la entrega final a la universidad con el fin de ser calificada y posteriormente sustentada.

Tabla 21. Fase 6 - Fase de consolidación del trabajo y conclusiones de la investigación

FASE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Consolidación del trabajo y conclusiones de la investigación	Conclusión del documento de proyecto de investigación	Redacción de procedimiento, desarrollo, análisis de resultados y conclusiones de la investigación.
	Revisión del proyecto final por parte del docente asesor	Se dará conocimiento del adelanto del documento para el debido control técnico y profesional al director de proyecto de grado.
	Corrección de observaciones	Se harán las correcciones pertinentes de observaciones dadas por el director de proyecto de grado.
	Entrega final de proyecto de investigación	Luego del visto bueno del director se realizará la entrega formal a la Universidad, para su debido estudio.

Fuente: Autores

8. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO

Para el desarrollo del proyecto de investigación se requiere utilizar:

- Bateria de filtros de laboratorio
- Balanza de precisión
- Equipos de laboratorio
- Turbidímetro
- Espectrofotómetro
- Tamizadora
- Grupo de tamices

9. PRESUPUESTO DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS

Tabla 22. Presupuesto del proyecto

PRESUPUESTO GLOBAL DEL PROYECTO		
DETALLE	INGRESOS	EGRESOS
Ingresos		
Auxilio o patrocinio para la elaboración del trabajo.		
Recurso propio (s)	\$1'300.000	
Egresos		
Recurso Humano – Honorarios y servicios personales-Asesorías		\$200.000
Compra de elementos de laboratorio		\$125.000
Compra de materiales		\$134.000
Alquiler de laboratorio		\$150.000
Ensayos externos		\$213.000
Gastos en papelería, impresiones y servicios		150000
Transporte (Desplazamiento a laboratorio)		250000
Totales	1'300.000	1'222.000

Fuente: Autores

10. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN

Con el fin de dar a conocer el proyecto, se realizará la publicación de un artículo académico que estará a disposición de entidades educativas y empresariales, además de esto se realizaran ponencias para la universidad católica de Colombia y de tener posibilidad e interés, se cuenta con la disposición de realizarlas en otras entidades educativas.

11. DESARROLLO DE ANÁLISIS METODOLÓGICO

11.1. FASE 1. Recolección y elección de datos de turbiedad a ensayar

Debido a la emergencia sanitaria presentada durante el desarrollo de esta investigación, no fue posible realizar los ensayos de laboratorio en las instalaciones de la universidad. No obstante, tal y como se tenía evaluado, se optó por realizar el desarrollo de este proyecto mediante procesos elaborados en casa y posteriormente ensayos realizados en laboratorios externos.

Mediante la plataforma del Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios (SUI), se consultaron los reportes técnico operativos de acueducto más recientes, en cuanto a la calidad del agua cruda de los afluentes del departamento de Cundinamarca. Del mismo modo, se solicitaron estos mismos reportes a algunos municipios del departamento, para lo cual se obtuvo de la siguiente muestra:

Tabla 23. Turbiedades de agua cruda en las ptap de los municipios de Cundinamarca

TURBIEDADES DE AGUA CRUDA EN LA PTAP DE LOS MUNICIPIOS DE CUNDINAMARCA		
No	MUNICIPIO	TURBIEDAD (NTU)
1	Villapinzón	1,16
2	Supatá	1,15
3	Villeta	8,91
4	Gachalá	1,36
5	La Calera	10
6	Chaguaní	141
7	Chipaque	7,6
8	Ubaque	2,25
9	San Cayetano	7,99
10	Yacopí	2
11	Cogua	11,51
12	Cota	108
13	Nemocón	11,51
14	Tabio	25
15	Tenjo	7,6
16	Tocancipá	43,6
17	Zipaquirá	29,59
18	Facatativá	4,23

Continuación, Tabla 23. Turbiedades de agua cruda en las ptap de los municipios de Cundinamarca:

19	Madrid	35
20	Mosquera	1,39
21	Cabrera	4,27
22	Ubaté	134,8
23	Sasaima	1,73
24	Tibacuy	25
25	Anapoima	13,6
26	Silvania	69,3

Fuente: Autores

11.1.1. Análisis estadístico Diagrama de caja y bigotes

Mediante el diagrama de caja y bigotes, se realiza una representación estadística y visual, mediante la cual se describen características importantes en relación al comportamiento de los datos. Para la realización de este análisis se busca representar tres cuartiles, adicional a los valores mínimo y máximo de los datos, mediante un rectángulo o “caja” horizontal y verticalmente alineada.

En primer lugar, se tiene en cuenta que el parámetro a evaluar, corresponde a los índices de turbiedad del agua de los municipios incluidos en la muestra anteriormente mencionada, estos valores se ordenan de menor a mayor y a partir de ello se calculan los cuartiles, los cuales se representan de la siguiente manera:

- **Cuartil 1 Q_1**
El primer cuartil, corresponde al valor mayor que el 25% de la distribución.
- **Cuartil 2 Q_2**
El segundo cuartil, corresponde al valor de la mediana de la distribución, este es el valor de la variable que ocupa el lugar central en un conjunto de datos ordenados.
- **Cuartil 3 Q_3**
El tercer cuartil, corresponde al valor que sobrepasa al 75% de la distribución.

En este orden, los valores obtenidos con respecto a la variación de turbiedad de los diferentes municipios, son:

Tabla 24. Análisis estadístico de NTU para determinación de aguas problema

DESCRIPCIÓN	VALORES OBTENIDOS (NTU)
MINIMO	1,15
CUARTIL Q1	2,19
CUARTIL Q2-MEDIANA	9,46
CUARTIL Q3	30,94
MAXIMO	141,00

Fuente: Autores

Ahora bien, para la representación gráfica del análisis de los datos se debe tener en cuenta:

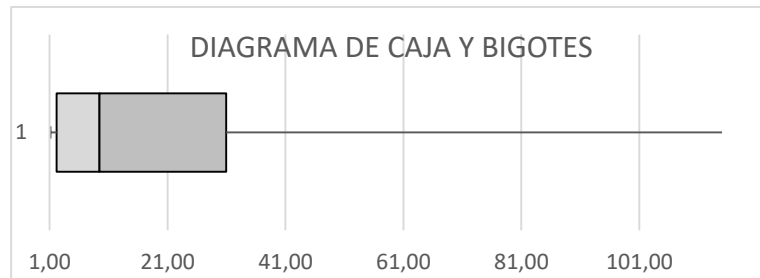
- El valor del extremo izquierdo correspondiente al bigote inicial o inferior, pertenece al valor mínimo de la distribución.
- El valor con el que inicia la caja, corresponde al valor obtenido en el cuartil primero.
- El valor que divide la caja y a su vez la distribución corresponde al valor de la mediana o también llamado cuartil segundo.
- El valor con el que finaliza y se cierra la caja, corresponde al cuartil tercero.
- El valor del extremo derecho correspondiente al bigote final, pertenece al valor máximo de la distribución.

Tabla 25. Valores de representación gráfica – diagrama de caja y bigotes

DESCRIPCIÓN	VALORES OBTENIDOS (NTU)	REPRESENTACIÓN
CAJA 1 ESCONDIDA	2,19	Q1
CAJA 2 INFERIOR	7,27	Q2-Q1
CAJA 3 SUPERIOR	21,49	Q3-Q2
BIGOTE SUPERIOR	110,06	MAX-Q3
BIGOTE INFERIOR	1,04	Q1-MIN

Fuente: Autores

Grafica 3. Diagrama de caja y bigotes



Fuente: Autores

Información del diagrama

- La parte izquierda de la caja es menor que la parte derecha de la misma, quiere decir que los valores de turbiedad comprendidos entre el 50% y el 75% está más dispersa, que entre el 25% y 50%.
- El bigote izquierdo o inferior, es notablemente más corto que el de la derecha, quiere decir que los valores mínimos se encuentran más cercanos al primer 25% de las turbiedades del departamento. A diferencia contraria, en el bigote derecho o superior se evidencia una holgura que corresponde al alto rango de diferencia entre los valores del 75% de turbiedad con respecto al máximo valor de la muestra.
- El rango intercuartílico o la diferencia entre el cuartil tercero y el cuartil primero = 28.75 NTU, quiere decir que el 50% de la muestra está comprendida alrededor de los 28.75 NTU.

11.2. FASE 2 - Ajuste de equipos y preparación de materiales

11.2.1. Ajuste granulométrico de materiales

11.2.1.1. Caracterización granulométrica

Para llevar a cabo este análisis, se contrató un laboratorio externo, los resultados de esta caracterización se puede ver en los anexos.

11.2.1.2. Calculo D60 y D10

Para poder obtener estos cálculos de debe realizar la curva granulométrica, con el fin de identificar estos dos valores con mayor facilidad, la curva se encuentra en los anexos, los datos obtenidos del laboratorio son los siguientes:

Tabla 26. D60 - D10, Arena sílice

ARENA SILICE	
ITEM	Resultado
D60	0,67
D10	0,43

Fuente: Autores

Tabla 27. D60 - D10, Antracita

ANTRACITA	
ITEM	Resultado
D60	1,56
D10	0,92

Fuente: Autores

11.2.1.3. Cálculo de TE y Cu con el fin de dar cumplimiento normativo.

Luego de verificar la curva granulométrica obtenida de la caracterización, se verifica el cumplimiento y cálculo de TE y CU, en los anexos se podrán notar con más detalle.

Para el cálculo de CU de la arena sílice se tiene:

$$CU = \frac{0.67}{0.43} = 1.56 \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$TE = D10 = 0.43 \text{ mm}$$

Para el cálculo de CU de la antracita se tiene:

$$CU = \frac{1.56}{0.92} = 1.69 \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$TE = D10 = 0.92 \text{ mm}$$

En la siguiente tabla se podrá evidenciar los resultados obtenidos y estos a su vez se comparan con requisitos de las normas anteriormente mencionadas:

Tabla 28. Parámetros de cumplimiento de Arena sílice

ARENA SILICE			
ITEM	Resultado	Un/Medida	Parámetro de control según normas
D60	0,67	mm	
D10	0,43	mm	0,45 - 0,55
CU	1,56		1,2 - 1,7
Dureza	7	Escala de MOHS	>2,7
Densidad Relativa	2,8	kg/m ³	>2,5
Solubilidad en acido	0,32	%	<5%

Fuente: Autores

Por otro lado, se verifica el cumplimiento de variables como densidad relativa, solubilidad en ácido clorhídrico y dureza medida en la escala de MOH, se hace referencia que el cumplimiento se hace con base a la norma AWWA B 100-01 Y NTC 2572

Como se pudo observar, los materiales cumplen requerimientos de norma y podrán ser utilizados como materiales filtrantes.

11.2.3. Ajuste o creación prototipo de filtro

11.2.3.1. Construcción de nuevos filtros que sirvan como apoyo del proyecto a realizar.

Debido a que no se pudo usar el laboratorio de la universidad, se vio la necesidad de construir en casa los filtros, para llevar a cabo tal fin se utilizaron 3 tubos de pvc sanitarios de 6" de diámetro y longitud de 1 metro, soporte soldado en hierro, malla de retención y material filtrante.

Imagen 1. Estructura para filtros



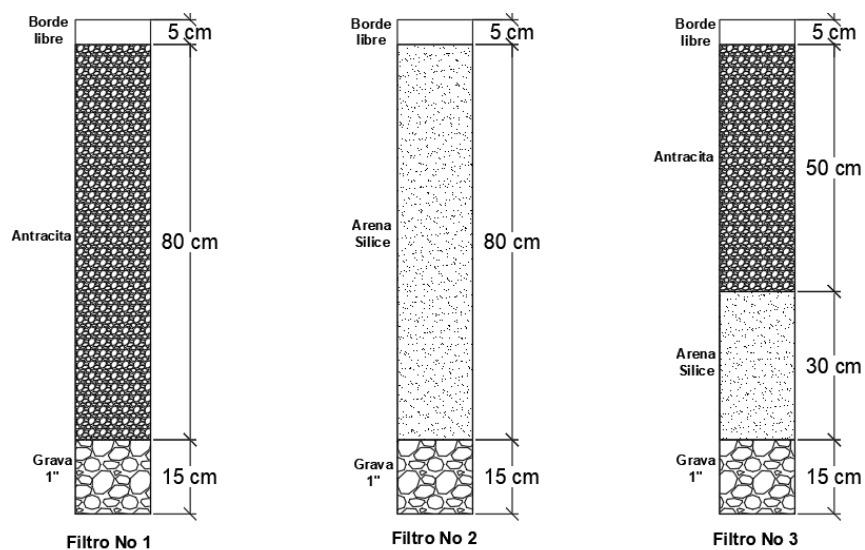
Fuente: Autores

11.2.4. Disposición de materiales granulares en batería de filtros

11.2.4.1. Disposición de materiales granulares tamizados por capas, cumpliendo espesores y especificaciones de filtros rápidos de flujo descendente.

Los lechos filtrantes se construyen teniendo en cuenta la tabla 10 de este documento que hace referencia a la tabla 10 del RAS 0330 DE 2017, los espesores de los lechos filtrantes se estructuran de la siguiente forma:

Figura 4. Espesores de materiales filtrantes



Fuente: Autores

Imagen 2. Espesor de materiales filtrantes de practica



Fuente: Autores

11.2.5. Ajuste de funcionamiento a sistema de filtración.

Antes de disponer el material filtrante en los tubos, se realizó un lavado extenso a estos, ya que, había presencia de finos que aumentaban el nivel de turbiedad del agua problema a ensayar, sin embargo,

en los filtros de arena y arena-antracita, se retiraron 2 cm de grava 1" y se remplazaron por grava de 3/8", este cambio se debió a que por los espacios de la grava de 1" se pasaba la arena sílice.

11.3. FASE 3

11.3.3. Preparación de agua problema

Para la preparación de agua problema, se tienen en cuenta los datos obtenidos en el análisis estadístico realizado anteriormente, mediante los cuales se pretende simular tres turbiedades de agua, las cuales corresponden a los cuartiles Q₁, Q₂ y Q₃.

Tabla 29. Valores de turbiedades a evaluar

TURBIEDADES A EVALUAR	
DESCRIPCIÓN	TURBIEDAD (NTU)
CUARTIL Q1	2,19
CUARTIL Q2-MEDIANA	9,46
CUARTIL Q3	30,94

Fuente: Autores

12.3.1.1. Preparación de agua problema dosificada con bentonita

Inicialmente se pretende preparar las muestras de agua problema, mediante la simulación de turbiedad a través de arcilla bentonita. Como base, se toma como referencia el proyecto de investigación: "Influencia de la variación de la turbiedad en los coeficientes del modelo de SAN'S para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas floculantes" [17], mediante el cual se realizó una regresión lineal para obtener la siguiente formula:

$$CB = v (0.003545 + 0.001818 * TU) \quad [17] \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

CB = Cantidad de bentonita en (g)

V = Volumen de agua en (lt)

TU = Turbiedad necesaria en (NTU)

De tal manera, se procede aplicar la formula, para un volumen de agua de 40 lt por muestra, obteniendo así los siguientes datos:

Tabla 30. Dosis de bentonita requerida

Turbiedad (NTU)	Dosis de bentonita
2,19	0,30
9,46	0,83
30,94	2,39

Fuente: Autores

Imagen 3, Dosificación de bentonita



Fuente: Autores

Calculada la dosificación de bentonita, se procede a realizar la disolución conforme al volumen de agua seleccionado, que en este caso corresponde a los 40 lt para cada muestra.

12.3.1.2. Preparación de agua problema dosificada experimentalmente

Para simular una muestra de agua más cercana a la realidad, se toma como agua problema una muestra de agua cruda extraída de la cuenca del Río Teusacá, la cual se ubica en el departamento de Cundinamarca y presenta una turbiedad inicial de 434 NTU.

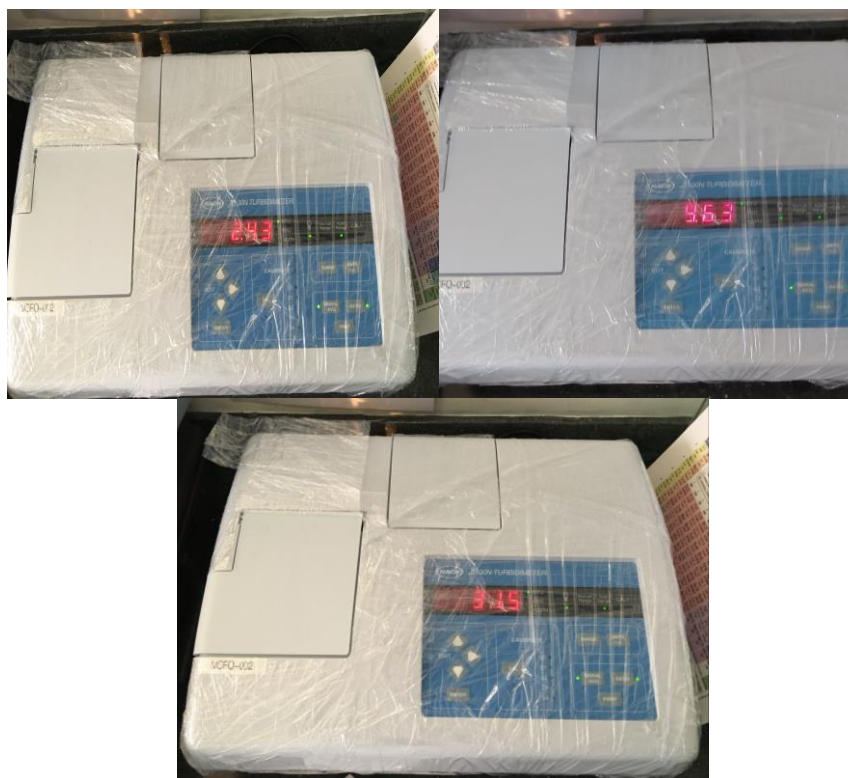
Imagen 4. Agua cruda del rio Teusacá



Fuente: Autores

Debido a que los valores requeridos para las turbiedades de estudio son menores, lo que se realiza es un procedimiento experimental añadiendo agua de grifo para los mismos 40 lt, hasta conseguir la turbiedad requerida en cada muestra a evaluar.

Imagen 5. Turbiedades obtenidas - con disolución de agua cruda del rio Teusacá



Fuente: Autores

Imagen 6. Aguas problema diluidas del agua cruda de rio Teusacá



Fuente: Autores

De tal manera, los valores teóricos versus los valores experimentales obtenidos en el laboratorio, quedan representados de la siguiente forma:

Tabla 31. Valores de turbiedad teórica vs turbiedad experimental

TURBIEDADES A EVALUAR		
DESCRIPCIÓN	TURBIEDAD TEORICA (NTU)	TURBIEDAD EXPERIMENTAL (NTU)
CUARTIL Q1	2,19	2,43
CUARTIL Q2-MEDIANA	9,46	9,63
CUARTIL Q3	30,94	31,5

Fuente: Autores

12.2 FASE 4 - Filtración de aguas problema

12.4.1. Filtración de agua problema

Este proceso, consiste básicamente en pasar el agua problema a través de cada batería de filtro, con el fin de conocer el nivel de turbiedad posterior al proceso de filtración.

12.4.1.1. Filtración de agua problema dosificada con bentonita

Mediante este proceso, inicialmente se depositan aproximadamente 20 lt de agua de grifo por cada batería de filtro, posteriormente se adicionan aproximadamente 12 lt de agua problema en cada una

de las tres baterías, las cuales corresponden a los filtros de arena, antracita y mixto (arena – antracita). Quiere decir que, para la recolección de datos, se obtendrán tres valores por cada muestra problema.

Este proceso se realiza mediante dos ensayos. En el primer ensayo el agua depositada en el filtro se realiza mediante un diámetro de entrada de $\frac{1}{2}$ ", quiere decir que el caudal de entrada es bajo, por tanto, el filtro no trabaja al 100% de su capacidad, puesto que adicionalmente el volumen de agua preparado no fue suficiente para colmatar el filtro, ya que por cada muestra solo se adicionaron 12 lt a cada filtro.

En el segundo ensayo, se opta por depositar el agua hasta colmatar el 100% del filtro, quiere decir que el diámetro de entrada es igual a 6", de esta manera, se garantiza que el filtro trabaja a su capacidad máxima en diámetro y profundidad, ya que adicionalmente el volumen de agua agregada a cada filtro, fue de aproximadamente 40 lt.

12.4.1.2. Filtración de agua problema dosificada experimentalmente

Para este proceso se aumenta el volumen de agua depositada en el filtro, a comparación de la filtración realizada con bentonita, en esta dosificación se preparan 180 lt de agua problema para cada muestra, quiere decir que para cada filtro se depositan 60 lt de agua, de igual manera se obtendrán tres valores de turbiedad final por cada muestra problema.

En este proceso solo se realiza un ensayo, en el cual también se trabaja el 100% del filtro. El diámetro de entrada es igual a 6" y el agua depositada corresponde a 60 lt de agua adicionados al filtro continuamente.

12.4.2. Registro y toma de datos obtenidos

12.4.2.1. Datos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada con bentonita

12.4.2.1.1. Lecturas de Turbiedad

En los ensayos 1 y 2, las lecturas de turbiedad, se obtienen a partir de 12 muestras llevadas a ensayar a un laboratorio externo, por medio del cual se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 32. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita

ENSAYO No. 1			
TURBIEDADES OBTENIDAS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA CON BENTONITA			
No muestra	Tipo de muestra	Turbiedades obtenidas	
		Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	4,10	-
2	Filtro antracita	-	5,90

Continuación, Tabla 32. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita:

3	Filtro arena	-	7,30
4	Filtro arena - antracita	-	5,00
5	Agua cruda (9,46 NTU)	9,80	-
6	Filtro antracita	-	11,30
7	Filtro arena	-	10,70
8	Filtro arena - antracita	-	11,10
9	Agua cruda (30,94 NTU)	18,10	-
10	Filtro antracita	-	15,50
11	Filtro arena	-	19,60
12	Filtro arena - antracita	-	15,20

Fuente: Autores

Nota. El certificado de este ensayo, puede ser consultado en los anexos de este documento

Tabla 33. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita

ENSAYO No. 2			
TURBIEDADES OBTENIDAS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA CON BENTONITA			
No muestra	Tipo de muestra	Turbiedades obtenidas	
		Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	2,04	-
2	Filtro antracita	-	3,75
3	Filtro arena	-	3,44
4	Filtro arena - antracita	-	2,92
5	Agua cruda (9,46 NTU)	4,26	-
6	Filtro antracita	-	3,23
7	Filtro arena	-	3,97
8	Filtro arena - antracita	-	2,65

Continuación, Tabla 33. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada con bentonita:

9	Agua cruda (30,94 NTU)	12,50	-
10	Filtro antracita	-	11,39
11	Filtro arena	-	11,72
12	Filtro arena - antracita	-	10,08

Fuente: Autores

Nota. El certificado de este ensayo, puede ser consultado en los anexos de este documento.

12.4.2.1.2. Tiempo de filtración

Para este ensayo el tiempo de filtración dado en segundos, se toma para 1 lt de agua filtrada.

Tabla 34. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada con bentonita

ENSAYO No. 1			
TIEMPOS OBTENIDOS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA CON BENTONITA			
No muestra	Tipo de muestra	Vol. de agua (lt)	Tiempo (s)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	N/A	N/A
2	Filtro antracita	1,00	35,80
3	Filtro arena	1,00	44,70
4	Filtro arena - antracita	1,00	42,65
5	Agua cruda (9,46 NTU)	N/A	N/A
6	Filtro antracita	1,00	49,13
7	Filtro arena	1,00	38,27
8	Filtro arena - antracita	1,00	39,70
9	Agua cruda (30,94 NTU)	N/A	N/A
10	Filtro antracita	1,00	43,35
11	Filtro arena	1,00	36,65
12	Filtro arena - antracita	1,00	39,45

Fuente: Autores

Para este ensayo el tiempo de filtración dado en segundos, se toma para 2 lt de agua filtrada.

Tabla 35. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada con bentonita

ENSAYO No. 2			
TIEMPOS OBTENIDOS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA CON BENTONITA			
		Vol. de agua (lt)	Tiempo (s)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	N/A	N/A
2	Filtro antracita	2,00	12,03
3	Filtro arena	2,00	34,18
4	Filtro arena - antracita	2,00	21,11
5	Agua cruda (9,46 NTU)	N/A	N/A
6	Filtro antracita	2,00	12,05
7	Filtro arena	2,00	34,16
8	Filtro arena - antracita	2,00	20,21
9	Agua cruda (30,94 NTU)	N/A	N/A
10	Filtro antracita	2,00	12,49
11	Filtro arena	2,00	35,23
12	Filtro arena - antracita	2,00	19,62

Fuente: Autores

12.4.2.2. Datos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada experimentalmente

12.4.2.2.1. Lecturas de Turbiedad

En el ensayo 3, las lecturas de turbiedad inicial (Agua cruda, muestra 1, 5 y 9), se obtienen directamente en el laboratorio. Posteriormente las muestras filtradas se vuelven a ensayar, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 36. Turbiedades obtenidas para la filtración de agua problema dosificada experimentalmente

ENSAYO No. 3			
TURBIEDADES OBTENIDAS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA EXPERIMENTALMENTE			
No muestra	Tipo de muestra	Turbiedades obtenidas	
		Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	2,43	-
2	Filtro antracita	-	2,17
3	Filtro arena	-	2,26
4	Filtro arena - antracita	-	1,84
5	Agua cruda (9,46 NTU)	9,63	-
6	Filtro antracita	-	8,32
7	Filtro arena	-	8,81
8	Filtro arena - antracita	-	7,92
9	Agua cruda (30,94 NTU)	31,50	-
10	Filtro antracita	-	28,40
11	Filtro arena	-	29,30
12	Filtro arena - antracita	-	26,30

Fuente 1. Autores

Nota. El certificado de este ensayo, puede ser consultado en los anexos de este documento.

12.4.2.2.2. Tiempo de filtración

Para este ensayo el tiempo de filtración dado en segundos, se toma para 2 lt de agua filtrada.

Tabla 37. Tiempos obtenidos para la filtración de agua problema dosificada experimentalmente

ENSAYO No. 3			
TIEMPOS OBTENIDAS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA PROBLEMA DOSIFICADA EXPERIMENTALMENTE			
		Vol. de agua (lt)	Tiempo (s)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	N/A	N/A
2	Filtro antracita	2,00	11,73
3	Filtro arena	2,00	34,38
4	Filtro arena - antracita	2,00	20,32
5	Agua cruda (9,46 NTU)	N/A	N/A
6	Filtro antracita	2,00	12,15
7	Filtro arena	2,00	34,23
8	Filtro arena - antracita	2,00	20,06
9	Agua cruda (30,94 NTU)	N/A	N/A
10	Filtro antracita	2,00	12,26
11	Filtro arena	2,00	37,62
12	Filtro arena - antracita	2,00	19,78

Fuente: Autores

11.5. FASE 5 - Cálculo de coeficientes de filtración

Conforme a los resultados obtenidos, en los tres ensayos realizados, notablemente se evidencia que en el ensayo No 3, al cambiar las condiciones de preparación del agua problema y la adición continua del caudal hacia el filtro, las turbiedades del agua filtrada por los tres lechos disminuyen con respecto a la turbiedad de la muestra inicial. Por tal motivo, el desarrollo del modelo matemático expresado por Ives [3] se va a realizar con base a los valores obtenidos en el ensayo No 3.

La ecuación expresada por Ives, en el año 1962, corresponde a un modelo matemático que puede ser desarrollado mediante la aplicación de las ecuaciones diferenciales separables, ya que, en este caso se puede relacionar la variación de concentración (Turbiedad en NTU) con respecto a la profundidad del lecho en (m), para finalmente obtener el valor correspondiente al coeficiente de filtración dado en (m^{-1}).

$$\frac{dc}{dz} = -\lambda c \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

L = Es la longitud del filtro, expresado en (m)

λ = Es el Coeficiente del filtro o módulo de impedimento, expresado en (m^{-1})

C = Es la concentración remanente de la suspensión, expresado en (NTU)

11.5.1. Desarrollo modelo matemático

Ecuación diferencial separable

$$\frac{1}{c} dc = -\lambda dz \quad \text{Ecuación (11)}$$

Integrando

$$\int \frac{1}{c} dc = -\lambda \int 1 dz$$

Solución general implícita

$$\ln |c| = -\lambda z + C_1 \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$e^{\ln|c|} = e^{-\lambda z + C_1} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$c^z = e^{-\lambda z} + e^{C_1} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Solución general explícita

$$c_z = c_1 * e^{-\lambda z} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Condición de inicio

$$c_{z_0} = c_1 * e^{-\lambda z_0} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$c_{z_0} = c_1 \quad \text{Ecuación (17)}$$

Condición final

$$c_{z_f} = c_1 * e^{-\lambda z_f} \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$\left(\frac{c_{z_f}}{c_1}\right) = e^{-\lambda z_f} \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$\ln\left(\frac{c_{z_f}}{c_1}\right) = \ln(e^{-\lambda z_f}) \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$\ln\left(\frac{c_{zf}}{c_1}\right) = -\lambda z_f \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$\frac{\ln\left(\frac{c_{zf}}{c_1}\right)}{z_f} = -\lambda \quad \text{Ecuación (22)}$$

11.5.2. Coeficientes de filtración

Evaluando la condición final de la Ecuación diferencial separable, se obtiene que la relación entre el logaritmo natural, de la concentración final con la concentración inicial y la profundidad del filtro, es igual al coeficiente de filtración requerido. Visto de esta manera y aplicando esta expresión se obtiene:

Tabla 38, Coeficientes de filtración calculados

Coeficientes de filtración				
No muestra	Tipo de muestra	Profundidad del filtro (m)	Turbiedad (NTU)	Coeficiente de filtración (m-1)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	-	2,43	-
2	Filtro antracita	0,80	2,17	-0,141
3	Filtro arena	0,80	2,26	-0,091
4	Filtro arena - antracita	0,80	1,84	-0,348
5	Agua cruda (9,46 NTU)	-	9,63	-
6	Filtro antracita	0,80	8,32	-0,183
7	Filtro arena	0,80	8,81	-0,111
8	Filtro arena - antracita	0,80	7,92	-0,244
9	Agua cruda (30,94 NTU)	-	31,5	-
10	Filtro antracita	0,80	28,4	-0,129
11	Filtro arena	0,80	29,3	-0,091
12	Filtro arena - antracita	0,80	26,3	-0,226

Fuente: Autores

11.5.3. Eficiencia de remoción

Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos de turbiedad posterior al proceso de filtración, se procede a calcular el porcentaje de remoción mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Turbiedad inicial (NTU)} - \text{Turbiedad final (NTU)}}{\text{Turbiedad inicial (NTU)}} * 100 \quad \text{Ecuación (23)}$$

Conforme a los procesos de filtración realizados por cada lecho y cada muestra de agua problema, se obtiene:

Tabla 39. Eficiencia de remoción

Eficiencia de remoción			
No muestra	Tipo de muestra	Turbiedad (NTU)	Eficiencia (%)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	2,43	-
2	Filtro antracita	2,17	11%
3	Filtro arena	2,26	7%
4	Filtro arena - antracita	1,84	24%
5	Agua cruda (9,46 NTU)	9,63	-
6	Filtro antracita	8,32	14%
7	Filtro arena	8,81	9%
8	Filtro arena - antracita	7,92	18%
9	Agua cruda (30,94 NTU)	31,5	-
10	Filtro antracita	28,4	10%
11	Filtro arena	29,3	7%
12	Filtro arena - antracita	26,3	17%

Fuente: Autores

11.5.4. Carga superficial

Para la obtención de carga superficial, inicialmente se evalúa el caudal mediante el volumen y el tiempo, siendo el volumen igual a 2 lt de agua para todos los casos. Respectivamente el tiempo, el cual fue tomado para cada muestra de agua problema y lecho filtrado. De tal manera se obtiene:

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

Q = Caudal en (m³/s)

Vol = Volumen de agua en (lt)

t = tiempo en (s)

Obtenido el caudal, por continuidad se obtiene:

$$Q = V * A \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$\frac{Q}{A} = V \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

Q = Caudal en (m³/s)

V = Velocidad o carga superficial en (m/d)

A = Área superficial (m²), para un diámetro de filtro correspondiente a 6".

Visto de tal forma, evaluando los tres lechos conforme a las muestras de agua problema realizadas, se obtiene:

Tabla 40, Caudal y carga superficial

Caudal y carga superficial					
No muestra	Tipo de muestra	Volumen (L)	Tiempo de filtración (S)	Q (m3/d)	Carga Superficial (m/d)
1	Agua cruda (2,19 NTU)	-	-	-	-
2	Filtro antracita	2	11,73	0,000171	807,58
3	Filtro arena	2	34,38	0,000058	275,54

Continuación, Tabla 40. Caudal y carga superficial:

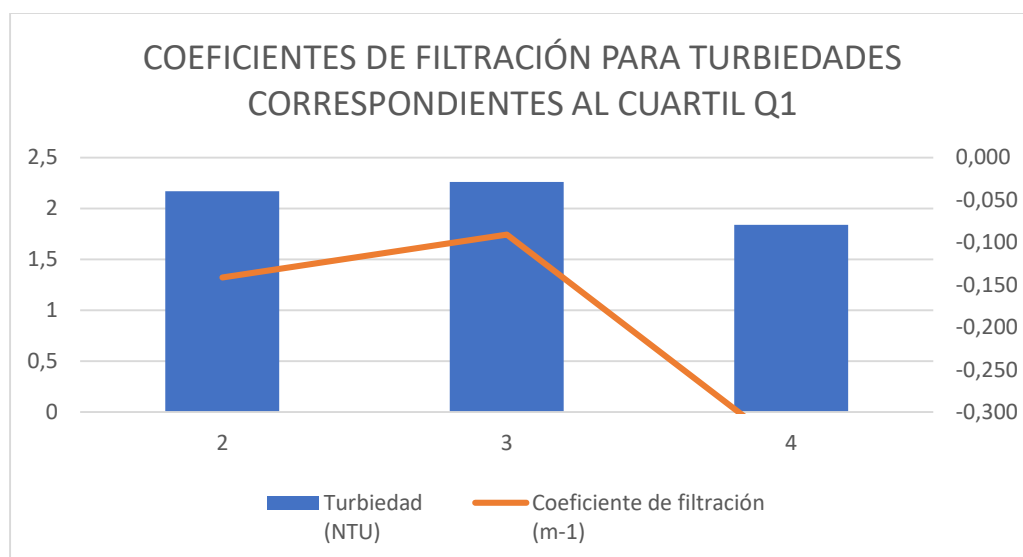
4	Filtro arena - antracita	2	20,32	0,000098	466,19
5	Agua cruda (9,46 NTU)	-	-	-	-
6	Filtro antracita	2	12,15	0,000165	779,66
7	Filtro arena	2	34,23	0,000058	276,74
8	Filtro arena - antracita	2	20,06	0,000100	472,23
9	Agua cruda (30,94 NTU)	-	-	-	-
10	Filtro antracita	2	12,26	0,000163	772,67
11	Filtro arena	2	37,62	0,000053	251,81
12	Filtro arena - antracita	2	19,78	0,000101	478,91

Fuente: Autores

11.5.5. Análisis De Resultados

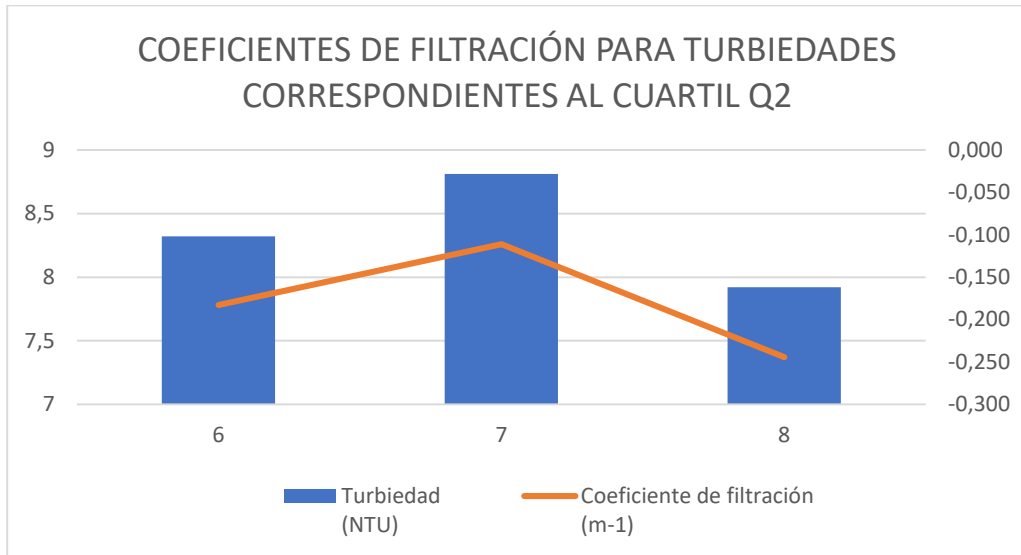
Coefficientes de filtración

Grafica 4. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q1



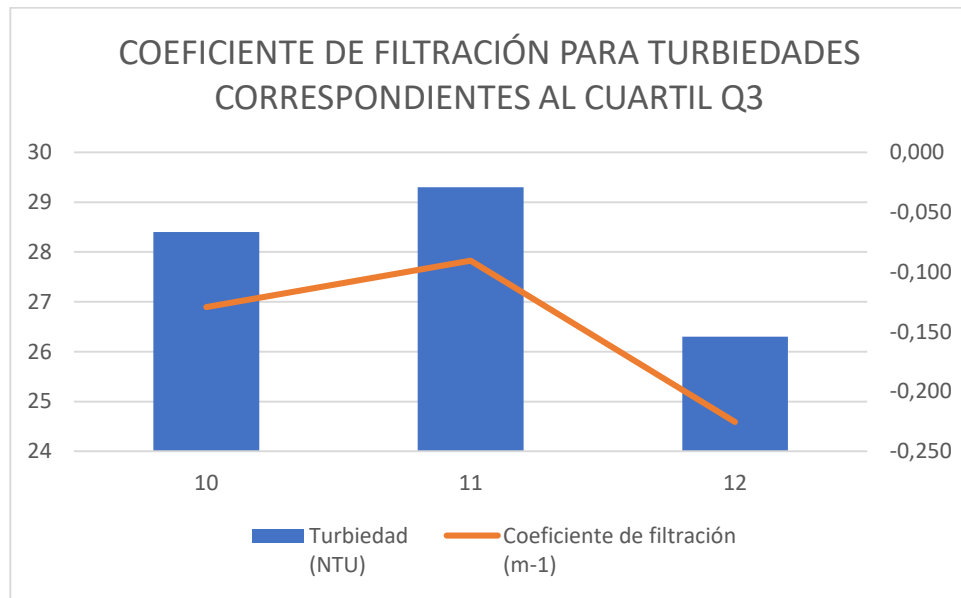
Fuente: Autores

Grafica 5. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q2



Fuente: Autores

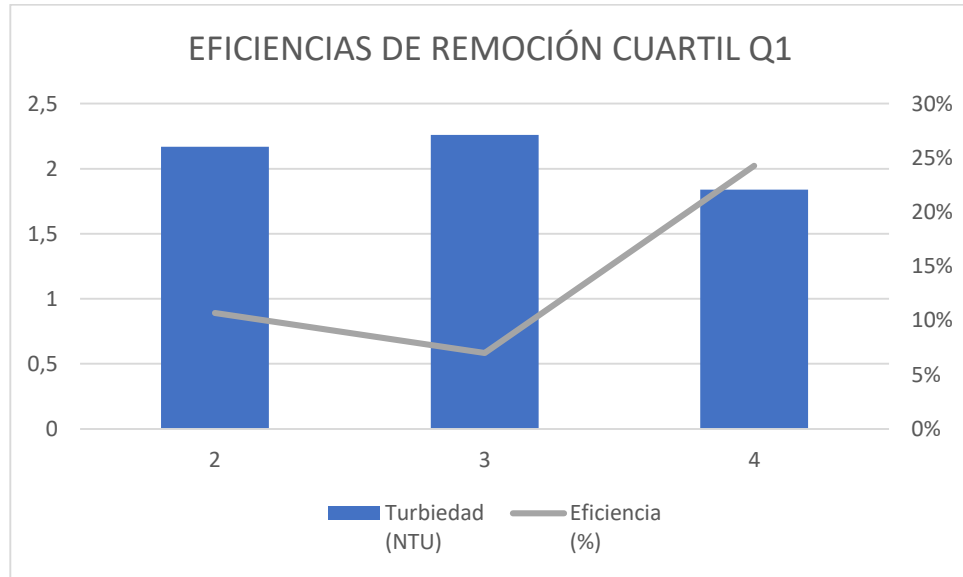
Grafica 6. Coeficientes de filtración para turbiedades correspondientes al cuartil Q3



Fuente: Autores

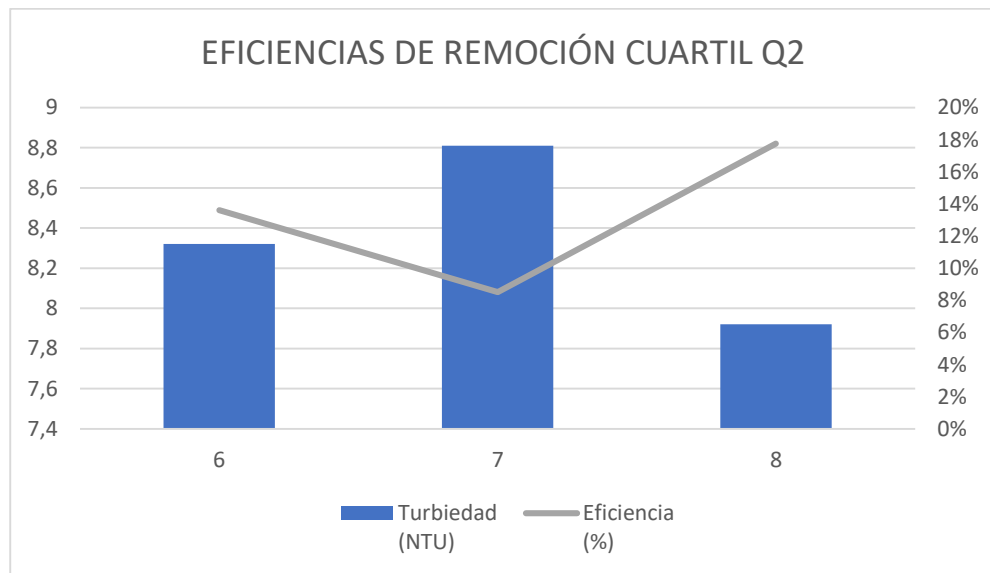
Eficiencias de remoción

Grafica 7. Eficiencias de remoción cuartil Q1



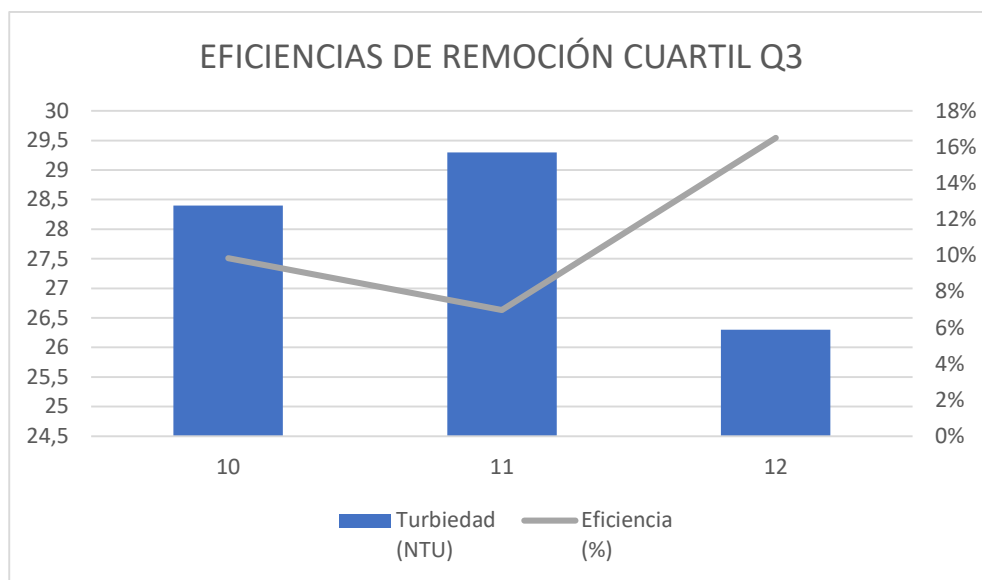
Fuente: Autores

Grafica 8. Eficiencias de remoción cuartil Q2



Fuente: Autores

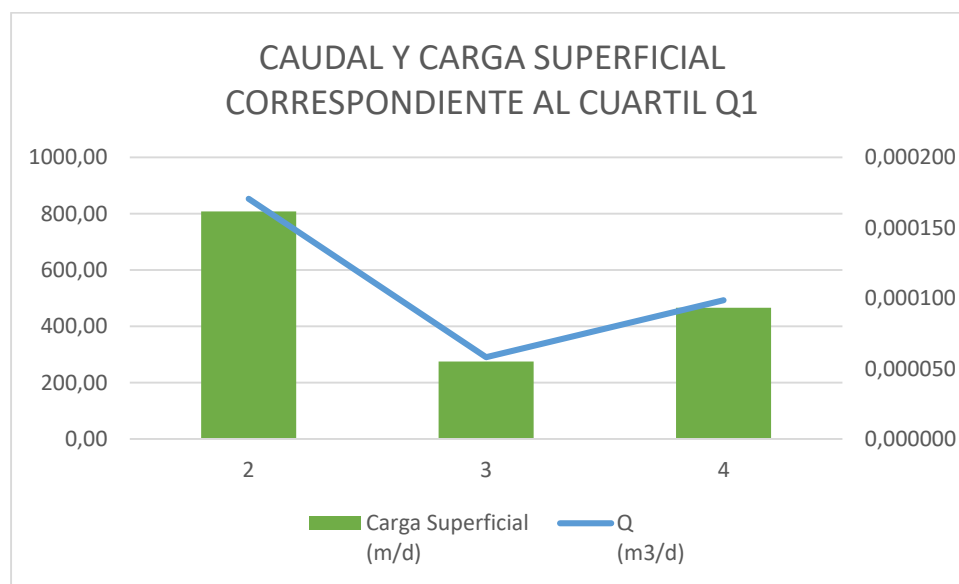
Grafica 9. Eficiencias de remoción cuartil Q3



Fuente: Autores

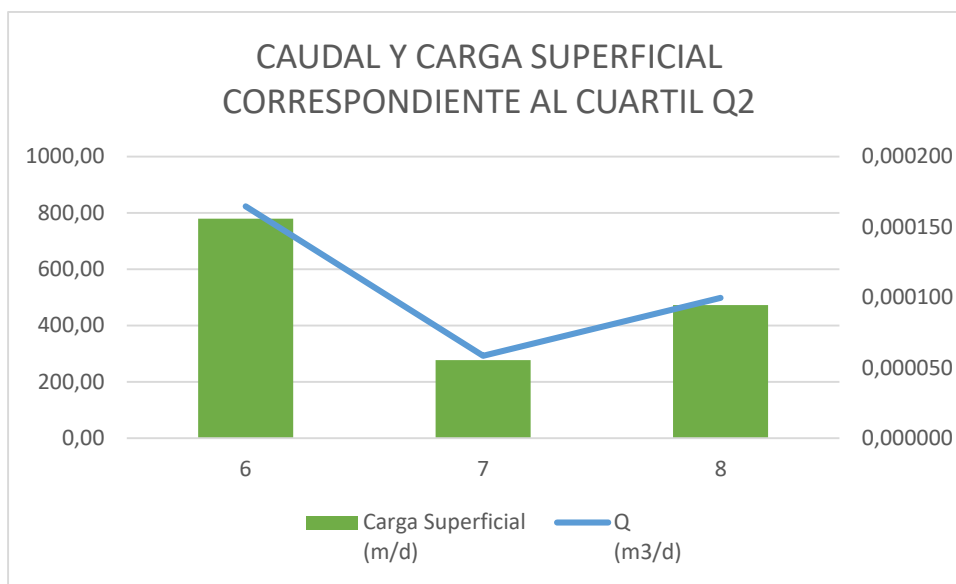
Caudal y carga superficial

Grafica 10. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q1



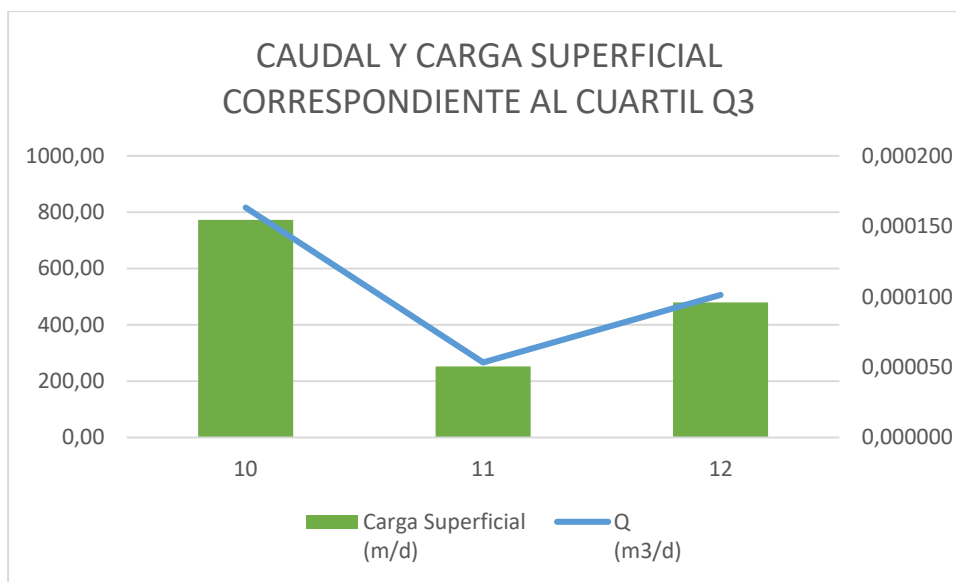
Fuente: Autores

Grafica 11. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q2



Fuente: Autores

Grafica 12. Caudal y carga superficial correspondiente al cuartil Q3



Fuente: Autores

Filtración de agua problemas preparada con bentonita.

Los resultados de filtración no son los esperados, ya que, como se pudo observar los niveles de turbiedad obtenidos para el agua problema preparada con la dosificación de bentonita varían de lo teórico a lo práctico, es decir la dosificación de bentonita se cumple según la ecuación (8) para cada muestra de agua, pero los resultados de laboratorio demuestran valores distintos a los teórico, por ejemplo para el agua problema cuya turbiedad debía dar 2.19 NTU, el resultado es 4.10 NTU, pero el dato que más alejado estuvo en la primer ensayo es el resultado de turbiedad del agua cruda que debía estar cerca de 30.94 NTU y se obtuvo 18.10 NTU, si se pudo tener un valor experimental cercano al teórico y es el resultado obtenido para la el agua problema con 9.46 NTU, se obtuvo 9.80 NTU

Por otro lado, se observa en el primer ensayo, los niveles de turbiedad de las aguas problema filtradas son mayores a las iniciales, solo se remueve material en el agua problema de 18.10 NTU en los filtros de antracita y arena – antracita, es decir que los demás resultados, las aguas problema durante el paso por los lechos se contaminaron más, en el primer ensayo se ven diferencias más grandes en comparación al segundo ensayo, y esto se debe principalmente a que después de conocer los resultados del primer ensayo se procede a extraer los materiales del filtro y retornar al lavado de los materiales, con los materiales lavados se filtra nuevamente, y ya se obtiene un mejor resultado para las aguas problema con NTU de 4.26 y 12.50 correspondientemente, existe remoción de turbiedad en los tres lechos filtrantes para las tres aguas problema, cabe resaltar que para la segunda preparación de aguas problema con la dosificación teórica de bentonita tampoco se logra obtener los resultados, solo se estuvo cerca en agua problema con NTU de 2.19, ya que, se obtuvo 2.04 NTU.

Filtración de agua problemas preparada experimentalmente

Con el fin que el proyecto de investigación sea más claro y cercano a los procesos reales de filtración en las PTAP del departamento de Cundinamarca, se logra obtener el agua cruda del rio Teusacá tratada en la PTAP Progresar S.A, dicha agua con 434 NTU, es utilizada para preparar las aguas problemas del proyecto, luego de las disoluciones se logra llegar a los NTU requeridos y se filtra esta agua, los resultados son evidentemente mejores, porque se ve la remoción de turbiedad, en los tres filtros para las tres aguas problema.

Coeficientes de filtración

El coeficiente de filtración que se obtiene para el lecho mixto, es el de menor magnitud, el coeficiente de filtración del lecho filtrante simple de antracita está por debajo del lecho mixto y el coeficiente obtenido para el lecho simple de arena está por debajo. Estos coeficientes a su vez, ayudan a identificar la eficiencia de la remoción de NTU del filtro, ya que, entre menor sea el coeficiente, mayor será la retención de partículas de turbiedad, es decir, que la efectividad del lecho mixto es el de mayor eficiencia.

Eficiencias de remoción

Como se puede observar en las gráficas, la mayor eficiencia de remoción la tiene el lecho filtrante mixto con porcentaje promedio de remoción de las tres aguas problema del 19.6%, seguido del lecho simple de antracita con 11.6% y por último el lecho simple de arena con 7.66 %.

Caudal y carga superficial

Las cargas superficiales con mayor magnitud son correspondientes al lecho simple de antracita, con promedio de carga superficial de las tres aguas problema de 786.63 m/d, esto se debe al **TE** de las partículas, entre mayor tamaño de la partícula, mayor será la carga superficial, por el contrario, el lecho simple de arena que debido a su **TE** menor, tiene la menor carga superficial con un promedio de 268.03 m/d y el lecho mixto debido a la conformación con de arena y antracita, tiene una carga promedio de 472.44 m/d.

12. RECOMENDACIONES

- Si un proyecto de investigación intenta simular turbiedades de agua utilizando bentonita, se recomienda utilizar otro material que genere floc, la bentonita al ser un material demasiado fino, cuando se disuelve con agua, no genera partículas inmediatas que el filtro pueda retener, y por consiguiente los niveles de turbiedad al crear el agua problema serán inexactos. La bentónica mezclada con agua del grifo genera porcentajes de color altos, mas no partículas suspendidas que puedan ser retenidas en los lechos, además su proceso de sedimentación propio es muy lento, debido a esto no se pudo realizar el proyecto con estas muestras, sin embargo y para tener en cuenta, esas partículas suspendidas generadoras del color, se pueden eliminar dosificando coagulante e iniciar el proceso de potabilización de agua desde coagulación o aireación si contiene índices de sabor y olor.
- Si en un proyecto de investigación se intenta simular turbiedades de agua utilizando bentonita, y anterior al proceso de filtración no se realizan procedimientos de coagulación y floculación, se recomienda utilizar un material más grueso, ya que la bentonita al ser un material demasiado fino, no genera por sí mismo partículas de floc, quiere decir que este material sin ningún proceso anterior no alcanza a ser retenido por el filtro, sin embargo, la bentonita mezclada con agua de grifo, genera otro tipo de propiedades, como color y resistencia a la suspensión.
- Se debe tener en cuenta que, en los lechos filtrantes luego de los lavados pertinentes del material y antes de iniciar el respectivo proceso de filtración, se debe contemplar un tiempo de curado, este se fundamenta en iniciar la filtración dejando pasar el agua cruda durante un tiempo aproximado de 10 minutos, lo cual se realiza con el fin de que el lecho filtrante ocupe todos los intersticios del filtro y de esta manera pueda retener las partículas suspendidas del agua problema.
- Es de vital importancia realizar el lavado de los materiales filtrantes antes de ingresarlos por primera vez a la estructura de los filtros, los materiales debido a su acopio normalmente en bodegas de almacenamiento, suelen generar finos que con el tiempo pueden aumentar los niveles de turbiedad a la hora de filtrar las muestras del agua problema, es decir, que el agua que ingresa a los lechos, al salir puede aumentar su nivel de turbiedad, lo cual indiscutiblemente puede generar alteraciones en los resultados del proceso investigativo.
- Para próximos complementos que se le pueden hacer a este proyecto de investigación, se recomienda realizar la filtración del agua problema en función de la longitud de los lechos filtrantes, es decir, en este proyecto se tomaron unos espesores a decisión de los autores, pero estos pueden variar según los parámetros de la RAS 0330 DE 2017, de esta manera se

podría evaluar la eficiencia de los filtros según los espesores de los lechos y la profundidad del total del sistema.

- El modelo matemático desarrollado en este proyecto corresponde al de Ives (1962). Para futuras investigaciones, se pueden desarrollar otros modelos matemáticos como los evidenciados en la tabla No 1 de este proyecto, de otra manera también se pueden plantear otros modelos expuestos por los propios autores. Lo anterior con el fin de realizar una comparación, esperando que existan similitudes entre los modelos, ya que todos apuntan al mismo resultado, pero se basan en diferentes variables.

13. CONCLUSIONES

- Luego de realizar el cálculo del coeficiente de filtración (λ) global, mediante el modelo matemático de Ives (1962) y partiendo de la aplicación de los tres lechos filtrantes comúnmente utilizados, adicional a la simulación de las tres muestras representativas de agua cruda tratadas en las PTAP del departamento de Cundinamarca, se evidencian valores negativos en los resultados, esto lo que demuestra es que efectivamente los lechos filtrantes están reteniendo las partículas suspendidas del agua cruda, el valor negativo indica que se presenta disminución de turbiedad, por lo que, se demuestra que el filtro está funcionando correctamente respecto a lo diseñado.
- El filtro que obtuvo mayor eficiencia, corresponde al construido con la unión de los dos lechos: antracita y arena. Esta conjugación de materiales, permite obtener mejores resultados. Por un lado, el lecho de antracita es altamente absorbente gracias a sus características químicas, pero, por otro lado, el complemento del lecho en arena debido a su **TE**, posee la capacidad de retener físicamente partículas más pequeñas.
- Se evidencia que, para optimizar los porcentajes de remoción del filtro, conforme a la variación de la tasa de filtración, se pueden utilizar diferentes espesores de lechos y mayores longitudes del filtro, ya que, a mayor longitud, mayor es la capacidad de filtración.
- Ya que los porcentajes de eficiencia de remoción obtenidos, relativamente son bajos, estos pueden aumentar si se realizan procesos de coagulación y floculación antes de la filtración, ya que esto permitirá generar partículas más grandes, las cuales al pasar por el filtro quedarán en gran parte retenidas por los lechos.
- En general los coeficientes calculados para cada lecho filtrante no varían en gran magnitud de un ensayo a otro, ya que todos los procesos fueron realizados con los mismos espesores de lecho y profundidad de filtro, además de que la diferencia entre las turbiedades de agua filtrada con respecto a las muestras de agua problema, disminuyen, pero no en gran medida.
- En los tiempos de filtración tomados para cada muestra de agua, se evidencia que estos varían con respecto al tamaño efectivo del lecho y el caudal de entrada del filtro.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. M. YACTAYO, «Ingeniería Sanitaria,» 02 Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://ingenieriasanitaria.com.pe/web/index.php/en/manuales/plantas-de-filtracion-rapida>. [Último acceso: 14 Marzo 2020].
- [2] J. VALENCIA ARBOLEDA, «Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua,» de *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua*, vol. 13, Lima, Cepis (Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente, 1972.
- [3] K. IVES, «Rapid Filtration,» *Water Research Pergamon* , vol. 4, n° -, pp. 201 - 223, 1970.
- [4] A. C. PAYATAKES y C. TIEN, «Advances in Deep Bed Filtration,» *Journal Review*, vol. 25, n° 5, p. 759, 1979.
- [5] P. A.C. y R. R., «Application of Porous Media Models to the Study of Deep Bed Filtration,» *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 52, n° -, p. 731, 1974.
- [6] Y. Sun, V. Ramola, K. Wendell , R. Erik, S. Meric , W. Christopher, B. Charles, T. Mark y W. Zhi-Wu, «Mathematical modeling of biologically active filtration (BAF) for potable water production applications,» *Water Research* , Vols. %1 de %2-, n° 167, pp. -, 2019.
- [7] L. SCHIMMOLLER, «The Water Research,» - , 10 October 2013. [En línea]. Available: https://watereuse.org/wp-content/uploads/2015/12/2013_Watereuse_Webcast_Schimmoller_Kealy-Rev1.pdf. [Último acceso: 28 Febrero 2020].
- [8] D. Simpson, «Biofilm processes in biologically active carbon water purification,» *Water Research*, vol. 42, n° 12, pp. 2839 - 2848, 2008.
- [9] D. Xu, B. Langming, T. Xiaobin, N. Dongyuan, L. Xingsheng, Z. Xuewu, L. Guibai y L. Heng , «A comparison study of sand filtration and ultrafiltration in drinking water treatment: Removal of organic foulants and disinfection by-product formation,» *Science of the Total Environment*, Vols. %1 de %2-, n° -, pp. 322-331, 2019.
- [10] L. J. GUALTEROS DÍAZ y M. A. CHACÓN RODRÍGUEZ , *Estudio de la eficiencia de lechos filtrantes para la potabilización de agua proveniente de la quebrada la despensa en el municipio Guaduas Cundinamarca vereda la Yerbabuena*, Bogotá DC, 2015.
- [11] S. Akosile, A. F.O., L. K.H., A. T.F., A. J.R., B. J.O. y O. A.M., «Performance evaluation of locally produced ceramic filters for household water treatment in Nigeria,» *Scientific African*, Vols. %1 de %2-, n° 7, pp. -, 2020.

- [12] J. A. ROJAS ROMERO, Ingeniero Civil, Tercera ed., Bogotá D.C: Alfaomega grupo editor S.A, 1999, p. 224.
- [13] M. d. V. C. y. Territorio, *Resolución 0330*, Bogota: 2017, 2017.
- [14] L. Lira, «Filtros rápidos y su primera aplicación en Chile,» *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, Chile, 1920.
- [15] J. A. PEREZ P, Tratamiento de aguas - Filtración, UNAL-Medellin, Ed., Medellin, 1981.
- [16] Quiminet, «El uso de la antracita en las industrias,» 28 Junio 2012. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/el-uso-de-la-antracita-en-las-industrias-2788403.htm>.
- [17] A. SANCHEZ y D. SOTELO, *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*, Bogota DC: Universidad Catolica de Colombia, 2018.
- [18] M. L. DAVIS, *Water and Wastewater Engineering, Desing Principles and Practice*, United States : McGraw-Hill,2010, 2010.
- [19] A. ARANGO RUÍZ, «La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua,» *LASALLISTA de Investigación*, vol. 1, nº 2, pp. 61-66, 2004.
- [20] Y. NIÑO y K. DÍAZ, *Evaluación del Comportamiento de materiales alternativos para lechos filtrantes en procesos de potabilización de agua*, Bogota DC: Universidad Catolica de Colombia, 2018.
- [21] C. LINARES y A. GONZALES, *Optimización de un sistema de filtración con nanomateriales para la mejora de los índices de calidad de agua*, Bogota DC: Universidad Catolica de Colombia, 2019.
- [22] I. J. E. TORRES, Compositor, *Filtración*. [Grabación de sonido]. -. 2020.
- [23] L. BURBANO y L. SANCHEZ, *Remoción de hierro y manganeso por oxidación - Filtración para agua potable*, -: Seminario Internacional: Visión Integral en el mejoramiento de la Calidad del Agua, -.
- [24] A. Velez, W. Ruis , A. Maria y L. Mario, *Evaluación Cinética del proceso de remoción de Mn²⁺ de una solución acuosa utilizando carbón activado impregnado con óxido de manganeso*, Montevideo, Uruguay: XXV Congreso Iberoamericano de Catálisis, 2016.
- [25] C. Wang, P. Cheng, Y. Yao, Y. Yamauchi, X. Yan, J. Li y J. Na, «In-situ fabrication of nanoarchitected MOF filter for water purification,» *Journal of Hazardous Materiales*, Vols. %1 de %2-, nº -, pp. -, 2020.

- [26] V. Elia, N. Elena, G. Roberto, O. Rosario, R. Valentina, N. Marcella, A. Angela, N. Daniele , C. Martina , T. Marco y Y. Tamar, «New chemical-physical properties of water after iterative procedure using hydrophilic polymers: The case of paper filter,» *Journal of molecular Liquids*, Vols. %1 de %2-, n° -, pp. -, 2019.
- [27] R. OVALLE CELIS y C. MORENO RIPE, *Cartilla Guía para la ejecucion de practicas de laboratorio*, Bogota: Universidad Catolica de Colombia, 2014.