

**ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO TÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUA POTABLE “LA CHICA” EN EL MUNICIPIO DE ANAPOIMA  
(CUNDINAMARCA)**

**SANTIAGO MUÑOZ MOSQUERA  
IVÁN YESID HERNÁNDEZ ACERO**



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE GRADO**

**BOGOTÁ**

**2018**

**ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO TÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUA POTABLE “LA CHICA” EN EL MUNICIPIO DE ANAPOIMA  
(CUNDINAMARCA)**

**Trabajo para obtener el título como Ingeniero Civil**

**SANTIAGO MUÑOZ MOSQUERA  
IVÁN YESID HERNÁNDEZ ACERO**

**Director**

**ING. HUMBERTO BENAVIDES**

**Asesor**

**ING. OSCAR BAQUERO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE GRADO**

**BOGOTÁ**

**2018**

## GLOSARIO

1. **Ablandamiento:** Remoción del calcio y/o magnesio del agua (RAS 2000 título c).
2. **Aeración:** Proceso en el que se produce un contacto entre el aire y el agua con el objetivo de oxigenarla y excluir gases volátiles. (RAS 2000 título c).
3. **Agua cruda:** Agua que no ha sido a proceso de tratamiento (RAS 2000 título c)
4. **Agua dura:** Agua que contiene cationes divalentes y sales disueltas en concentraciones tales que interfieren en la formación de la espuma del jabón.
5. **Agua potable:** Agua que reúne los requisitos de sanidad necesarios para el consumo humano que se encuentran en el Decreto 475 de 1998, los cuales protegen la salud de la comunidad.
6. **Alcalinidad y acidez:** Es la medida de PH en estado líquido del agua, en donde se mide la concentración de iones de hidrógeno, para determinar cómo es el líquido se establece una escala del 0 al 14 donde el 7 es neutro, el 0 lo más ácido y el 14 lo más alcalino.
7. **Calidad del agua:** Conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que proporcione medidas cuantitativas. (RAS 2000 título c).
8. **Caudal de diseño:** Caudal estimado con el cual se diseñan cada una de las unidades. (RAS 2000 título c).
9. **Cloración:** Aplicación de cloro al agua, generalmente para desinfectar o para oxidar compuestos indeseables. (RAS 2000 título c).
10. **Coagulación:** También es conocido como mezcla rápida, la cual es una operación empleada en el tratamiento de agua para disipar diferentes sustancias

químicas y gases, para este tipo de plantas se usa para dispersar el coagulante de forma rápida y uniforme a través del flujo del agua.

11. **Coagulantes:** Sustancia química que se mezcla con el agua para inducir a la creación de flocs, para así facilitar la sedimentación y filtración de sustancias de mayor tamaño, para obtener un agua cristalina.
12. **Coloides:** Sólidos finamente divididos que no se disuelven debido a su tamaño y la carga eléctrica que presenta en su superficie, por lo que se necesita de tratamiento especial para su respectiva remoción.
13. **Desarenadores:** Unidad que tiene como función la remoción de una gran cantidad de partículas sólidas de tamaño medio, para disminuir la turbiedad con la que llega el agua de la fuente.
14. **Desinfección:** Proceso por el cual se busca la eliminación de organismos patógenos presentes en el agua mediante procesos físicos o químicos, y así hacer de esta consumible para el ser humano.
15. **Difusores:** Dispositivo usado para la inserción de una sustancia con un grado de concentración alta, se desarrolla especialmente en la cloración.
16. **Dosificación:** Es la aplicación de una sustancia química al agua en cantidades óptimas y en un lugar específico que permita la correcta mezcla del compuesto aplicado con el recurso hídrico.
17. **Filtración:** Proceso en el cual se busca retener partículas que provienen del proceso de floculación, para así obtener un agua inodora, incolora e insonora, y así cumpliendo las especificaciones del RAS-2000.
18. **Floculación:** Proceso en el que se busca la aglomeración de las partículas coaguladas, aquí se desarrolla una mezcla lenta para así provocar colisiones

entre partículas coloidales sin distorsionar los agregados preformados, es decir que se buscan partículas de mayor tamaño, para así hacer fácil la sedimentación.

- 19. Gradiente de velocidad medio:** Raíz cuadrada de la potencia total disipada (P) en la unidad de volumen de una estructura hidráulica (V) dividida por la viscosidad absoluta del agua. (RAS 2000 título c).
- 20. Lecho filtrante:** Medio granular por el cual pasa agua en donde se retienen partículas por medio de percolación o de adhesión, en donde se consigue un agua cristalina.
- 21. Lodos:** Sólidos mezclados con agua, que se buscan retirar del agua en los procesos de tratamiento de agua, esta sustancia se produce en mayor cantidad en los elementos de filtración, sedimentación y desarenador.
- 22. Mantenimiento correctivo:** Trabajos que se llevan a cabo cuando alguna de las unidades, elementos, o el sistema deje de funcionar y se requiera una parada de la operación forzada.
- 23. Mantenimiento preventivo:** Trabajos que se desarrollan para la operación eficiente de la planta, siempre tratando de evitar paradas forzosas que retrasen la producción de agua por parte de la planta.
- 24. Material flotante:** Material que se ve afectado por la flotación, y que se mantiene en la superficie y así se puede notar debido a los reflejos de la luz, lo que hace que tenga apariencia turbia.
- 25. Medio filtrante:** Es una interface granular que permite la remoción de partículas coloidales por medio de la retención y adherencia de una fase líquida al pasar a través de él mismo.

26. **Mezcladores mecánicos:** Son mezcladores que inducen un flujo para desarrollar la unión uniforme del agua con la sustancia aplicada, la que se produce mediante impulsores rotatorios del tipo de hélice o turbina.
27. **Número de Froude:** Es la relación de las fuerzas inerciales y la fuerza de gravedad. (RAS 2000 título c).
28. **Número de Reynolds:** Es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción (RAS 2000 título c).
29. **Parámetros de diseño:** Son todas aquellas exigencias con las que se debe de diseñar cada uno de los elementos de la planta de tratamiento. Tales como lo son velocidad, gradiente hidráulico, etc., todos estos establecidos en la NORMA RAS 2000.
30. **Pérdida de carga:** Pérdida de energía de un fluido debido a la resistencia que se encuentra en el camino por donde está transitando.
31. **Periodo de diseño:** Tiempo para el cual se diseña la planta de tratamiento o alguno de sus componentes, en donde tiene pronosticada una demanda en cada una de sus etapas.
32. **Planta de tratamiento compacta:** Es una planta de tratamiento con procesos que deben de ser incluidos por norma, como lo son: pre oxidación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y dosificación de químicos, en donde se construye por efectos económicos y de fácil instalación, ya que resulta viable para lugares con escasos recursos y de ambientes topográficos complejos.
33. **Prueba de jarras:** Ensayo de laboratorio que se desarrolla para simular procesos unitarios como lo son la coagulación y la floculación, con el objetivo de determinar las dosis para que estos procesos se realicen de manera óptima.

- 34. Punto de quiebre en cloración:** Adición de cloro al agua hasta que la demanda de cloro ha sido satisfecha, para tener un residual de cloro libre en el agua tratada (RAS 2000 título c).
- 35. Resaltos hidráulicos:** Discontinuidad en la superficie del agua en donde se produce turbulencia, en el cual el agua pierde energía, ya que pasa de un régimen supercrítico a un régimen suscritico, por lo cual se hace uso de este en mezcla rápida.
- 36. Sedimentación:** Es la operación en la cual se busca remover sólidos en suspensión, mediante la fuerza de la gravedad, por lo que se remueve color y turbiedad del agua.
- 37. Sólidos disueltos:** Mezcla de un sólido (soluto) en un líquido solvente en forma homogénea. (RAS 2000 título c).
- 38. Tratamiento de agua:** Conjunto de procesos que se realiza al agua cruda, para hacerla potable según el Decreto 475 de 1998, en el cual se retiran sustancias químicas, orgánicas, etc., perjudiciales para la salud humana.
- 39. Turbiedad:** Falta de transparencia del agua que se produce por partículas en suspensión al ser reflejada por la luz.
- 40. Vertederos:** Es un dispositivo hidráulico en el que se busca un rebose en donde se produce un resalto hidráulico, por lo que se aprovecha para desarrollar la mezcla rápida o para desarrollar un aforo.

## **RESUMEN**

El proyecto hace un diagnóstico del presente funcionamiento de la PTAT “La Chica”, ubicada en el municipio de Anapoima. En donde se pretende, debido la configuración compacta y cilíndrica que esta posee, explicar el funcionamiento particular de la planta con el objetivo de recopilar información textual para su mejor entendimiento. De esta manera, se realizaron diversas actividades para desarrollar un diagnóstico integral de los elementos principales que la componen y de la manera cómo estos se encuentran operando.

Por consiguiente, el informe recopila diferentes aspectos para una comprensión mejor del objeto de estudio. Entre las principales actividades efectuadas, se realiza un análisis contextual generalizado que abarca las bases teóricas del tratamiento de agua potable para luego delimitar los marcos sociales, legales, técnicos y operacionales pertinentes a la actividad de la planta. De igual manera, y a nivel más específico, se realizó el estudio del funcionamiento de la planta compacta, de forma tal que se logró determinar las conceptos físicos que rigen a cada uno de los elementos que la componen, entre los que se incluyen los procesos de aforo, dosificación, coagulación, sedimentación, filtración y lavado de filtros; actividad que posteriormente permitió identificar los posibles problemas de funcionamiento de la planta y generar, paralelamente, los planos correspondientes con los componentes de la misma. De igual manera, se realizaron las pruebas correspondientes para determinar los coagulantes y sus cantidades óptimas para un tratamiento ideal de forma tal que se lograra obtener un resultado cuantitativo concluyente, que permitiese, del mismo modo, calcular la cantidad de lodos producidos por la planta y así crear una propuesta para el tratamiento de dichos lodos, con sus diseños correspondientes.

Finalmente, el informe presenta las conclusiones, comentarios y recomendaciones encontrados durante la realización del proyecto, así como los cálculos matemáticos correspondientes de las unidades pertinentes.

## **ABSTRACT**

The project makes a diagnosis of the current operation of the Water Treatment Plants "La Chica", located in the municipality of Anapoima. Where it is intended, due to the compact and cylindrical configuration that it has, explain the operation of the plant with the aim of collecting textual information for better understanding. In this way, various activities were carried out to develop a comprehensive diagnosis of the main elements that compose it and how they are operating.

Therefore, the report collects different aspects for a better understanding of the object of study. Among the main activities carried out, a generalized contextual analysis is carried out that covers the theoretical bases of drinking water treatment and then delimits the social, legal, technical and operational frameworks pertinent to the activity of the plant. Likewise, and at a more specific level, the study of the operation of the compact plant was carried out, in such a way that the physical concepts that govern each one of the elements that make it up were determined, among which are the processes of gauging, dosing, coagulation, sedimentation, filtration and filter washing; activity that later allowed to identify the possible problems of operation of the plant and generate, in parallel, the corresponding plans with the components of the same. Likewise, the corresponding tests were carried out to determine the coagulants and their optimum quantities for an ideal treatment in such a way that a conclusive quantitative result was obtained, which would allow, in the same way, to calculate the quantity of sludge

produced by the plant and thus create a proposal for the treatment of said sludge, with its corresponding designs.

Finally, the report presents the conclusions, comments and recommendations found during the realization of the project, as well as the corresponding mathematical calculations of the pertinent units.

## **INTRODUCCIÓN**

Es considerada agua potable a toda aquella que haya sido sometida a un proceso de purificación y desinfección que le permita cumplir con los parámetros de calidad establecidos por la ley; las etapas básicas de dicho tratamiento constan de los procesos de: Aireación, coagulación, sedimentación, filtración y desinfección. Las cuales deben permitir obtener un agua con características cercanas a la neutralidad en cuanto a su color, sabor y olor, así como carecer de todo tipo de agente patógeno según lo indiquen las normas. Estas normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en las consideraciones estéticas ya antes mencionadas.

Es por esto que, al ser el agua un servicio fundamental para todas las actividades vitales de la sociedad, se hace necesario que los consumidores de toda comunidad dispongan de un sistema de abastecimiento satisfactorio, lo cual implica garantizar en lo posible la continuidad del servicio, las presiones y los caudales mínimos necesarios y la sanidad del agua suministrada para que las actividades básicas de la población puedan ser realizadas sin inconvenientes. Por lo anterior, el sistema de acueducto debe realizar el mayor esfuerzo posible para mantener las plantas de tratamiento de agua potable en buen estado e implementar los procesos pertinentes para suministrar agua de la mejor calidad según los parámetros establecidos. La buena calidad del agua de consumo humano asegura al consumidor su protección contra la presencia de agentes patógenos y compuestos físicos y químicos perjudiciales a su salud. La información que proveen los programas de vigilancia y control del agua para consumo humano, aparte del beneficio relacionado con la disminución de enfermedades transmitidas por vía hídrica, es un medio que permite el mejoramiento de la calidad del servicio de abastecimiento de agua.

De esta manera, el proyecto realizará un diagnóstico de la planta de tratamientos de agua potable “La Chica” ubicada en el municipio de Anapoima, Cundinamarca. En donde, históricamente, este tipo de infraestructura para el tratamiento de agua ha sido administrada y operada directamente por la administración del municipio. Sin embargo, a partir del año 2008 dicha operación fue cedida por contrato a la Empresa Regional de Aguas del Tequendama, quienes han venido operando y administrando las PTAP y PTAR del municipio desde ese momento hasta la actualidad.

Sin embargo, Aguas del Tequendama ha poseído dificultades en la operación de las plantas debido a la deficiente transmisión de información ocurrida al realizarse la transición de operador. Debido a que el municipio no realizó la entrega de dossiers correspondientes en se detallara de manera específica la forma de operación de las plantas, los levantamientos topográficos y los inventarios de equipos con sus respectivas características. Es por esto que la empresa ha venido desarrollando, en muchos casos, los tratamientos de manera empírica debido a la información insuficiente. De igual manera, tampoco se poseen memorias de cálculo de las PTAP y la dosificación con coagulantes se está realizando sin la certeza de que los elementos químicos usados sean los más eficientes. Lo anterior ha llevado, en muchos casos, a presentar inconvenientes durante algunos periodos de la operación, tales como problemas de color y turbiedad del agua, así como dificultades en el tratamiento de los lodos que se generan a partir del lavado de filtros. De esta forma, dichos problemas comienzan a tornarse relevantes y la búsqueda de una solución comienza a volverse urgente. Sobre todo si se tiene en cuenta el incremento acelerado de población flotante al que se está viendo sometido el municipio.

Por otro lado, para el desarrollo del proyecto se siguió una metodología que inició con la fase de reconocimiento del proceso de potabilización y la recolección de

información, en donde se buscaba obtener la mayor cantidad de datos sobre la planta y su funcionamiento, acompañado de las visitas de campo, donde se pudo identificar previamente los aspectos críticos del proyecto. Posteriormente, se realizó la toma de muestras en varios sectores con el fin de evaluar la calidad del agua tratada y por tratar, de manera que se pudiera evaluar la forma en que la planta se encuentra funcionando para encontrar los posibles factores para mejorar para lograr una optimización de los procesos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Desarrollar el diagnóstico de la planta de tratamiento de agua potable “La Chica” para la optimización de los procesos de tratado del agua.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar un levantamiento topográfico para la generación de planos la PTAP.
2. Establecer una memoria de cálculo clara de los elementos pertinentes de la planta de tratamiento.
3. Comparar la efectividad de los coagulantes usados actualmente en la PTAP con nuevos coagulantes.
4. Mencionar recomendaciones con respecto al tratamiento de los lodos generados por el lavado de los filtros y floculador/sedimentador.

## **JUSTIFICACIÓN**

El abastecimiento de agua y el saneamiento son elementos fundamentales para la vida, para la comunidad y para un adecuado desarrollo social sostenible en toda región del mundo, ya que influyen directamente en la salud de la población y por tanto en labores productivas específicas.

De esta forma, los beneficios para la salud de los sistemas de agua resultan de una buena calidad y de adecuadas cantidades, de instalaciones adecuadas. Para cierto número de enfermedades transmitidas por el agua, la transmisión ocurre como resultado directo de beber agua contaminada. En otros casos, el ciclo de transmisión ocurre mediante contacto. El agua también proporciona un lugar de procreación para los vectores portadores de enfermedades.

Es así que, la potabilización del agua se hace necesaria como requisito para la salubridad de las personas pertenecientes a una comunidad. Sin embargo, la falta de información de cálculos que muestra la PTAP “La Chica” y la manera cómo ésta está siendo operada, genera que en algunos momentos se presente un inadecuado funcionamiento en su operación y tratamiento para el abastecimiento de agua potable del municipio de Anapoima. Por lo anterior, se hace necesario el estudio, la optimización y adecuación de cada una de los elementos de la PTAP, de manera tal que se pueda llegar a un mejoramiento en la calidad del agua entregada a la comunidad que redunde en el mejoramiento de vida de la comunidad de Anapoima.

Es por esto que se pretende poner en práctica los conocimientos universitarios adquiridos a lo largo de la carrera haciendo uso de las herramientas teóricas y técnicas aprendidas en la distintas ramas de la ingeniería civil para desarrollar un proyecto social aplicable en una de las necesidades fundamentales del ser humano como lo es la

salubridad, de forma que se cumplan los requisitos para optar por el título de ingeniero civil.

## **ALCANCE Y LIMITACIONES**

Si bien la Empresa Regional de Aguas del Tequendama posee diferentes plantas de tratamientos a lo largo de los municipios de La Mesa y Anapoima. Sin embargo, el presente proyecto se enfocará específicamente en realizar el diagnóstico de la PTAP “La Chica”, la cual es una planta compacta con un filtro automático. Dichas plantas, para el caudal manejado, son escasas dentro del territorio nacional, y en la mayoría de los casos la información a sus procedimientos y cálculos de operación son de difícil acceso debido a la renuencia de los diseñadores a compartir la información de su funcionamiento.

Del mismo modo, al tratarse de una planta compacta, se torna difícil observar el funcionamiento individual de cada uno de los elementos que componen el proceso de potabilización, ya que estos se encuentran sumergidos por las aguas tratadas u ocultos tras las láminas del filtro. Por lo anterior, para lograr entender su funcionamiento a cabalidad, el proyecto se basará tanto en la información obtenida por parte de los operarios de la planta como en la literatura disponible sobre diseños genéricos para posteriormente adaptar su dimensionamiento según los parámetros de entrada y salida de cada uno de los elementos.

Debido a lo anterior, este proyecto tendrá un alcance en todos sus objetivos hasta donde la información sea tangible, es decir que se desarrollará en función a la información suministrada por los profesionales que trabajan en la ERAT y con información que se recoge en campo en el tiempo establecido para la obtención de datos y para la elaboración de planos y de sus respectivos cálculos.

De igual manera, la generación de los planos de la PTAP se realizó de manera aproximada, ya que la medición de los elementos que se encuentran dentro del tanque

sedimentador posee una alta dificultad, lo cual no permite una alta precisión en las distancias entre éstos.

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1 Marco Histórico**

Cerca del 30 por ciento de la población campesina en Colombia se encuentra en una situación crítica por la carencia de infraestructura hídrica en sus lugares de residencia, por lo que varios miles de pobladores se ven obligados a caminar extensos trayectos para poder consumir agua cruda proveniente de pozos y ríos, exponiéndose así a múltiples enfermedades debido a la cantidad de microorganismos presentes en estas fuentes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona la existencia de al menos 25 enfermedades que pueden ser provocadas debido a la presencia tanto de virus y bacterias como de componentes químicos presentes en el agua cruda. Remitiéndose específicamente a Colombia, las patologías más frecuentes por esta situación son la hepatitis A, la fiebre tifoidea/paratifoidea y enfermedad diarreica aguda, según las cifras del Instituto Nacional de Salud. Siendo la última de éstas la más crítica, si se tiene en cuenta que esta enfermedad produce más de 100 muertes de menores de 5 años cada año.

Es necesario precisar que existe una gran dificultad de llevar agua a las zonas rurales debido a la falta de mecanismos adecuados y de políticas claras por parte de los gobiernos locales que demuestren una intención real de resolver el y aunque existen estrategias en las que se incorporan soluciones alternativas para el suministro de acueducto, incluyendo tecnologías de instalación sencilla tales como pozos con estaciones de bombeo, fuentes públicas, pozos sépticos y letrinas secas, como ya se recalca, la falta de voluntad para darle la prioridad requerida al problema, tanto de los gobiernos municipales y departamentales como del gobierno central, ha hecho de estas soluciones una tarea de ámbito casi imposible. Y aunque las alternativas propuestas poseen costos menores a los sistemas urbanos y son menos tecnificadas, solo hasta

dentro de 6 años se llegaría a una cobertura de agua potable del 97 en sectores rurales. Lo anterior sin tener en cuenta que para que dicha meta se cumpla se debe hacer efectiva una inversión de 7 billones de pesos, es decir, se debe mostrar una intención política de generar la infraestructura requerida. De igual manera, el viceministerio del agua afirma que ya existe un diagnóstico de los emplazamientos donde no hay cobertura, lo cual es el primer paso para solucionar las problemáticas y superar el reto de garantizar agua potable de calidad en el campo.

Sin embargo, históricamente el problema del agua siempre ha estado latente y en continuo “proceso de solución” sin salida cercana aparente. Las políticas públicas para el abastecimiento de agua potable en el sector rural han sido insuficientes, por no decir inexistentes en algunos casos, desarrollándose con intermitencia, y siendo manejadas con desidia y como un botín electoral por los mandatarios regionales de turno. Un síntoma de esto es que la última política a nivel nacional fue estructurada en el año de 1990 y no fue hasta el año 2012, 22 años después que diseñó una nueva política para nuevamente intentar llevar soluciones a las zonas rurales del país. Ya que los resultados de los últimos 20 años dejan mucho que desear, si se observan las cifras se puede ver que el estado pasó de cubrir el 41 por ciento a tan sólo el 72,8, lo que significa que anualmente solo se le brindó soluciones a un 1,59 por ciento de los habitantes. Si se considera el hecho de que en Colombia hay 12 millones de habitantes que viven en el campo de los cuales 3 millones son considerados eminentemente rurales (que no habitan en cascos urbanos), esta cifra implica que se está dejando sin agua a una población directa del tamaño de la ciudad de Cali. Por otro lado, las regiones, que sí poseen cobertura de agua, adolecen debido a la calidad de la misma. Según un informe del Instituto Nacional de Salud del año 2015 solo el 15,1 por ciento (unos 900.000 habitantes) utiliza agua con las condiciones necesarias para el consumo humano,

mientras que el 43,6 por ciento usó agua con tratamientos deficientes y el 23,3 por ciento usó agua sin ningún tipo de tratamiento, tomada directamente de las fuentes.

En zonas críticas, como en el departamento de La Guajira, han surgido iniciativas internacionales debido a la falta de políticas estatales claras que impulsen a solucionar la problemática del agua, tales como la patrocinada por el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (Unicef), la cual tiene la misión de suministrar el recurso hídrico a las escuelas de Manaure. Por otro lado hay casos que rayan en la ironía debido a sus condiciones geográficas, tal es el caso del municipio de Cisneros, Antioquia, ubicado a 83 kilómetros de Medellín, sobre la vía a Puerto Berrío, es uno de los casos más paradójicos, ya que aun siendo atravesado por 26 quebradas y el río Nus (una de las principales fuentes hídricas de la región), no posee cubrimiento de agua.

Caso totalmente contrario a lo que se ve en el campo ocurre en las ciudades. Cerca del 98% por de los territorios pertenecientes a las urbes poseen cobertura de agua de calidad, indicador impulsada por Bogotá, Cali y Medellín, donde la cobertura y la continuidad son prácticamente totales, con una calidad alta. Sin embargo, a muchos municipios que tienen acueducto no se les garantiza la continuidad en el servicio como es el caso de Anapoima en el municipio de Cundinamarca. En otras palabras, la diferencia de calidad de vida que presenta el país entre sus centros económicos e industriales y sus zonas rurales es abismal, evidenciando una vez más la relevante desigualdad en la que está inmerso el país.

De igual manera, vale la pena resaltar que la región del Pacífico es la más rezagada en sistemas de acueducto y de todas las regiones de Colombia es la única que no alcanza a sobrepasar el 80 por ciento de cobertura en la zona urbana.

## MARCO DE REFERENCIA

### 2.2 Marco Geográfico

El trabajo se desarrolló en el Departamento de Cundinamarca en el municipio de Anapoima, el cual está ubicado al sur occidente de este departamento, donde este pueblo limita con municipios como La Mesa (al norte), Apulo y Viotá (al sur), El Colegio (al oriente) y al occidente con municipios como lo son Jerusalén y Quipile.

La cabecera del municipio de Anapoima se encuentra a una altitud de 710 m sobre el nivel del mar con coordenadas 4°33'01''N y 74°32'10''O según el sistema WGS, a una temperatura media de 28-35 °C, y una precipitación media anual que oscila entre los 1337 mm.”Alcaldía de Anapoima, 2017-2019, Información del municipio, Anapoima, recuperado de: <http://www.anapoimacundinamarca.gov.co>”

La Planta de Tratamiento se encuentra en la vereda la Chica ubicada en la parte alta del municipio que está a 3.5 Km vía Anapoima-La Mesa, con una altitud de 813 m sobre el nivel del mar y coordenadas 4°34'04'' N y 74°30'13''W según el sistema WGS, cómo se logra ver en la Ilustración 1, en donde la planta de tratamiento se encuentra identificada en la imagen por la figura del Street View de color amarillo.



*Ilustración 1 Ubicación de la PTAP (tomado de Google Maps)*

La planta de tratamiento se encuentra sobre la vía La Mesa-Anapoima en el costado izquierdo, en un lote de 6421,6 m<sup>2</sup> el cual está limitado por una malla de acero tal y como se logra ver en la Ilustración 2.



*Ilustración 2 Ingreso a la PTAP (Tomado de Google Maps)*

## **2.3 Marco Conceptual.**

### **Parámetros de las PTAP'S**

Un sistema de abastecimiento de agua potable se compone básicamente por un conjunto de estructuras, entre otras la bocatoma, que permite la captación de agua cruda proveniente de la fuente; la aducción que permite el transporte de agua cruda entre la bocatoma, el desarenador y la PTAP y finalmente la conducción que corresponde al

transporte y distribución del agua tratada (potable). Una PTAP es, a su vez, un conjunto de estructuras en las cuales se llevan a cabo operaciones y procesos unitarios con el fin de remover sustancias indeseables para garantizar que el agua sea inocua para el ser humano, es decir que se transforme en agua potable. Estas operaciones y procesos son principalmente coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

### ***Sustancias presentes en el agua***

En el agua se encuentran presentes sustancias que de acuerdo a su tamaño pueden ser disueltas, coloidales o suspendidas. En general se clasifican como a continuación se describe.

#### ***Partículas disueltas:***

Son aquellas partículas presentes en el agua como iones o átomos. Para su eliminación se utiliza el proceso de intercambio iónico, también osmosis inversa, o electrodiálisis entre otros. Su tamaño generalmente es menor a una milimicra.

#### ***Partículas coloidales:***

Los coloides son del tipo de sustancias que más abundantes en el agua cruda o sin tratamiento. En el agua forman dispersiones, y de acuerdo al tipo de dispersión existen ocho formas, según la fase dispersa y la fase dispersante. Para el tema del tratamiento de agua la dispersión que interesa es la de sólido en líquido, que es la que forma gran parte de la turbiedad y el color en el agua, y de acuerdo a la relación con el solvente, los coloides pueden ser liofílicos, si son afines con el agua o liofóbicos, que no tienen afinidad con el agua y por eso son bastante inestables.

#### ***Partículas suspendidas:***

Son aquellas partículas de mayor tamaño ( $d > 1\mu\text{m}$ ) que están comúnmente asociadas con la turbiedad del agua. Una fracción de las mismas son removibles por

sedimentación pero otras requieren la adición de sustancias coagulantes para propiciar su aglutinamiento.

### **Dotaciones y Caudales de Diseño según Norma**

La legislación colombiana (resolución 0330 de 2017) establece criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos unitarios involucrados en la conceptualización, diseño y la construcción, entre otros, de plantas de tratamiento de agua potable en el territorio nacional. La resolución 0330 de 2017 es una guía para los diseñadores, que no desconoce en ningún momento la literatura en cuando a la conceptualización de dichos sistemas, pero si ofrece un punto de partida para el diseño de estos procesos, especialmente en municipios en donde no se cuenta con información suficiente para establecer las demandas de la población, que es en últimas el parámetro que define el tamaño o capacidad de las estructuras a diseñar.

### ***Nivel de complejidad del sistema***

Según la resolución 0330 de 2017, hay que establecer inicialmente el nivel de complejidad, que depende del número de habitantes en el área urbana del municipio, su capacidad económica y el grado de exigencia técnica que se requiera para el manejo del sistema, según lo establecido en la Tabla -1.

*Tabla -1 Asignación del nivel de complejidad (RAS 2000, Titulo A)*

<b>NIVEL DE COMPLEJIDAD</b>	<b>POBLACIÓN URBANA</b>	<b>CAPACIDAD ECONÓMICA</b>
<b>BAJO</b>	<2500	BAJA
<b>MEDIO</b>	2501 A 12500	BAJA
<b>MEDIO ALTO</b>	12501 A 60000	MEDIA
<b>ALTO</b>	>60000	ALTA

### ***Dotación neta***

La dotación neta corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto.

Dotación neta mínima y máxima.

En la Resolución 0330 de 2017, la dotación neta mínima y máxima depende del nivel de complejidad del sistema y sus valores se establecen como se muestra en la

Tabla 2

<b>NIVEL DE COMPLEJIDAD</b>	<b>DOTACIÓN NETA MIN.</b>	<b>DOTACIÓN NETA MÁX.</b>
<b>BAJO</b>	100	150
<b>MEDIO</b>	120	175
<b>MEDIO ALTO</b>	130	-
<b>ALTO</b>	150	-

*Tabla 2 Dotación neta según nivel de complejidad (Resolución 0330 de 2017, Título B)*

### ***Dotación neta máxima***

Según la resolución 2320 de 2009, que modificó parcialmente algunos parámetros de la resolución 0330 de 2017, las dotaciones para la determinación de la demanda de agua se realizarán con datos de consumo histórico confiables para el municipio o distrito. La dotación neta máxima a utilizar en el diseño de un nuevo sistema de acueducto o la ampliación del sistema existente debe basarse en dichos datos. En caso de no existir este tipo de información la dotación neta máxima calculada no deberá superar los valores establecidos en la Tabla3, dependiendo del nivel de complejidad del sistema.

Tabla3 Dotación neta máxima según nivel de complejidad (Resolución 0330 de 2017)

<b>NIVEL DE COMPLEJIDAD</b>	<b>DOTACIÓN NETA MAX. CLIMA FRIO</b>	<b>DOTACIÓN NETA MÁX. CLIMA CALIDO</b>
<b>BAJO</b>	90	100
<b>MEDIO</b>	115	125
<b>MEDIO ALTO</b>	125	135
<b>ALTO</b>	140	150

### ***Dotación Bruta***

Es la cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante considerando para su cálculo el porcentaje de pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto. La dotación bruta para el diseño de cada uno de los componentes que conforman un sistema de acueducto, indistintamente del nivel de complejidad, se debe calcular conforme a la

*Ecuación 1 Dotación Bruta (Resolución 0330 de 2017, art 44)*

$$Db = \left( \frac{Dn}{1 - \%P} \right)$$

*Donde:*

*Db=Dotación bruta*

*Dn=Dotación neta*

*%P: Pérdidas técnica máximas admisibles*

Las pérdidas técnicas corresponden a la diferencia entre el volumen de agua tratada y medida a la salida de la planta potabilizadora y el volumen entregado a la población medido en las acometidas domiciliarias del municipio. En la Resolución 0330 de 2017, se establece que para los municipios que no cuenten con registros sobre pérdidas de agua en el sistema de acueducto, el porcentaje de pérdidas técnicas admisibles depende del nivel de complejidad del sistema, tal como se establece en la Tabla 4.

Tabla 4 Porcentajes Máximos admisibles de pérdidas Técnicas (Resolución 0330 de 2017, Art 44)

<b>NIVEL DE COMPLEJIDAD</b>	<b>PORCENTAJES MÁX. ADM. DE PÉRDIDAS</b>
<b>BAJO</b>	40
<b>MEDIO</b>	30
<b>MEDIO ALTO</b>	25
<b>ALTO</b>	20

Con los valores de dotación neta, y de porcentaje de pérdidas técnicas admisibles en el sistema, se definen los parámetros de diseño de las estructuras que componen los sistemas de abastecimiento de agua, como las plantas de potabilización. Según el IDEAM (2010) en Colombia, de acuerdo con la condición económica, el consumo básico es del orden de 20 m<sup>3</sup> / suscriptor – mes, lo que equivale a 110 l/hab-día. Esto se considera como un consumo alto, comparado con los valores establecidos por la Organización Mundial de la salud OMS (2003), en donde determina que el consumo básico debe ser de 100 l/hab-día.

## **Procesos Unitarios**

### ***Coagulación***

Los propósitos de la coagulación son:

- Remover turbiedad orgánica e inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remover color verdadero y aparente.
- Eliminar bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser removidos por coagulación.
- Destruir algas y plancton en general.

- Eliminar sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos, entre otros.

### ***Tipos de coagulantes:***

Existen coagulantes metálicos como las sales de aluminio y de hierro, y coagulantes orgánicos que pueden ser catiónicos, iónicos o polímeros no iónicos. Se pueden clasificar en dos grupos: los poli electrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos:

- Coagulantes poliméricos. Son polímeros aniónicos, catiónicos o neutros, de alto peso molecular que se aplican en pequeñas concentraciones (0.01 a 1.0 mg/l), lo que compensa parcialmente su alto precio. La razón por la cual se usan tan bajas dosis está en la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen.
- Coagulantes metálicos. Existe una gran variedad de este tipo de coagulantes, los cuales se pueden clasificar como: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. Las sales de aluminio forman un floculo ligeramente pesado y son las más comunes como el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de poli aluminio. El más utilizado en las plantas de tratamiento es el sulfato de aluminio (alumbre) por su bajo costo y su manejo relativamente sencillo.

### ***Factores que afectan la coagulación:***

- Dosis de coagulante
- pH.
- Concentración de coloides o turbiedad.
- Color o concentración de sustancias orgánicas en el agua Aniones o cationes presentes en el agua

- Intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta.
- Movilidad electroforética de las partículas.
- Temperatura del agua

La dosis de coagulante depende del pH terminal del agua y de la turbiedad de la misma. Por ejemplo, las aguas más difíciles de coagular son las que tienen bajas concentraciones de coloides (turbiedades menores de 20 UNT), debidas a color o no. Existe, además, una importante influencia del pH en la coagulación del agua. También la concentración de iones de hidrógeno de la mezcla final de agua y sulfato de aluminio es de fundamental importancia para la formación del floculo. Esta íntima relación se debe a que en todas las reacciones entre el  $[Al(H_2O)_6]^{+++}$  y el agua, los iones  $H^+$  y  $OH^-$  están involucrados y por tanto dichas reacciones serán dependientes del pH. En la reacción del  $Al_{(III)}$  con la alcalinidad, la disminución del pH es mucho más lenta que en la reacción del  $Al_{(III)}$  con la molécula de agua. La alcalinidad actúa como una solución amortiguadora que evita el cambio brusco del pH. Para cada turbiedad existe una dosis óptima de coagulante que es con la cual se obtiene la turbiedad residual más baja. En caso de turbiedades muy altas se recomienda realizar pre-sedimentación.

### ***Dosificación***

En la dosificación es de gran importancia la determinación de coagulante y la dosis optima en mg/l, en donde los coagulantes deben de cumplir con las características mencionadas por el RAS en el titulo C.4.4, en este proceso de dosificación también se pueden añadir productos auxiliares si en laboratorio se menciona que es conveniente ya sea para lograr un pH óptimo de coagulación.

En cuanto a las unidades de dosificación se implementan de acuerdo con las características de los productos químicos:

1. Dosificadores en seco, es la aplicación de sustancias químicas en forma de polvo, en donde los dosificadores son:
  - Volumétricos, en este tipo de dosificadores se debe determinar el volumen de material que se liberara en una superficie en una velocidad constante, entre este tipo de dosificadores están el disco giratorio, de tornillo, etc.
  - Gravimétricos, en este tipo de dosificador se debe de medir el peso del material, en donde se va a dar la pérdida de más constante del material depositado en la tolva, los más usados son la correa transportadora y la de pérdida de peso.

Para el uso de este tipo de dosificadores se deben de tener en cuenta los siguientes pasos:

- a. Los productos dosificados en seco deben ser disueltos en agua antes de su aplicación.
  - b. Debe preverse de tolvas de acumulación.
2. Dosificadores en solución, Deben de usarse para dosificar vía húmeda o para dosificar líquidos, y pueden ser por:
    - Sistemas por bombeo, se pueden usar dos tipos de bomba: de diafragma y de pistón, la primera se usa en productos abrasivos o corrosivos y es accionada hidráulicamente en cambio la de pistón es más precisa pero no se recomienda con productos como los que se mencionó anteriormente.
    - Sistemas por gravedad, en este caso existen dos tipos uno de carga constante y otro de carga variable, en el primero se va tener un caudal de dosificación constante, el cual se regula con una válvula que se encuentra a la salida; se recomienda para niveles de complejidad bajo usar un solo tanque para la solución, dosificación y para la medida, en los otros niveles si se debe de usar un tanque aparte para cada uno de estos.

Parámetros:

Los parámetros que se exigen para escoger el tipo de dosificador son: niveles de complejidad, tipo de coagulantes y sus efectos de corrosión, así como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 5. Tipo de dosificador y material con los coagulantes (VALDÉZ, E. C. Abastecimiento de Agua Potable.)*

<b>COAGULANTE</b>	<b>TIP. DE DOSIF.</b>	<b>MATERIAL</b>	
		TUBERIAS	TANQUES
<b>SULFATO DE ALUMINIO</b>	EN SECO O EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, PVC, PLÁSTICO	CONCRETO REVESTIDO CON PINTURA EPOXICA
<b>CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN</b>	EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, PLÁSTICO	PLÁSTICO
<b>CLORURO FÉRRICO EN CRISTALES</b>	EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, PVC, PLÁSTICO	ACERO INOX.
<b>CLORURO FÉRRICO EN ANHIDRICO</b>	CAUHO, PLÁSTICO	CAUCHO, PLÁSTICO	
<b>SULFATO FÉRRICO</b>	EN SECO O EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, PVC, PLÁSTICO	CONCRETO REVESTIDO, ACERO INOX.
<b>SULFATO FERROSO</b>	EN SECO O EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, PVC, PLÁSTICO	CONCRETO REVESTIDO, ACERO INOX.
<b>ALUMINATO DE AI</b>	EN SECO O EN SOLUCIÓN CON TANQUES	CAUCHO, HIERRO, PLÁSTICO	HIERRO, CONCRETO, ACERO INOX.

### ***Mezcla Rápida***

En plantas de purificación la mezcla rápida tiene como objetivo de dispersar de forma rápida y uniforme el coagulante a través de toda la masa de flujo de agua, en donde este tipo de mezcla se puede dar por medio de turbulencias producidas por resaltos hidráulicos que la pueden producir distintas unidades como lo son canaletas

Parshall o vertederos, aunque también puede darse por dispositivos mecánicos conformados por hélices en donde su velocidad angular es elevada.

Para que esto ocurra en los sistemas hidráulicos con lo que se trabaja es con los regímenes de flujo por lo que no es necesario de mecanismos en cambio en los mezcladores mecánicos se hace uso de motores, embragues, paletas que hacen una mezcla inducida en sentido rotacional. Para el empleo de cualquier tipo de estos mezcladores el RAS recomienda tener en cuenta el nivel de complejidad, ya que para el caso de niveles de baja y media complejidad se dice que la mejor opción es de un vertedero tipo hidráulico.

En cuanto a los mezcladores hidráulicos se tiene:

- Resalto hidráulico, este tipo de mezcla se puede realizar cuando exista suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada.
- Difusores, es un tubo perforado en donde se puede hacer uso de mezclador rápido si la mezcla es uniforme en la sección transversal y su limpieza se puede hacer de forma periódica.
- Vertederos, son usados en los niveles bajo y medio de complejidad en donde el coagulante se aplica a través de la longitud del vertedero y tiene la ventaja de que puede servir como aforo.
- Mezclador estático de inserción, este es insertado dentro del tubo, el material con el que es diseñado este tipo de mezclador debe de ser resistente a la corrosión.

En cuanto a los mezcladores estáticos, pueden diseñarse de sección circular o cuadrada.

La entrada del agua de este tipo de mezcladores es por la parte inferior del tanque y la salida por la parte superior.

## Parámetros

Los parámetros de la mezcla rápida, están identificados por el tipo de mezclador, así que para esto se tiene:

Tabla 6. Parámetros de mezcladores rápidos (Resolución 0330 de 2017, Art. 112)

<b>Tipo de mezclador</b>	<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Punto de aplicación</b>
<b>Resalto hidráulico (Parshall)</b>	Vel. mínima en garganta > 2 m/s Vel. mínima del efluente > 0,75 m/s  El resalto no debe ser oscilante  #F no debe de estar entre 2,5 y 4,5  #F debe estar entre 1,7 – 2,5 o 4,5 – 9  Ha/w debe estar entre 0,4 y 0,8  Debe de disponerse de un dispositivo aguas abajo con el fin de controlar la posición del resalto.	En el punto de mayor turbulencia
<b>Difusores de tubo perforado</b>	Espacio entre orificios $\leq 0,1$ m Diámetro del orificio $\leq 3$ mm Vel. a través del orificio = 3 m/s	Por todos los orificios que se desarrollen, es decir que entre más orificios mayor eficiencia tendrá
<b>Vertederos</b>	Se deben de emplear sectores dentados para fijar el resalto en un solo punto.	A través de la longitud del vertedero
<b>Mezcladores estáticos de inserción</b>	El gradiente de velocidad debe de ser suficiente para lograr la mezcla uniforme	En la inserción con el tubo

<b>Mezcladores mecánicos</b>	Tiempo de retención < 60 s G entre 500 s <sup>-1</sup> y 2000 s <sup>-1</sup> . Se debe de contar con más de 1 unidad	Se deben de adicionar en la parte inferior de la turbina
------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

---

### ***Mezcla Lenta***

En este proceso se realiza una aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculantes, es decir que en este proceso sucede algo similar cuando hay gotas en el panorámico de un carro y por gravedad comienza ascender una gota “la más grande”, y comienza a unirse con otras y tomando gran tamaño y así decantándose más rápido, esto es lo que se quiere en la mezcla lenta que partículas coloidales se unan a otras tomando gran peso y lograr el retiro de estas mediante el proceso de sedimentación.

Este proceso va inmediatamente después de la mezcla rápida, ya que la coagulación hace que las partículas coloidales modifiquen su electronegatividad haciendo que lo siguiente que se necesite es una mezcla lenta en donde se permita la unión de estas, en donde las exigencias de un floculador para que cumpla con un funcionamiento adecuado son:

- El gradiente de velocidad debe ser el adecuado para que el floc se forme y no se destruya.
- El tiempo de floculación con respecto al de coagulación debe de ser inmediata.
- Los tiempos de retención no deben de ser tan largos para evitar la rotura del floc.
- La agitación se debe de ir disminuyendo lentamente desde el inicio del proceso.

Tabla 7 Criterios de diseño para mezcladores lentos (Resolución 0330 de 2017, Art. 112)

<b>FLOCULADORES HIDRÁULICOS</b>				
<b>AUTOR</b>	<b>t</b> (min)	<b>G (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Vel. "(m/s)</b>	<b>Pérdidas (m)</b>
<b>Arboleda</b>	10_80	20__74	0,15-0,4	
<b>Romero</b>	10_60	20__100	0,15-0,50	0,4-0,5
<b>Steel</b>	30_60	20__74		
<b>Lauro A</b>			0,25-0,45	
<b>RAS</b>	20_30	20__70	0,2-0,6	
<b>Silva</b>	20_50		0,15-0,45	

El control de los procesos se da en el RAS 2000 título C los cuales se describen en los siguientes numerales:

- Debe de verificarse la mezcla lenta y la dosificación.
- Debe de mantenerse el gradiente medio óptimo, por medio de la diferencia de niveles entre la entrada y salida.
- Debe de establecerse el tiempo de contacto en la unidad sea el suficiente para la formación del floc.
- Debe de determinarse el tamaño del floc al final del proceso y la turbiedad residual.

### ***Sedimentación***

Se denomina sedimentación al proceso por el cual se remueven partículas por efectos de la gravedad, en la sedimentación que se hace después de la mezcla rápida y lenta, se hace la remoción de color y turbiedad o ablandamiento.

La unidad que produce la sedimentación debe de tener los siguientes componentes:

- Dispositivo de recolección del agua sedimentada, tubos perforados sumergidos, canaletas o vertederos no ahogados (se debe de garantizar un caudal uniforme).
- Acceso a la unidad, escaleras para el acceder al fondo de la unidad.
- Sedimentador; de flujo horizontal, de flujo vertical, de alta tasa o con manto de lodos.

### Parámetros

Tabla 8 Criterios de diseño para sedimentadores (Resolución 0330 de 2017, Art. 130)

<b>Sedimentador</b>	<b>T. R. H. (h)</b>	<b>C. S. (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.di a)</b>	<b>Vel. de flujo (cm/s)</b>	<b>A. del agua (m)</b>	<b>Pend. (%)</b>	<b>Relación de dim.</b>	<b>Reynold</b>
<b>Flujo horizontal</b>	2--4	15—30	1	4--5	2	A:L->1:4- :8 L:P->5:1- 25:1	
<b>Ascendente</b>	2--4	20--30—60		4--5		D<40	
<b>Alta tasa</b>	1/6--1/4	120-185 P. angosta 200--300 P. profunda		4--5.5			< 500 se aconseja < 250

En cuanto al control de los procesos, se debe de garantizar una adecuada distribución del caudal, evitando cambios bruscos, aunque para cada tipo de sedimentador existen recomendaciones específicas, las más generales son:

- Comprobar si por el efluente hay salida de flóculos.
- Retirar el material flotante en el decantador por medio de una espumadera.
- Verificar si hay desprendimientos de burbujas de aire.
- Cuando el nivel de lodos llegue a su tope se debe de drenar la unidad.

### ***Clarificador por manto de lodos.***

Los clarificadores de lodos son sistemas de tratamiento de agua no convencionales los cuales reúnen los procesos de mezcla rápida, floculación y sedimentación en una unidad compacta, son sistemas de tratamientos económicos y con una efectividad alta. Sin embargo son de poco uso en Colombia debido a que se han estudiado muy poco.

Willz, Castro y Correa, hacen la prueba con dos tipos de agua, a las cuales le agregaron distintas cantidades de caolín para así tener dos turbiedades de agua diferentes; una con 100 NTU y la otra con 15 NTU, muestras a las cuales se les tubo que ajustar la alcalinidad a 80 mg CaCO<sub>3</sub>/L con bicarbonato de Sodio, y así garantizar una apropiada coagulación y floculación. Los coagulantes usados para la respectiva prueba fueron Sulfato de aluminio liquido tipo B y polímero catiónico C-235, y se usan dosis optimas de 60 mg/l.

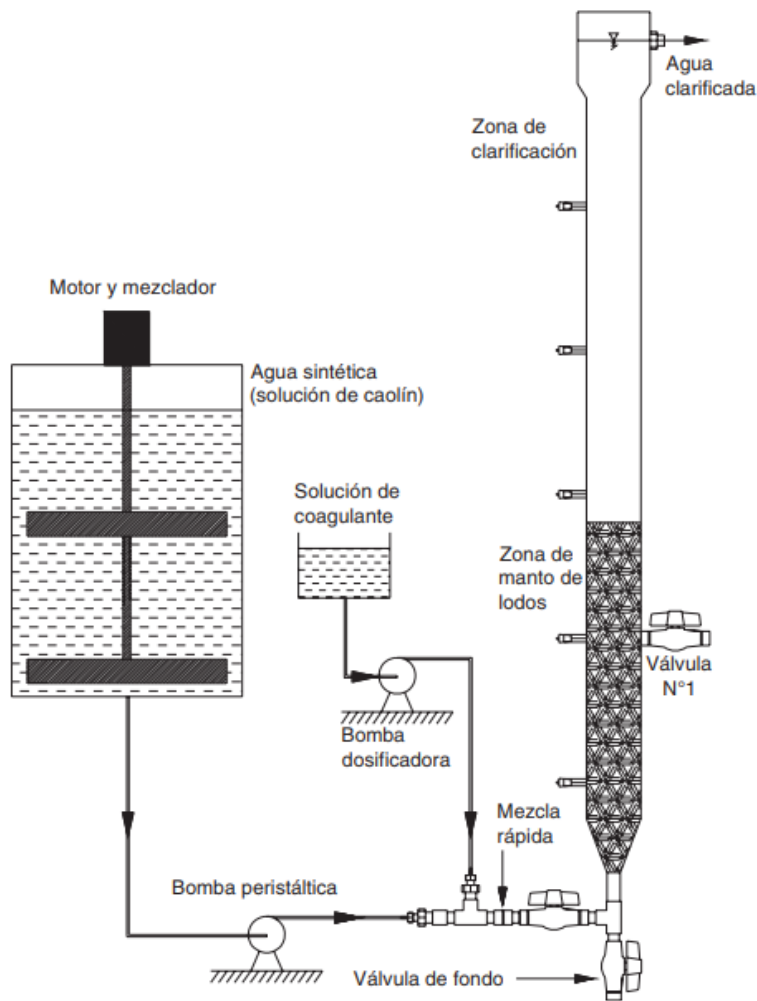
En cuanto al diseño experimental del clarificador se aplicó una escala de 2<sup>3</sup> en donde se realizaron 16 ensayos, en donde los parámetros que se tenían fueron:

- Tasa Superficial: 35 y 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día

- Tipo de agua (Tipo 1 y Tipo 2)
- Coagulantes empleados (Sulfato de aluminio, polímero C-235)

Lo que se quiso demostrar en este artículo fue la eficiencia variando los parámetros anteriormente mencionados, eficiencia que se media con el porcentaje de remoción de turbiedad.

De acuerdo al parámetro de tasa superficial ellos dan a conocer los tiempos de retención hidráulicos que para una CS de  $35 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  es un TRH 42.7 min, mientras que para una CS de  $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  es de 21.9 min. Cada ensayo tuvo una duración de 36 horas y en donde los resultados se basaron en calculo promedio de la remoción de las últimas tres horas y con muestras sin agregarle coagulante para ver qué porcentaje de partículas se sedimentaban.



*Ilustración 3 Clarificador de Lodos (Tomado de Wills, Castro, Correa)*

Según los resultados obtenidos por Wills, Castro y Correa, se dan cuenta que las variables que más influyen en el proceso de clarificación del agua es la carga superficial y la turbiedad del agua, el ensayo más efectivo fue en el que se usó una carga superficial de  $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$  y el agua tipo 2 con polímero.

Parámetros

Según el RAS 2000 título C, los criterios básicos son:

Tabla 9 Criterios de diseño para manto de lodos 8 Resolución (0330 de 2017, Art. 125)

<b>Tipo</b>	<b>T. de retención (h)</b>	<b>Vel. De flujo (m/día)</b>	<b>A. Del tanque (m)</b>	<b>A. del manto (m)</b>	<b>Concentración del manto (%)</b>
<b>Manto de Lodos</b>	1 – 1,5	30 -- 60	4 –7	1 -- 3	10 – 20

### **Filtración**

La filtración es un proceso en el cual se busca clarificar el agua mediante la retención de partículas de turbidez que no se pudieron eliminar en los procesos anteriores, para lograr esto se cuenta con unas capas granulares que no dejan pasar las partículas.

El lecho anteriormente mencionado puede funcionar de tres maneras diferentes:

- Como soporte de microorganismo con velocidades bajas.
- Mediante el fenómeno de adsorción debido a las cargas eléctricas de las partículas.
- Por retención mecánica

Para el diseño de un filtro se deben de tener en cuenta como se resume en el cuadro 6.1 de Jairo Romero “Purificación del agua”:

Tabla 10. Variables en el diseño de filtros (Tomado de Romero)

<b>Variables</b>	<b>Significado</b>
<b>Características del medio filtrante</b>	Afecta la remoción de partículas y el incremento en pérdida de carga
<b>Porosidad del medio filtrante</b>	Determina la cantidad de sólidos que pueden almacenarse en el filtro
<b>Profundidad del lecho filtrante</b>	Afecta la pérdida de carga y la duración de la carrera
<b>Tasa de filtración</b>	Determina el área requerida y la pérdida de carga, afecta la cantidad del efluente
<b>Perdida de carga disponible</b>	Variable de diseño
<b>Características del afluente</b>	Afecta las características de remoción del filtro

En este tipo de unidad es necesario desarrollar una clasificación de estos, ya que dependiendo del tipo van a depender cada una de las variables anteriormente mencionadas, este proceso se puede clasificar por filtración lenta y filtración rápida.

- Filtración lenta, son filtros empleados para plantas de caudales relativamente bajos, con áreas muy grandes y para el manejo de turbiedades menores a 40 unidades; el material filtrante consiste en una capa de arena de 1m y una rata de filtración entre  $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  y  $9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ .
- Filtración rápida, las ratas de filtración para este tipo de filtros depende del material filtrante, es decir que para arenas hay una rata de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  y para

antracitas de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , se deben de usar lechos de sostén para evitar la pérdida de material.

### ***Filtros rápidos***

Para el caso de la PTAP la Chica existe un lavado de filtros automático, el cual se explica en el libro de Luis Felipe Silva “*Diseño de plantas de purificación de aguas*”, explica el principio del funcionamiento de los filtros de la siguiente forma:

1. El agua procede desde el sedimentador, desciende por el tubo CD y penetra al compartimiento del filtro en el punto G, este espacio está separado por una campana metálica AB.
2. El agua desciende por el lecho filtrante y las placas porosas hasta la parte inferior del tanque de filtración.
3. El agua comienza ascender por el tubo y-x hasta el compartimiento superior.
4. El agua sale por el tubo k para desarrollar la respectiva desinfección.
5. Recién efectuado el lavado de la unidad el agua dentro del tubo CD se encuentra en L, la diferencia entre los niveles L y M se debe a las pérdidas por el lecho filtrante.
6. A medida que el filtro se va colmatando las pérdidas van aumentando así como la diferencia entre L y M, es decir que el sifón va a comenzar a llenarse hasta tal punto que comience hacer una succión y arrastre el agua desde el depósito superior por lo que el material se expande liberando las partículas retenidas.
7. Cuando se produce este lavado el agua fluye de forma descendente por los tubos y-x, el agua en el depósito baja hasta el punto N, en donde al llegar allí se permitirá la entrada de aire y así se descebe el sifón.



## *Desinfección*

### Cloración

Es el proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas:

- Destruye los organismos patógenos del agua en condiciones ambientales y en un tiempo corto.
- Es de fácil aplicación, manejo sencillo y bajo costo.
- La determinación de su concentración en el agua es sencilla y de bajo costo.
- En las dosis utilizadas en la desinfección de las aguas, no constituye riesgo para el hombre ni para los animales.
- Deja un efecto residual que protege el agua de una posterior contaminación en la red de distribución.

Tiene en cambio las siguientes desventajas:

- Es muy corrosivo.
- En algunos casos puede formar subproductos posiblemente peligrosos para la salud.
- Puede producir sabor desagradable en el agua, incluso en concentraciones que no significan riesgo para el consumidor.
- Su manejo y almacenamiento requiere ciertas normas de seguridad, para evitar riesgos en la salud de los operadores.

### Curva de demanda de cloro

El cálculo de la dosis necesaria para una efectiva cloración se hace mediante una prueba de laboratorio que consiste en determinar el punto de quiebre. Esto se logra

construyendo una gráfica de dosis de Cloro vs Cloro residual. Esta curva tiene una forma ondulada en la que se observa que inicialmente al ir incrementando la dosis del Cloro va aumentando el residual (en proporción directa menos lo que se consume en demanda) hasta llegar a un punto en que la curva empieza a descender, y a mayor cantidad de Cloro aplicado se obtiene menor residual. En la Ilustración 5 se puede observar la gráfica de dosis de Cloro vs Cloro residual (CEPIS, 2004).

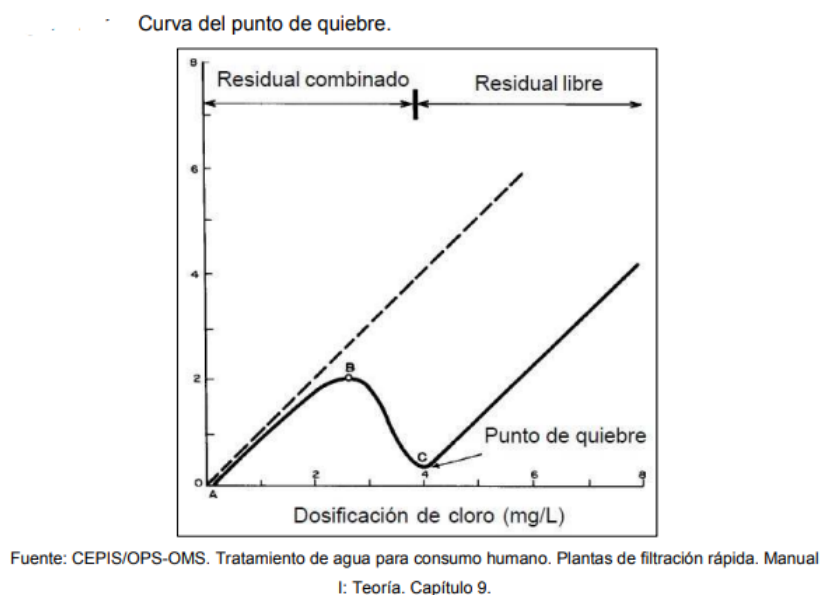


Ilustración 5 Curva del punto de quiebre (CEPIS-OMS, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida)

El Cloro total disponible se da como una función de la dosis de Cloro y se define como la suma del Cloro libre y del Cloro combinado. El residual de Cloro libre disponible es la suma de ácido hipocloroso (HOCl) y del ion hipoclorito (OCl<sup>-</sup>), expresado como mg.Cl<sub>2</sub>/L. El residual de Cloro combinado es la suma de las monocloramias (NH<sub>2</sub>Cl), de las dicloraminas (NHCl<sub>2</sub>) y de las tricloraminas (NCl<sub>3</sub>), expresada como mg.Cl<sub>2</sub>/L.

Por lo anterior, en el tratamiento del agua, cuando el Cloro es el único desinfectante aplicado y cuando las aguas están muy contaminadas, se recomienda la

cloración al punto de quiebre, lo cual significa que la dosis de Cloro aplicada es suficiente para superar ese punto y, por lo tanto, ha sido oxidado todo el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) presente, con un residual de  $\text{HOCl}$ , de  $\text{OCl}^-$  o una combinación de ambos según sea el pH del agua. EL análisis de la curva de demanda de Cloro permite hacer las observaciones siguientes:

- A-B: El Cloro reacciona inicialmente con los agentes reductores presentes y no forma un residual detectable. La dosis de Cloro en el punto B representa la cantidad de Cloro requerida para satisfacer la demanda ejercida por los agentes reductores del agua.

- B-C: Una vez satisfecha la demanda ejercida por los agentes reductores o demanda inmediata de Cloro, este reacciona con todo el amoníaco y las aminas orgánicas presentes para formar un residual de Cloro combinado. Cuando todo el amoníaco y las aminas orgánicas han reaccionado con el Cloro, empieza a formarse un residual de Cloro libre. Aún a cierta concentración crítica, punto C, la concentración de Cloro libre es lo suficientemente alta como para oxidar las cloraminas.

- C-D: Oxidación de cloraminas:  $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{NHCl}_2 + \text{HOCl} = \text{N}_2\text{O} + 4\text{HCl}$  La destrucción de las cloraminas reduce el Cloro residual y es acompañada por la formación de óxido nitroso, nitrógeno y tricloruro de nitrógeno.

- D: Una vez completa la oxidación de los compuestos susceptibles de ser oxidados por Cloro; todo el Cloro agregado desarrolla un residual de Cloro libre. El punto D, en el cual la oxidación de los productos del amoníaco es completa, se conoce como punto de quiebre. El punto de quiebre ocurre, teóricamente, en una relación  $\text{Cl}_2/\text{NH}_3 = 2/1$ . En la práctica dicha relación tiene un valor cercano a 10/1. La cantidad de Cloro necesaria para obtener un residual determinado, después de un tiempo de contacto específico, es un parámetro muy importante en el diseño de plantas de purificación y

tratamiento de aguas. La determinación de la demanda de Cloro permite cuantificar el número y la capacidad de los cloradores requeridos para la desinfección del agua, así como para decidir el tipo de agente desinfectante, recipientes, cantidades de Cloro, etc.  
→Demanda de Cloro = dosis de Cloro - cloro residual.

Evidentemente, la demanda de Cloro varía para diferentes aguas; aún para la misma agua depende de la dosis de Cloro aplicada, de la magnitud y tipo de residual deseado, del tiempo de contacto, del pH y de la temperatura. En general, a mayor tiempo de contacto y mayor temperatura del agua, más efectiva es la desinfección; por el contrario, a pH alto disminuye la concentración de ácido hipocloroso y por consiguiente disminuye la efectividad de la cloración.

#### **2.4 Marco Económico-Social**

Anapoima es un municipio con un atractivo turístico alto debido a que es considerada una población con el mejor clima, según el diario “LA ECONOMÍA”; invertir en Anapoima es una opción con rentabilidad más alta que en Bogotá debido a la valoración de condominios como Altos de Komula, además de esto se está desarrollando un tercer carril para facilitar el acceso desde la capital del país lo que motiva a inversionistas a desarrollar proyectos en este municipio.

Además del desarrollo hotelero y turístico del municipio gran parte de sus habitantes se dedican a la industria en un 10,3% según el censo del 2005, en donde esta se desarrolla en torno a la parte agrícola, como lo son la “Asociación de fruticultores de Anapoima E.A.T.-’AFA’”, “Cooperativa de fruticulturas de Anapoima ‘COOFRUTANA’”, “Alimentos ZERES S.A.S”, etc., son empresas dedicadas a la producción y comercialización de frutas, panela, etc., en donde se aumenta la posibilidad de empleo y así hacer de este un municipio atractivo para vivir en él, tal

como se logra ver en el censo del 2005 por parte del DANE, como se observa en la Ilustración 1 de “DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN SEGÚN LUGAR DE NACIMIENTO”, se evidencia que el 57,4% de la población de Anapoima nació en otro municipio, es decir que la población flotante en este tipo de municipio es considerable, ya que se obtendrá población por parte turística y de traslado de municipio debido a las oportunidades de trabajo que en este se presenta y más aun con el desarrollo que se está dando.

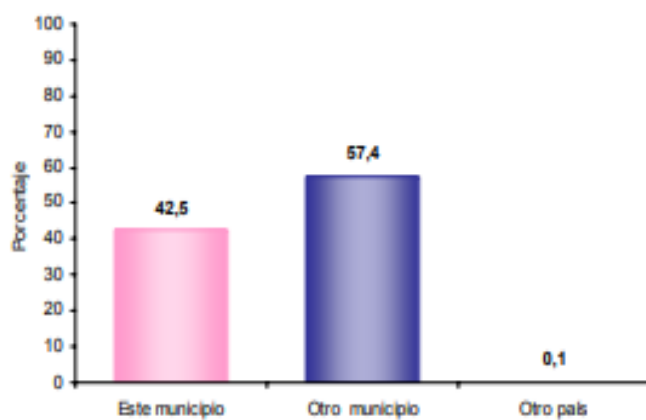


Ilustración 6 Distribución de la población según lugar de nacimiento (DANE, Censo 2005)

Anapoima es un municipio con una tasa de crecimiento de población moderada, pero debido al turismo que se ha presentado los últimos años en el municipio la población flotante es considerable para cualquier tipo de diseño del servicio de agua potable.

Según el censo desarrollado en el 2005 por el DANE, la población total entre el casco urbano y rural era de 11503 habitantes además en la Ilustración 7 de “HOGARES SEGÚN NÚMERO DE PERSONAS”, se menciona que aproximadamente en el 78,8% de los hogares de Anapoima tiene 4 o menos personas.



Aproximadamente el 78,7% de los hogares de Anapoima tiene 4 o menos personas.

*Ilustración 7 Hogares según número de personas (DANE, Censo 2005)*

### 2.4.1 Proyecciones de Población

Basado en lo anterior el DANE desarrolla censos para la cuantificación del número de personas que habitan una zona del país, además de esto desarrollan proyecciones poblacionales con el fin de realizar un Plan de desarrollo o también ser usadas para proyectos que afecta directamente a la población como lo es un acueducto, una PTAP, un Colegio, etc., para dichas proyecciones se trabaja con una “FICHA METODOLÓGICA”, en donde se explica que estas proyecciones se realizan con los datos de los censos ajustados y con un análisis de las variables de comportamiento demográfico dando así una hipótesis y un comentario de los resultados obtenidos, el objetivo de la ficha metodológica es “producir información acerca de los cambios esperados en el crecimiento, tamaño, composición y distribución de la población, a partir de supuestos sobre la probable evolución” (DANE 2005)”, claro está que para la determinación de cada uno de los factores se usan índices y tasas para ser más acertados en las proyecciones. En la siguiente tabla se muestra el año y la proyección desarrollada por el DANE hasta el año 2020, aunque se hace una regresión lineal para llevar la proyección hasta el año 2043, y así poder observar en el presente proyecto cuál será la demanda por la comunidad para ese año.

Tabla 11 Proyección de la población de Anapoima

POBLACIÓN			
AÑO	DANE	GEOMÉTRICO	LINEAL
2018	5978.28	5948	5978.28
2019	6065.74	6043	6065.74
2020	6153.2	6140	6153.2
2021	6240.66	6238	6240.66
2022	6328.12	6338	6328.12
2023	6415.58	6439	6415.58
2024	6503.04	6542	6503.04
2025	6590.5	6646	6590.5
2026	6677.96	6752	6677.96
2027	6765.42	6860	6765.42
2028	6852.88	6970	6852.88
2029	6940.34	7081	6940.34
2030	7027.8	7194	7027.8
2031	7115.26	7309	7115.26
2032	7202.72	7426	7202.72
2033	7290.18	7544	7290.18
2034	7377.64	7665	7377.64
2035	7465.1	7787	7465.1
2036	7552.56	7911	7552.56
2037	7640.02	8038	7640.02
2038	7727.48	8166	7727.48
2039	7814.94	8296	7814.94
2040	7902.4	8429	7902.4
2041	7989.86	8563	7989.86
2042	8077.32	8700	8077.32
2043	8164.78	8839	8164.78

En la anterior tabla se registró además de la proyección del DANE, la estimación de población por métodos teóricos que se propone Ricardo López Cualla, los métodos que se desarrollaron son geométricos y lineales, los cuales se presentan de la siguiente forma:

### **Método geométrico:**

Este método se basa en la hipótesis que el aumento de la población es proporcional al tamaño por lo que se expresa así:

$$Pf = Pi * (1 + r)^{t_f - t_i}$$

*Ecuación 2 Crecimiento poblacional (método geométrico)*

En donde:

Pf = Población en el tiempo de diseño

Pi= Población inicial

r = Tasa de crecimiento

Tf = Periodo de diseño

Ti = Periodo inicial

Y la tasa se puede calcular de la siguiente forma:

$$r = \left( \frac{Pf}{Pi} \right)^{\frac{1}{Tf - Ti}} - 1$$

*Ecuación 3 Rata de Crecimiento Poblacional*

Reemplazando en la anterior fórmula se obtiene:

r	0.01596829
---	------------

*Ecuación 4 Rata de Crecimiento*

Ya con la tasa de crecimiento calculada se calcula la proyección de población hasta el año de diseño que se desea, y es así como se obtiene toda la columna 2 de la Tabla 11

### **Método lineal**

Este tipo de crecimiento se desarrolla cuando el crecimiento es constante e independiente del tamaño de esta, por lo que se da la siguiente fórmula:

$$pf = Pi + ka * (Tf - Ti)$$

*Ecuación 5 Crecimiento poblacional (método lineal)*

En donde:

Pf = Población en el tiempo de diseño

Pi= Población inicial

Ka = Pendiente de la recta

Tf = Periodo de diseño

Ti = Periodo inicial

Y para el cálculo de la pendiente de la recta (ka):

$$ka = \frac{pf - Pi}{Tf - Ti}$$

*Ecuación 6 Pendiente de crecimiento poblacional*

Reemplazando en la anterior fórmula se obtiene:

$$Ka \quad 87.46$$

*Ecuación 7 Pendiente de crecimiento de Anapoima*

Ya con la pendiente de la recta de crecimiento calculada se calcula la proyección de población hasta el año de diseño que se desea, y es así como se obtiene toda la columna 3 de la Tabla 11

Y con la Tabla 11 se desarrolla el siguiente gráfico en donde las proyecciones lineales y las del DANE se sobrepone una sobre la otra, y la de crecimiento geométrico se eleva más que las otras, así que debido a los factores que se menciona durante el desarrollo de

este capítulo es recomendable el uso de la proyección geométrica para este tipo de proyecto y así ser consecuentes con el análisis del trabajo.

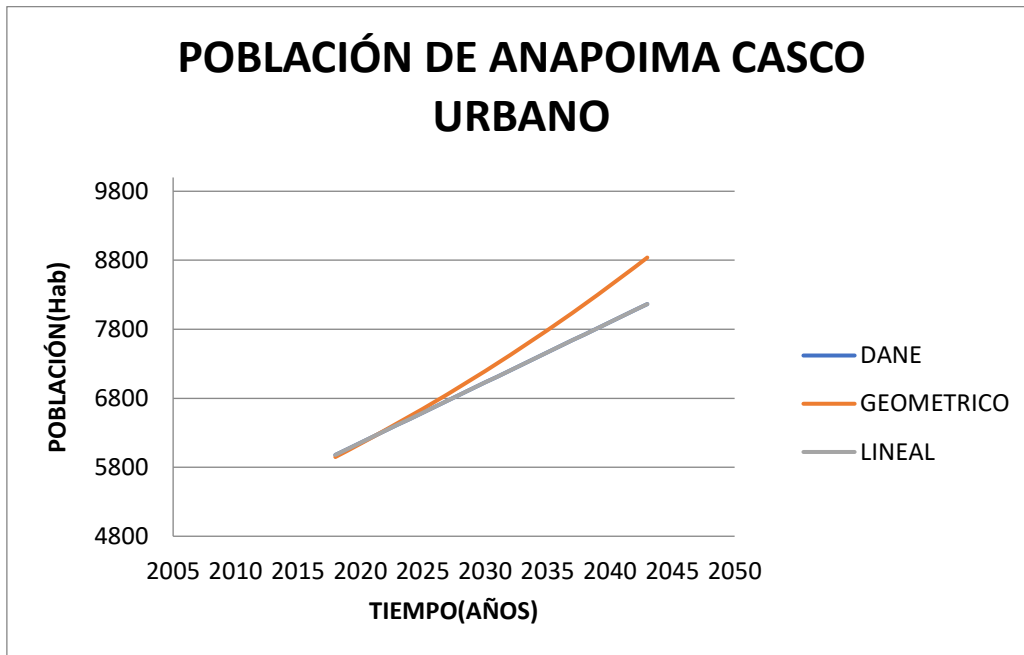


Ilustración 8 Crecimiento poblacional de Anapoima según DANE (incluyendo población flotante)

Y para determinar la población real del municipio se tendrá que tener en cuenta la población flotante que equivale a un 57,4% de la que se obtuvo en las proyecciones anteriores, para un total de 13.878 personas para el 2043.

## 2.5 Marco Legal

El reglamento a usar en el proyecto se escogió debido a los objetivos que se proponen y lo que abarcan estos, ya sea para la determinación de los parámetros del agua, la estructura de tratamiento o el vertimiento de lodos, así que la normativa aplicable es:

- Resolución 1907 del 2013 “Por la cual se expide la Guía Técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas”.
- Nueva Resolución 0330 de 2017 “Reglamento Técnico RAS”.
- Decreto 1287 del 2014 “Por el cual se establecen los criterios para el uso de los biosólidos en plantas de tratamiento municipales”.

- Resolución 2115 de 2007 “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”
- Resolución 0330 de 2017. Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (ras) y se derogan las resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005y 2320 de 2009.

## 1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

A continuación, se presentan los datos de caracterización del agua de la fuente entregados por aguas del Tequendama. Estudio realizado por el laboratorio Asebiol en

### INFORME No. 19097

Bogotá, D.C. 4 de julio de 2018

EMPRESA: **EMPRESA REGIONAL AGUAS DEL TEQUENDAMA S.A E.S.P**  
NIT: 900.129.313-7  
DIRECCION: Diagonal 8 N° 1 - 05  
TELÉFONO: 3142965111 - 8471213  
FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 7 de junio de 2018  
HORA: 11:20 a. m.  
FECHA DE PROCESO: 7 de junio de 2018  
FECHA DE SALIDA: 21 de junio de 2018  
MUESTRA TOMADA POR: AGUAS DEL TEQUENDAMA (Cindy Cárdenas)  
TESTIGO: Cindy Cárdenas  
CONTACTO CLIENTE: **CINDY JOHANA CARDENAS**  
CORREO ELECTRÓNICO: ptap.lamesa@aguasdeltequendama.com

DATOS MUESTRA				
CÓDIGO INTERNO	MUESTRA	CANTIDAD	TEMPERATURA (°C)	SITIO TOMA DE MUESTRA
50497	Agua cruda	1,25	19,1	Bocatoma la mesa Quebrada la honda

ANÁLISIS IN-SITU				
ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA	LÍMITE*
pH	Unidades	5,90	Potenciométrica	5,0 - 9,0
Conductividad	µS/cm	60,00	Potenciométrica	1000 Máximo

VÁLIDO ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA

RESOLUCION 1594 DE 1984 Usos del agua y residuos líquidos

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS				
ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA	LÍMITE DECRETO 1594
Coliformes totales	UFC/100ml	<1	Filtración por membrana	20.000
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100ml	<1	Filtración por membrana	No especificado

VÁLIDO ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA

RESOLUCION 1594 DE 1984 Usos del agua y residuos líquidos

julio de 2018.

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS				
ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA	LÍMITE DECRETO 1594
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	147,7	Volumétrico	200 Máximo
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	71,0	Volumétrico	250 Máximo
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	165,2	Volumétrico	No especificado
Color	UPC	16,0	Fotométrico	75 Máximo
Turbiedad	NTU	2,13	Nefelométrico	Máx. 10
Conductividad	μS/cm	61	Potenciométrico	No especificado
Hierro	mg/L Fe	0,33	Fotométrico	No especificado
Nitratos	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,6	Fotométrico	Máx. 10
Nitritos	mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,1	Fotométrico	Máx. 10
Aluminio	mg/l Al	<0,05	Fotométrico	0,2 Maximo
Manganeso	mg/l Mn	0,5	Fotométrico	No especificado
COT	mg/L	4	Fotométrico	5 Máximo
Fluoruros	mg/l F <sup>-</sup>	<0,1	Fotométrico	No especificado
Fosfatos	mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,09	Fotométrico	0,5 Máximo
Magnesio	mg/L Mg	22	Volumétrico	36 Maximo
Zinc	mg/l Zn	<0,05	Fotométrico	3 Máximo
Molibdeno	mg/l Mo	<0,07	Fotométrico	0,07 Máximo
Sulfatos	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40,00	Fotométrico	250 Máximo
Calcio	mg/L Ca	40,00	Fotométrico	60 Máximo

VALIDO ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA  
RESOLUCION 1594 DE 1984 Usos del agua y residuos líquidos

#### OBSERVACIONES

La muestra de agua analizada **CUMPLE** con los límites establecidos por la norma.

*Maria Isabel de Londoño*

**María Isabel de Londoño**  
Representante Legal

Informe final enviado por correo en formato PDF, 4/07/18

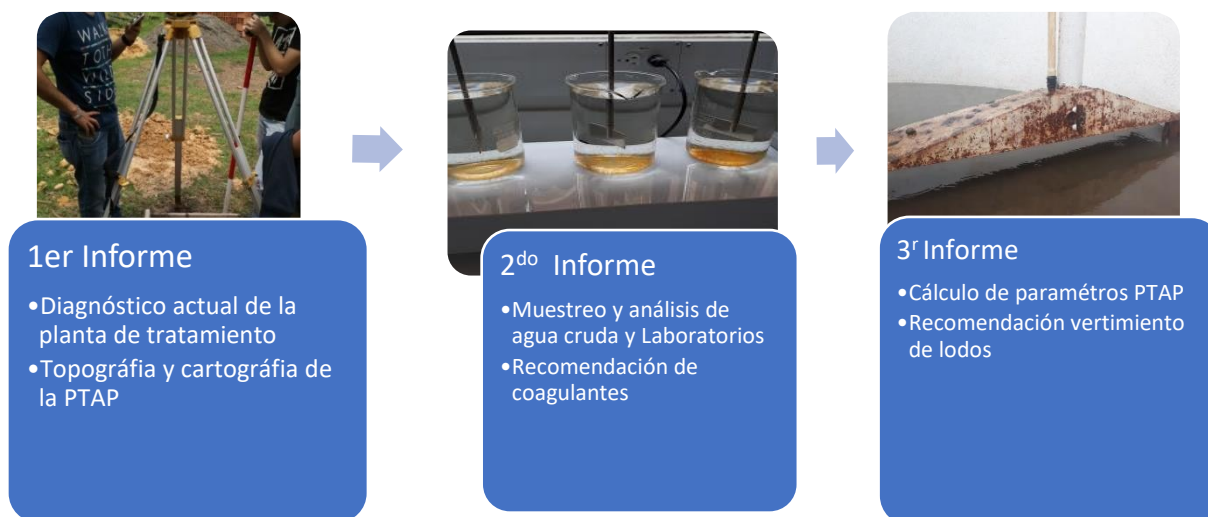
*Angélica Vargas Montañez*

**Angélica Vargas Montañez**  
Jefe de Gestión de Calidad

Los resultados presentados evidencian un agua de alta calidad, presentando una ausencia clara de microorganismos y de agentes químicos que puedan llegar a afectar la salud de los habitantes que consuman el agua. Dichos parámetros justifican la utilización de la planta compacta para las funciones básicas de floculación, sedimentación y posterior desinfección.

## 2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del proyecto “Actualización Técnica de la PTAP La Chica” se basa en tres pasos fundamentales las cuales se describen a continuación:



*Ilustración 9 Proceso de elaboración del proyecto (fuente propia)*

Para la elaboración de cada uno de los informes se establecieron etapas las cuales se desarrollaran así:

**Primera Etapa: diagnóstico de las condiciones en las que se encuentra la planta de tratamiento de la PTAP “La Chica”**

Para esta primera etapa se desarrollará un análisis técnico de la PTAP “La Chica”, mediante las siguientes actividades:

**Actividad 1: Exploración de la PTAP**

**Descripción:** Visita Técnica a la PTAP en el municipio de Anapoima, en donde se identificarán los distintos elementos de la planta de tratamiento y el estado en el que se encuentran.

Recursos necesarios:

- Cámara
- Guantes
- Agenda para apuntes
- Recursos monetarios propios para las visitas de campo.
- Botas tipo pantaneros.

**Actividad 2: Comparación de datos**

**Descripción:** Comparación de los datos ofrecidos por la empresa Regional Aguas del Tequendama S.A.E.S.P., con los datos tomados en campo.

Recursos necesarios:

- Datos tomados en la visita
- Software para el procesamiento de textos
- Gerente de la empresa Regional Del Tequendama
- Computador

**Segunda Etapa: Elaboración de planos de la PTAP “La Chica”**

En esta etapa lo que se va a desarrollar es la elaboración completa de los planos de la planta de tratamiento con cada uno de sus elementos para un post-cálculo de cada uno de estos, para lo que se necesita llevar a cabo las siguientes actividades:

**Actividad 1: Georreferenciación de la PTAP**

**Descripción:** Arrastrar un punto conocido cerca de los elementos de la planta de tratamiento, para que con este punto la PTAP tenga coordenadas conocidas en un SIG.

Recursos Necesarios:

- GPS
- Estación topográfica con su prisma
- Cámara
- Decámetro.

***Actividad 2: Levantamiento topográfico y catastral de cada uno de los elementos de la PTAP***

***Descripción:*** Toma de las dimensiones de los elementos de la PTAP, al igual que su ubicación.

Recursos Necesarios:

- GPS
- Estación topográfica con su prisma
- Cámara
- Decámetro.
- Botas.
- Hilos

***Actividad 3: Elaboración de los planos completos de la PTAP***

***Descripción:*** Con los datos tomados en la actividad anterior, se llevarán a cabo los planos de cada uno de los elementos con sus respectivas vistas (corte longitudinal, corte transversal, vista en planta), para así identificar cada una de las características de estos.

Recursos Necesarios:

- Software de diseño asistido por computadora

- Computadora
- Cámara
- Datos tomados en la actividad 2

***Actividad 4: Construcción de un documento del equipo mecánico que se utiliza***

***Descripción:*** Con los datos tomados en la actividad anterior, se realizará un documento en el cual se mencione el tipo de máquina que se usa con su respectiva foto, anexando las recomendaciones para mantenimiento.

Recursos Necesarios:

- Software para el procesamiento de textos
- Computadora
- Cámara
- Datos tomados en la actividad 2
- Fuentes bibliográficas

***Tercera Etapa: Reconstrucción de las memorias de cálculo de la PTAP “La Chica”***

Cálculo de cada uno de los elementos de la PTAP y comparación de los cálculos obtenidos con la normativa vigente RAS-2000, para identificar si los parámetros están acorde a lo exigido.

***Actividad 1: Cálculo de los parámetros de los elementos de la PTAP***

***Descripción:*** Cálculo de parámetros de diseño de los procesos de tratamiento (gradiente, velocidades, carga superficial, tiempos, caudales, etc.).

Recursos Necesarios:

- Planos y dimensiones tomadas en la etapa 2
- Fuentes bibliográficas
- Computador
- Agenda de apuntes

***Actividad 2: Verificación de los parámetros con el RAS-2000***

***Descripción:*** Comparación de los datos obtenidos en la actividad anterior con lo exigido por el RAS-2000 y con recomendaciones de fuentes bibliográficas.

Recursos Necesarios:

- Computador
- Agenda de apuntes
- Software para el procesamiento de textos

***Cuarta Etapa: Plantear posibles alternativas para el cambio de coagulante***

Probar distintos tipos de coagulantes comerciales y tratar de encontrar el más eficientes entre estos y así recomendarlo para el uso en planta, lo cual se tiene que hacer en las siguientes actividades.

***Actividad 1: Recolección de muestras***

***Descripción:*** Recolección de muestras de aguas cruda (en la entrada de la PTAP), sedimentada (después del sedimentador) y agua tratada (después de los filtros).

Recursos Necesarios:

- Guantes
- Recipientes de vidrio o plástico

- Nevera de poliestireno expandido
- Bolsas de hielo

***Actividad 2: Pruebas con distintos coagulantes***

***Descripción:*** Pruebas de tratabilidad del agua con coagulantes distintos tales como coagulantes sintéticos, orgánicos, etc., con ayuda del test de jarras.

Recursos Necesarios:

- Guantes
- Equipo de jarras
- Turbidímetro
- Espectrofotómetro
- Agenda de apuntes

***Actividad 3: Comparación de los datos obtenidos y recomendación***

***Descripción:*** Se realizará un gráfico en el cual se hará una relación entre precio vs dosificación y calidad vs dosificación.

Recursos Necesarios:

- Computador
- software para el análisis cuantitativo
- Software para el procesamiento de textos
- Bibliografía

***Quinta Etapa: Posible tratamiento y disposición de los lodos de la PTAP***

Dar una solución para los lodos producidos por la planta de tratamiento, generado por los filtros.

***Actividad 1: Cuantificación de los lodos***

***Descripción:*** Cálculo de la cantidad de lodo generado en el lavado de los filtros.

Recursos Necesarios:

- Bibliografía
- Gerente de la empresa Regional Del Tequendama
- Agenda
- Computador

***Actividad 2: Propuesta de la posible solución para los lodos***

***Descripción:*** Propuesta según bibliografía y disponibilidad de la empresa Regional Del Tequendama para poder tratar y disponer los lodos

Recursos Necesarios:

- Gerente de la empresa Regional Del Tequendama
- Bibliografía
- Computador
- Papelería
- Agenda de apuntes

### **3. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA**

#### **5.1 Aducción /Conducción**

##### **Operación y Mantenimiento**

La aducción se produce en la quebrada la Honda en el municipio de Tena, mediante una bocatoma de fondo en donde se captan más de 72 lt/s, caudal que es distribuido en un 70% para La Mesa y un 30% para Anapoima, de la bocatoma se deriva el agua a un desarenador con la capacidad de tratar la misma cantidad de agua captada, de allí parte una tubería de 10” con una longitud aproximada de 10 Km hasta la planta de La Mesa, a este lugar llega a un tanque de distribución, que mediante vertederos derivan el agua hacia Anapoima y a la PTAP de La Mesa.

Esta tubería que va desde la Bocatoma-Desarenador-Cámara de derivación, tiene problemas en los puntos de aducción, debido a los movimientos en masa que ocurren allí, por lo que en ocasiones hay problemas en las conexiones de la tubería, así que se hace necesario el uso de válvulas para hacer reparaciones preventivas, cabe mencionar que los materiales de esta tubería son PVC, AC Y ACERO.

El segundo tramo de la conducción, va desde la PTAP de La Mesa hasta Anapoima, con una longitud aproximada de 11 km, y un diámetro de 6” en PVC, llegando a la PTAP La Chica, en donde llega a una caja de válvulas iniciales, las cuales se encuentran sobre la vía interna de la planta, pero estas válvulas permanecen abiertas casi todo el tiempo, excepto cuando hay algún tipo de mantenimiento interno en la PTAP.

## 5.2 Entrada y dosificación

El agua por tratar, proveniente de la quebrada “La Honda” entra a la cámara dosificación por medio de una tubería de 8” (proveniente de la <sup>PTAP</sup> La Mesa, donde el agua es conducida a un tanque de derivación después de haber pasado por el desarenador). Inmediatamente el agua ingresa a la cámara de entrada, se realiza una pre-cloración mediante una tubería de 1” que sale de la bomba de cloración, con el fin de evitar la aparición de algas dentro del tanque de floculación.

Posteriormente entra a la cámara de dosificación automática, sin embargo, este mecanismo no se encuentra en funcionamiento, por lo que la dosificación se realiza mediante un tanque de 250L de capacidad. Esta dosificación se realiza en función de la dosis teórica que se le debe aplicar al agua y el caudal promedio horario de agua que ingresa a la planta. De esta forma, se calcula la cantidad de coagulante (en kg) por hora que debe ser disuelto en el agua, con el fin de disolverlo en el tanque y aplicarlo de forma gradual durante el tiempo estipulado. El proceso se realiza teniendo en cuenta las variaciones de caudal de entrada en la planta. De igual manera, debido a que la pre-cloración afecta los parámetros de pH y alcalinidad del agua, los operarios aplican óxido de calcio junto con el coagulante con el fin de neutralizar los efectos producidos por el pre-clorado. (En la actualidad se aplica cloro en el pre-clorado al 1%, la dosificación de sulfato de aluminio es de 0,4 a 0,7 ml/L a una concentración de 1000 ppm y la aplicación de CAL es diez veces menor que la del coagulante)

La aplicación de del coagulante se realiza posteriormente al paso del agua por el vertedero de pared delgada, en la misma sección donde se encuentra la tubería de salida hacia la cámara de distribución de la planta.

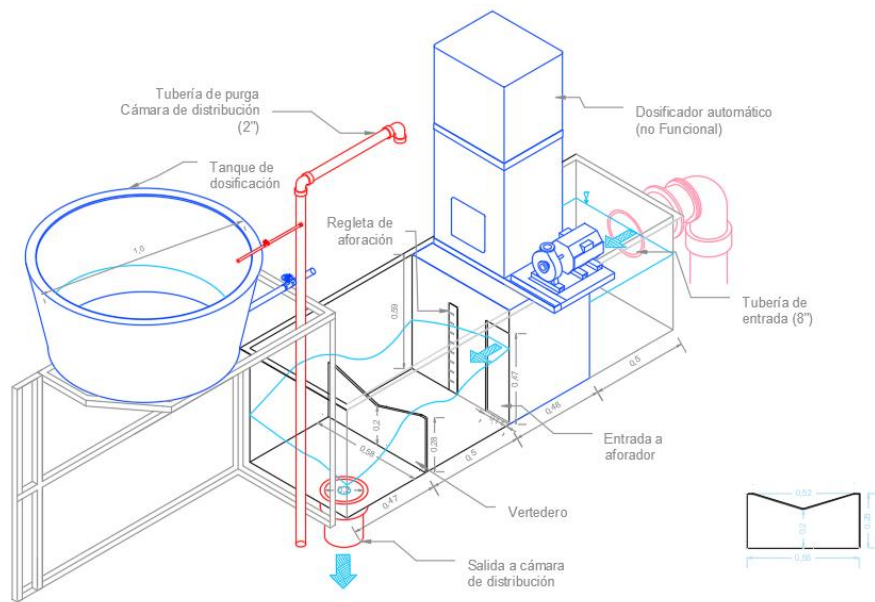


Ilustración 10 Esquema sistema de entrada y dosificación de la planta (Fuente Propia)

### 5.3 Aforo de caudal de entrada.

El aforo se realiza a través de un vertedero triangular de pared delgada, el cual funciona ahogado. EL vertedero, como se puede observar en la ilustración 1, posee una altura máxima de 28cm en su parte más alta y de 20cm en su parte más baja. Igualmente, éste posee un ancho de 58cm (equivalente al ancho total del canal) en donde su sección triangular mide 52cm, dejando un margen de 3cm a cada lado del mismo.

Para el aforo de caudal se utiliza una regleta con alturas equivalentes a aproximadamente 50cm aguas arriba del vertedero. Sin embargo, debido al caudal que fluye por el canal (y por ende, la turbulencia que esto conlleva) se torna difícil tomar precisa del valor de caudal, limitando la precisión de la medida en  $\pm 3L$ .

Tabla 12 Datos calculados para el vertedero triangular

<b>VERTEDERO TRIANGULAR</b>		
<b>Cresta</b>	0,52	m
<b>Q</b>	0,015	m <sup>3</sup> /s
<b>h</b>	0,08	m
<b>Teta</b>	146	grados
<b>cd</b>	1,07	
<b>y</b>	0,2	m
<b>x</b>	0,29	m
<b>q</b>	0,028	m <sup>3</sup> /s/m
<b>hc</b>	0,043	m
<b>h1</b>	0,023	m
<b>v1</b>	1,241	m/s
<b>F</b>	2,60	
<b>h2</b>	0,085	m
<b>v2</b>	0,33	m/s
<b>hp</b>	0,010	m
<b>xr</b>	0,373	m
<b>trh</b>	0,472	s
<b>δ</b>	1000	kg/m <sup>3</sup>
<b>μ</b>	0,000117	
<b>G</b>	436,824693	s <sup>-1</sup>

Ecuación 8 Caudal por unidad de longitud

$$q = Q/Cresta$$

*Ecuación 9 Altura critica en el vertedero*

$$hc = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$$

*Ecuación 10 Altura de la lamina de agua antes del vertedero*

$$h1 = 1,414 * \frac{hc}{\left(\frac{y}{hc} + 2,56\right)^{\frac{1}{2}}}$$

*Ecuación 11 Velocidad del agua antes del vertedero*

$$V1 = \frac{q}{h1}$$

*Ecuación 12 No de Freud*

$$F = \frac{V1}{(g \cdot h)^{\frac{1}{2}}}$$

*Ecuación 13 Altura de la lamina de agua después del vertedero*

$$h2 = \frac{h}{2} \cdot \left((1 + 8 \cdot F^2)^{\frac{1}{2}} - 1\right)$$

*Ecuación 14 Velocidad después de la lamina de agua*

$$V2 = \frac{q}{h2}$$

*Ecuación 15 Perdida de carga en el vertedero*

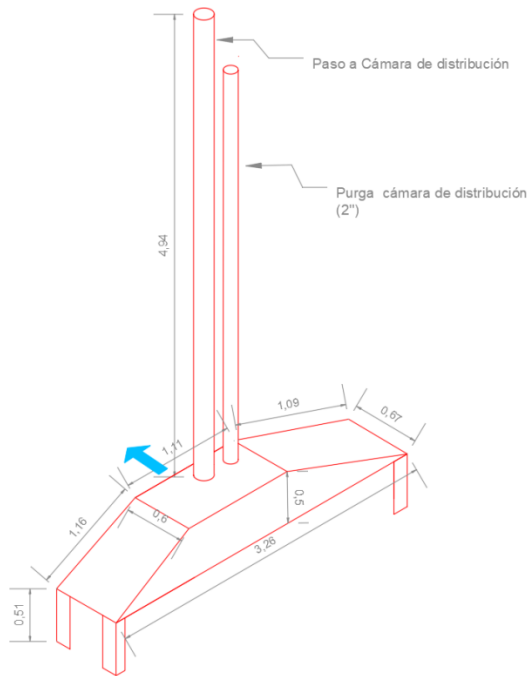
$$hp = \frac{(h2 - h1)^3}{4 \cdot h2 \cdot h1}$$

## **5.4 Cámara de distribución**

Una vez, el agua pasa por el vertedero triangular, esta es conducida por medio de una tubería de PVC de 8" de diámetro a la cámara de distribución, la cual se encuentra aproximadamente a 4,95 m abajo del canal de dosificación y aforo.

La cámara de distribución consta de una estructura de acero de forma trapezoidal ubicada a 0.51m del nivel inferior del tanque de floculación, la cual posee 2 funciones principales. La primera función consiste en dispersar la energía proveniente de las

diferencias de cotas de nivel del agua entre el canal de dosificación y el fondo del tanque.



*Ilustración 11 Esquema de cámara de distribución (Fuente propia)*

La segunda función, consiste en garantizar una distribución homogénea en la salida del agua a lo largo de toda la sección del tanque. Esto se logra debido a que la salida de la cámara de distribución se realiza por medio de una rejilla que se encuentra a lo largo del vértice horizontal del tanque (vértice ubicado entre la campana de la cámara y la base). Esta rejilla posee una altura de aproximadamente 2cm y una longitud equivalente al largo de la cámara (3,26m) en cada uno de sus costados, lo que también permite garantizar un flujo de salida uniforme y bidireccional (Ilustración 11) a lo largo del tanque de floculación.

Por otro lado, la cámara de distribución posee en su zona superior una tubería de 2" de diámetro, la cual cumple la función de purgar el aire aprisionado proveniente del canal de dosificación. Dicha tubería posee dos salidas, como se puede observar en la ilustración 1.

Asimismo, debido a que la purga conlleva también a la expulsión de agua por el aprisionamiento de ésta entre las burbujas de aire (como es evidente), esta tubería es utilizada para proveer de agua al tanque de dosificación por medio de una tubería ramal de ½” de diámetro el cual desvía una fracción de agua. El agua restante es devuelta nuevamente al canal de distribución.

### 5.5 Tanque de floculación-sedimentación

El tanque de floculación-sedimentación posee un diámetro interior de 3,0m, un diámetro exterior de 9,4m y una altura efectiva de aproximadamente 5,20 m. Para dichos valores se tiene los siguientes parámetros de diseño del tanque:

*Tabla 13 Valores de funcionamiento del tanque de floculación (fuente propia)*

<b>Tanque floculación- sedimentación</b>	
<b>Diámetro Int. (m)</b>	3,00
<b>Diámetro Ext (m)</b>	9,40
<b>Altura (m)</b>	5,20
<b>Área en planta (m<sup>2</sup>)</b>	62,329
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	324,11
<b>Caudal medio (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,015
<b>Tiempo de retención medio (min)</b>	360,12

Como se puede observar en la tabla, para los valores dados se obtiene un tiempo de retención de aproximadamente 6 horas y 6 minutos. Este tiempo es el resultado de del cociente entre el volumen del tanque y el caudal medio de la planta.

Por otro lado, y como se puede observar en la Ilustración 12, el agua posee un flujo ascendente ascensional en sentido anti horario, dicho sentido es forzado por la dirección de salida del agua de la cámara de distribución y por la geometría específica de la canaleta, la cual posee una pared con altura mayor que la otra, forzando que el agua solo entre por un costado de la misma.

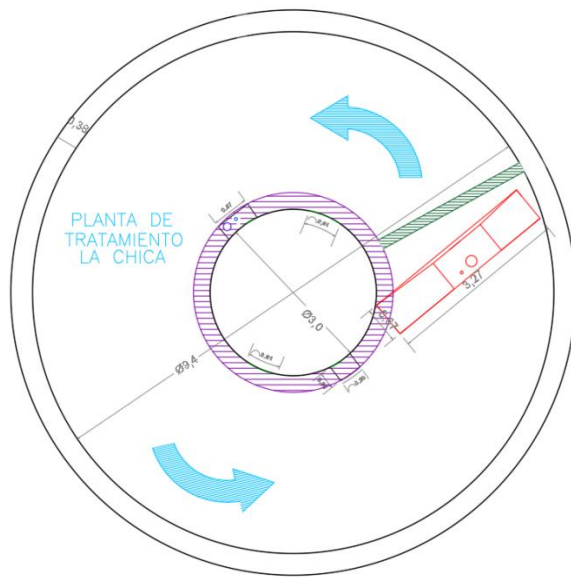


Ilustración 12 Esquema Tanque de floculación sedimentación (Fuente Propia)

La canaleta de recolección (de color verde en la Ilustración 12) se encuentra en el nivel superior de tanque, y se encarga de recoger el agua, una vez se haya sedimentado la mayor cantidad de residuos sólidos, y conducirla al canal perimetral (color morado). Este canal posee una tubería descendente que se encarga de llevar el agua sedimentada hacia los filtros, los cuales se encuentran en la zona inferior del tanque interior.

Tabla 14 Datos de la canaleta de recolección

<b>Canal de recolección</b>		
<b>Q</b>	0,015	m <sup>3</sup> /s
<b>Bv</b>	2,86	m
<b>Hv</b>	0,0201035	m
<b>Vv</b>	0,26088771	m/s
<b>Xs</b>	0,21134098	m

Ecuación 16 Altura de la lámina de agua en el vertedero

$$hv = \left( \frac{Q}{1,48 \cdot Bv} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Ecuación 17 Velocidad en el vertedero

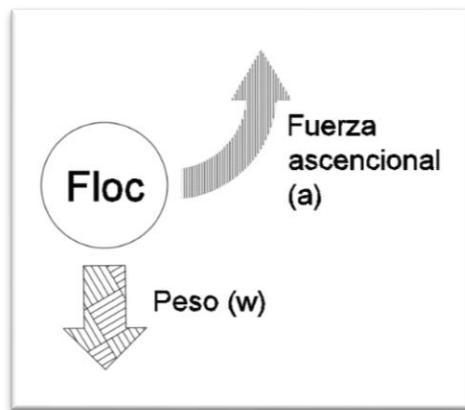
$$Vv = \frac{Q}{BHv}$$

Ecuación 18 Ancho necesario en el vertedero

$$Xs = 0,36 \cdot Vv^{\frac{2}{3}} + 0,6 \cdot Hv^{\frac{4}{7}}$$

El tanque posee también una tubería de rebose de 2" de diámetro ubicada más abajo del nivel superior de la pared más alta de la canaleta de recolección con el fin de evitar desbordamientos de agua dentro del cantal perimetral.

Es importante aclarar que debido a que los procesos de floculación y sedimentación se realizan de manera simultánea, se generará una interacción entre la fuerza ascendente producida por el flujo y la fuerza descendente producida por el peso del flóculo recién formado (como se puede observar en Ilustración 13).



*Ilustración 13 Interacción de fuerzas en el floc (Fuente propia)*

De esta forma, se hace necesario garantizar que la velocidad de flujo no sea tan alta como para que la fuerza ascensional del flujo de agua supere la fuerza del peso de los flóculos creados, evitando que éstos se sedimenten. Esto genera que los cálculos de verificación para el funcionamiento de los floculadores y sedimentadores de las plantas compactas varíen en relación con los cálculos de las plantas convencionales. Dichos cálculos de los parámetros óptimos para el funcionamiento de la planta son presentados más adelante dentro del presente informe.

## **5.6 Filtración**

Una vez el agua desciende por la tubería del canal perimetral, color verde (Ilustración 12), esta llega a una caja de paso (la cual posee una tubería de purga que desemboca mediante una cobra en el tanque de floculación-sedimentación) por donde se dirige hasta entrar en una cámara de distribución sobre los lechos filtrantes.

Una vez en la cámara distribución, el agua entra de manera descendente a las diferentes capas del lecho filtrante. El filtro, el cual presenta un flujo descendente, se encuentra compuesto de tres lechos granulares; un lecho inferior de grava de 45cm de espesor, un lecho intermedio de antracita de 20cm de espesor y un lecho superior de arena de 25cm de espesor.

Posteriormente, cuando el agua ha atravesado los lechos filtrantes, ésta entra nuevamente a las cajas de paso, tanto a la caja inicial como a una segunda caja que se encuentra diametralmente opuesta. Dichas cajas de paso redirigen el flujo del agua hacia las correspondientes rejillas de entrada hacia el tanque interior, el cual posee un diámetro de 3m.

(NOTA: Es necesario aclarar que debido a que no es posible entrar a la zona de filtrado de la planta, ya que se encuentra confinada bajo el tanque interior, el funcionamiento de esta etapa anterior del proceso se dedujo gracias a la información encontrada en la literatura y aquella suministrada por los operarios de la planta.)

El tanque interior posee una tubería de rebose de 8" de diámetro, con una cota de 2,15m con respecto a la cota de las rejillas de acceso al tanque. De forma tal, una vez el agua ha sido filtrada, entra al tanque interior donde se almacena hasta que su nivel alcance la tubería de rebose. Esta tubería de rebose dirige al agua fuera de la planta de tratamiento compacta para una posterior desinfección por cloración y subsiguientemente su almacenamiento en los tanques correspondientes.

El proceso de filtración puede ser observado de una mejor manera en el plano 04 del presente informe, el cual presenta la distribución geométrica de los procesos de filtración.

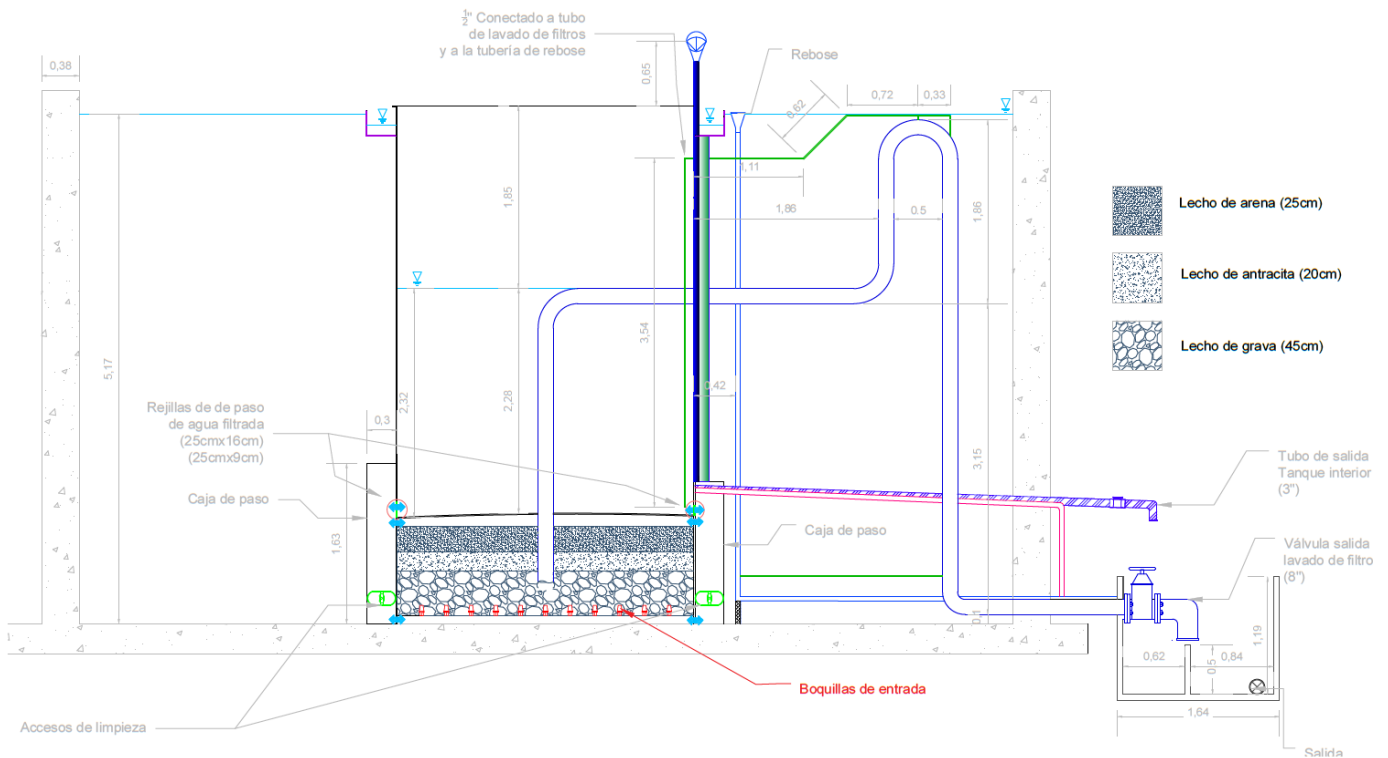


Ilustración 14 Esquema de funcionamiento filtro (Fuente Propia)

## 5.7 Lavado de filtros

La planta está diseñada para que el lavado de filtros funcione de manera automática cuando éste se colmate. El proceso automático está basado en las diferencias de cabeza de energía del agua presente en el tanque interior (después de atravesar los lechos filtrantes) y el agua en el floculador exterior (antes de atravesar los lechos filtrantes).

El proceso consta entonces de tres interfaces importantes a tener en cuenta:

1. La interfaz entre el agua presente en el floculador con el lecho filtrante
2. La interfaz del lecho filtrante con el agua presente en el tanque interior
3. La interfaz entre lecho filtrante y el tubo sifón (el cual funciona como tubo de succión)

De esta manera, mientras los filtros se encuentran limpios, las pérdidas de energía entre las tres interfaces permanecen pequeñas y los niveles de agua continúan constantes entre las etapas de pre-filtrado y post-filtrado, por lo que los niveles de agua en la tubería sifón no llegan a alcanzar el punto más alto de éste. Sin embargo, a medida que los filtros se colmatan el paso del agua hacia el tanque interior comienza a resultar más dificultoso, generando que los niveles hidrostáticos de la tubería sifón comienzan a igualarse con los niveles del tanque floculador. En palabras más sencillas, si la salida de agua hacia el tanque interior se taponara el agua aflorará y comenzará a dirigirse a la única salida restante.

De esta forma, una vez los tanques posean un nivel de colmatación lo suficientemente alto, el nivel de agua alcanzará la corona de la tubería sifón permitiendo que el agua del sistema comience su desagüe por este medio. Como se puede observar, este proceso de desagüe por medio de la tubería sifón se realiza con flujo en dirección contraria al flujo de filtrado (ocurre en dirección ascendente), lo que permite que las partículas atrapadas en el filtro puedan ser removidas del mismo.

Sin embargo, a partir del mantenimiento realizado al lecho filtrante a comienzos del año pasado (2018), el funcionamiento automático ha dejado de trabajar correctamente por lo que tiene que ser asistido por el personal de la planta. Más específicamente, es necesario mantener cerrada la válvula de la tubería sifón para el proceso de filtrado y en el momento de realizar el lavado es indispensable abrir dicha válvula y la válvula de la tubería que se encarga de dirigir el agua desde el tanque interior a los tanques de almacenamiento.

Lo anterior puede estar ocurriendo debido a que el lecho filtrante actual posee una conductividad hidráulica demasiado alta como para generar diferencias de energía lo

suficientemente altas entre cada una de las interfaces ya antes mencionado. Sin embargo, debido a que no se tiene la suficiente información acerca de las características físicas del lecho, no es posible confirmar las causas reales de este mal funcionamiento.

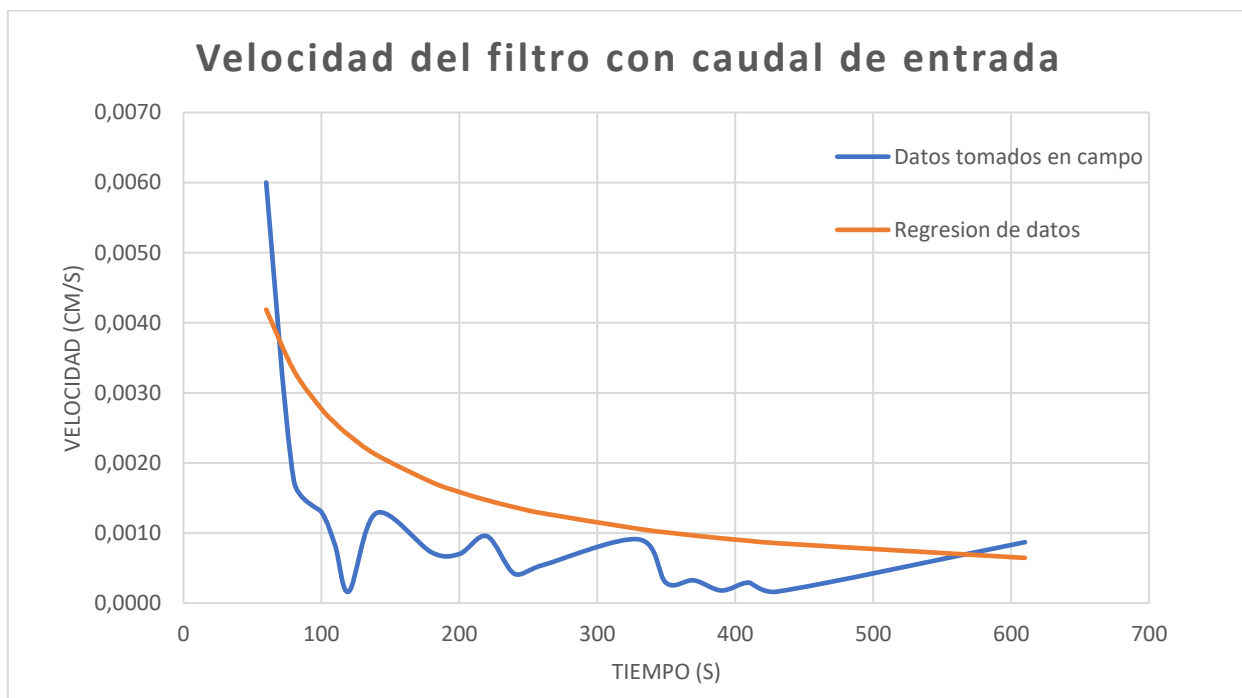
En una de las visitas técnicas que se llevaron a cabo, se realiza un aforo para averiguar la velocidad de lavado del filtro, este consistía en tomar tiempo y distancia en el que disminuía la lamina de agua, se hacen dos tomas de datos: en la primera se diligencian datos en los que al filtro le ingresaba un caudal de 15 lt/s y en la siguiente se restringe la entrada de agua.

*Tabla 15 Aforo de lavado de filtro*

<b>DATOS DE VELOCIDAD DE LAVADO DEL FILTRO CON CAUDAL DE ENTRADA</b>					
<b>t</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Distancia relativa (m)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>V regre (m/s)</b>	<b>Q</b>
<b>0</b>	0.4800	0.0000			
<b>60</b>	0.8400	0.3600	0.0060	0.0042	0.2960
<b>80</b>	0.9800	0.1400	0.0018	0.0033	0.2347
<b>100</b>	1.1100	0.1300	0.0013	0.0028	0.1960
<b>110</b>	1.2000	0.0900	0.0008	0.0026	0.1815
<b>120</b>	1.2200	0.0200	0.0002	0.0024	0.1692
<b>140</b>	1.4000	0.1800	0.0013	0.0021	0.1494
<b>180</b>	1.5300	0.1300	0.0007	0.0017	0.1220
<b>200</b>	1.6700	0.1400	0.0007	0.0016	0.1120
<b>220</b>	1.8800	0.2100	0.0010	0.0015	0.1037
<b>240</b>	1.9800	0.1000	0.0004	0.0014	0.0967

<b>260</b>	2.1200	0.1400	0.0005	0.0013	0.0906
<b>330</b>	2.4200	0.3000	0.0009	0.0011	0.0748
<b>350</b>	2.5200	0.1000	0.0003	0.0010	0.0713
<b>370</b>	2.6400	0.1200	0.0003	0.0010	0.0682
<b>390</b>	2.7100	0.0700	0.0002	0.0009	0.0654
<b>410</b>	2.8300	0.1200	0.0003	0.0009	0.0628
<b>430</b>	2.9000	0.0700	0.0002	0.0009	0.0604
<b>610</b>	3.4300	0.5300	0.0009	0.0006	0.0455

Con estos datos tomados se determina una velocidad en el tiempo diligenciado, por lo que se procede a realizar una gráfica de velocidad vs tiempo, en la cual se iba a verificar si esta coincidía de una forma analítica.



*Ilustración 15 VELOCIDAD VS TIEMPO*

Ya con la gráfica hecha se procede a realizar una regresión potencial, con el objetivo de saber velocidades mínimas y máximas del lavado, por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

*Ecuación 19 Regresión potencial para el lavado de filtro*

$$V = 0.114T^{-0.807}, R^2 = 0.88$$

Aquí se presenta la ecuación con el  $R^2$  que al ser muy cercano al uno es de confiabilidad alta.

Y para efectos de los demás cálculos de pérdidas en el filtro se toma una velocidad óptima de 0,28 m/min en donde en el libro de Garavito, se encuentra que el tamaño efectivo para esta velocidad es de 0,25mm.

Y por último en la siguiente tabla se muestran los valores de lavado del filtro sin un caudal de entrada, que es algo que no debería de ocurrir, pero en las visitas que se desarrollaron, los operarios de la planta lo tenían que hacer, para que el filtro se dejara lavar.

*Tabla 16 Datos de velocidad restringiendo caudal de entrada*

<b>VELOCIDAD DE LAVADO DEL FILTRO RESTRINGIENDO EL CAUDAL DE ENTRADA</b>					
<b>T</b>	<b>distancia</b>	<b>distancia relativa</b>	<b>V</b>	<b>V regre</b>	<b>Q</b>
<b>0</b>	0.48	0.000		0.461	32.612
<b>60</b>	0.76	0.280	0.005	0.337	23.856
<b>80</b>	0.92	0.160	0.200	0.261	18.479
<b>90</b>	0.99	0.070	0.078	0.175	12.349
<b>100</b>	1.04	0.050	0.050	0.148	10.470
<b>110</b>	1.12	0.080	0.073	0.128	9.034
<b>120</b>	1.19	0.070	0.058	0.112	7.904
<b>130</b>	1.27	0.080	0.062	0.099	6.997
<b>140</b>	1.32	0.050	0.036	0.088	6.255
<b>150</b>	1.39	0.070	0.047	0.080	5.638
<b>160</b>	1.48	0.090	0.056	0.072	5.119
<b>170</b>	1.55	0.070	0.041	0.066	4.676

<b>180</b>	1.63	0.080	0.044	0.061	4.295
<b>190</b>	1.71	0.080	0.042	0.056	3.965
<b>200</b>	1.78	0.070	0.035	0.052	3.676
<b>210</b>	1.87	0.090	0.043	0.048	3.421
<b>220</b>	1.93	0.060	0.027	0.045	3.195
<b>230</b>	2.01	0.080	0.035	0.042	2.993
<b>240</b>	2.09	0.080	0.033	0.040	2.812
<b>250</b>	2.18	0.090	0.036	0.037	2.650
<b>260</b>	2.25	0.070	0.027	0.035	2.502
<b>270</b>	2.32	0.070	0.026	0.034	2.369
<b>280</b>	2.41	0.090	0.032	0.032	2.247
<b>290</b>	2.5	0.090	0.031	0.030	2.135
<b>300</b>	2.57	0.070	0.023	0.029	2.033
<b>310</b>	2.63	0.060	0.019	0.027	1.938
<b>320</b>	2.68	0.050	0.016	0.026	1.851
<b>330</b>	2.83	0.150	0.045	0.025	1.771
<b>340</b>	2.89	0.060	0.018	0.024	1.696
<b>360</b>	3	0.110	0.031	0.023	1.627
<b>380</b>	3.12	0.120	0.032	0.021	1.501
<b>400</b>	3.16	0.040	0.010	0.020	1.392
<b>420</b>	3.36	0.200	0.048	0.018	1.295
<b>440</b>	3.52	0.160	0.036	0.017	1.210
<b>480</b>	3.61	0.090	0.019	0.016	1.133
				0.014	1.003

De la misma manera que en el anterior análisis se realiza un ajuste de datos, y una regresión potencial para obtener la ecuación de velocidad para este lavado. En la

siguiente grafica se encuentran los datos diligenciados en campo plasmados de tal forma que se ve que la grafica es correcta, ya que la velocidad disminuye con forme el tiempo va transcurriendo.

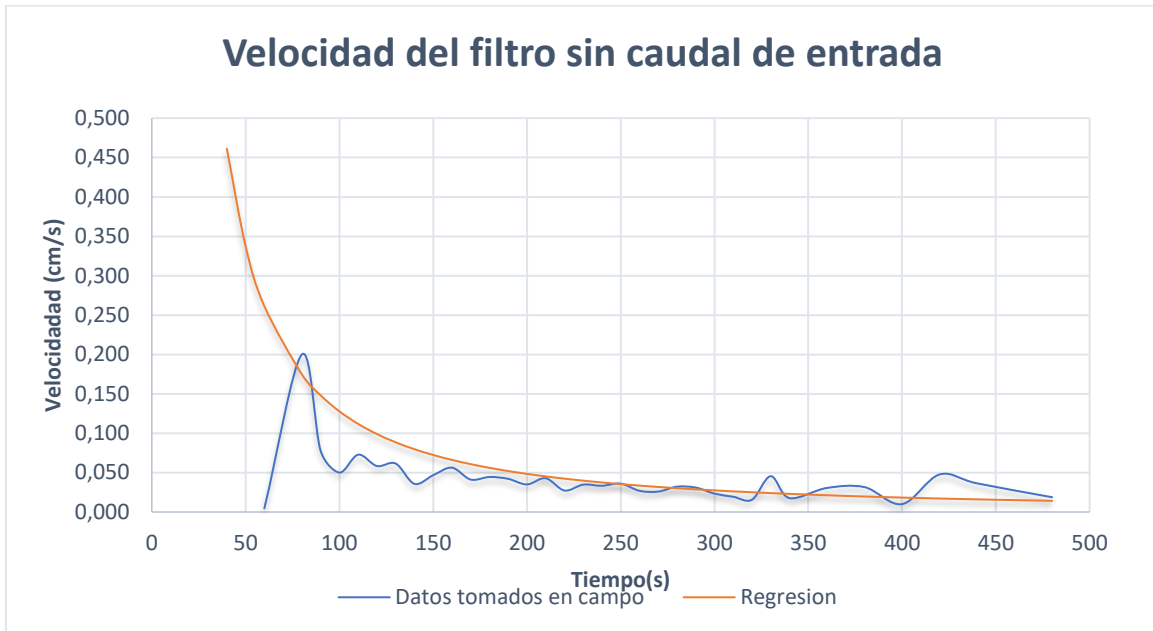


Ilustración 16 Tiempo vs Velocidad restringiendo caudal

La ecuación que se encuentra que representa la velocidad para el anterior caso es:

Ecuación 20 Velocidad de lavado de filtro con restricción de caudal

$$81.008T^{-1.401}, R^2 = 0,95$$

De la misma forma que en el anterior análisis el  $R^2$  nos da un valor muy cercano al uno, lo que nos da confiabilidad. Además, se toma como velocidad optima de 0.36 m/min, lo que nos arroja un resulta de diámetro efectivo de 0.25 mm.

Con esto valores de velocidades se puede calcular la pérdida de carga por la arena y por la grava, de la siguiente manera se calculara la pérdida de carga en arena:

Ecuación 21 Perdida de carga causada por la arena

$$h = \frac{e}{p} (Pe - P)(1 - Pv)$$

$e$  = espesor de la capa de arena

$p =$  peso específico del agua

$p_e =$  peso específico de la arena

$p_v =$  % porcentaje de vacíos

Con lo anterior obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 17 Perdida de carga causada por material filtrante

<b>PERDIDA DE CARGA EN FILTRO</b>			
<b><math>h_p</math> grava</b>	0.04	m	Tabla
<b><math>h_p</math> arena</b>	0.225	m	Calculada
<b><math>h_{total}</math></b>	0.265	m	Sumatoria

Aunque hay que tener en cuenta la pérdida necesaria para producir el lavado automático, ya que a medida que el filtro se colmata la pérdida de carga va siendo mayor haciendo que los niveles en el sifón con respecto al tanque de almacenamiento aumenten su diferencia y el nivel del agua en el sifón sea más alto y así activar el lavado automático.

#### 4. DETERMINACIÓN DE COAGULANTE Y DOSIS ÓPTIMA.

Para el presente ensayo se tomaron muestras de agua a la entrada de la planta, entre fechas diferentes. A continuación, se presentan las características correspondientes a las diferentes muestras:

De igual manera, se probaron cuatro coagulantes diferentes con el fin de encontrar cuál de éstos producía el tratamiento óptimo, en términos tanto de eficiencia en la claridad del agua como de economía en los procesos operativos de la planta. Los coagulantes utilizados fueron los siguientes:

##### **Sulfato de aluminio tipo B:**

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 531 el sulfato de aluminio tipo B es el que cumple las especificaciones consignadas en la tabla No. 2:

*Tabla 18 Requisitos químicos del sulfato de aluminio tipo B*

REQUISITOS	SÓLIDO	SOLUCIÓN
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mínimo</b>	15,2	7,3
<b>Hierro como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2	1,2
<b>% materia insoluble</b>	8	0,1

Para el ensayo de jarras se usó una solución de sulfato de aluminio al 1.0%

##### **Cloruro Férrico**

Los coagulantes basados en el hierro como elemento metálico poseen una amplia aplicabilidad en el área del tratamiento de aguas, específicamente el cloruro férrico es utilizado masivamente en la depuración de efluentes urbanos e industriales al igual que otras sales de hierro. Sin embargo, también posee una gran efectividad para la

generación de flocs en fuentes de agua con bajo material particulado. Por lo que ha sido considerado como una potencial reactivo para la optimización del proceso de coagulación de la planta, así como lo menciona Romero en *Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería*

Para el ensayo de jarras se usó una solución de cloruro férrico al 1,0%

### **Policloruro de aluminio**

Como lo menciona Garcés Paz en su tesis, el policloruro de Aluminio (PAC) es un coagulante inorgánico líquido base policloruro de aluminio, indicado principalmente para remover materia coloreada y coloidal en suspensión en sistemas acuosos, plantas potabilizadoras de agua, afluentes y plantas de tratamiento de efluentes líquidos industriales, como reemplazo de sulfato de aluminio, cloruro férrico y otras sales inorgánicas. Mientras el ácido es neutralizado en el proceso de producción, la parte de aluminio del producto se vuelve más polimerizada, resultando en una mayor carga catiónica y en un aumento de la capacidad de desempeño.

### **6.1 Ensayo de jarras en campo**



*Ilustración 17 Equipo de ensayo de jarras en planta (Fuente Propia)*

Los ensayos se realizaron conforme a los parámetros definidos en la NTC-3909 “Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras”.

Las pruebas de ensayo de jarras para los coagulantes de cloruro férrico y sulfato de aluminio se realizaron tanto en el laboratorio de la PTAP (al momento mismo de obtener la muestra de agua) como en los laboratorios de la universidad Santo Tomás (al día siguiente). A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los ensayos.

### **Ensayos realizados en planta:**

*Tabla 19 Datos iniciales de la muestra obtenida de la planta*

<b>Datos iniciales de la muestra</b>	<b>Unidades</b>
<b>Turbiedad inicial</b>	8,175 NTU
<b>Temperatura</b>	17,6 °C
<b>pH*</b>	5,5

*\*La muestra obtenida se encontrada pre-clorada antes de pasar por el floculador de la planta, lo que explica los bajos niveles en el pH del agua analizada. Como ya se mencionó anteriormente, los operarios de la planta neutralizan la acidez debido al cloro aplicando cal al agua en el mismo momento que se le aplica el coagulante.*

### Sulfato de aluminio (Concentración 1%)

Tabla 20 Turbiedad en función de la dosis (sulfato de aluminio)

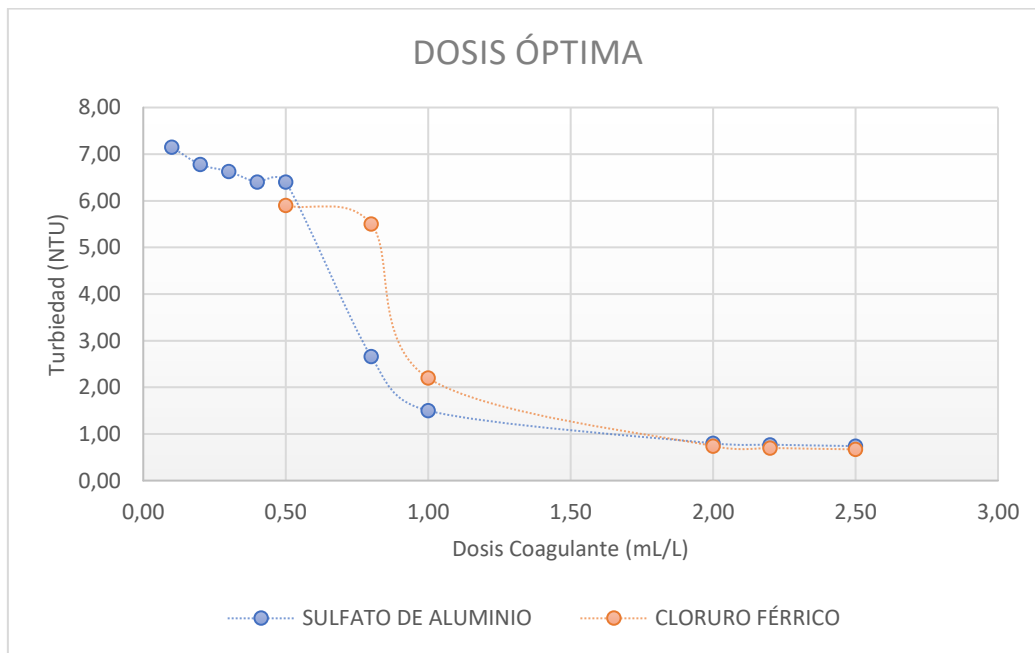
<b>SULFATO DE ALUMINIO</b>				
<b>Muestra</b>	<b>Dosis (mL)</b>	<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>pH</b>	<b>Eficiencia</b>
1	0,10	7,15	7,20	13%
2	0,20	6,78	7,10	17%
3	0,30	6,63	7,30	19%
4	0,40	6,40	7,28	22%
5	0,50	6,40	7,29	22%
6	0,80	2,66	7,30	67%
7	1,00	1,50	7,38	82%
8	2,00	0,80	7,43	90%
9	2,20	0,77	7,44	91%
10	2,50	0,74	7,46	91%

### Cloruro férrico (Concentración 1.0%)

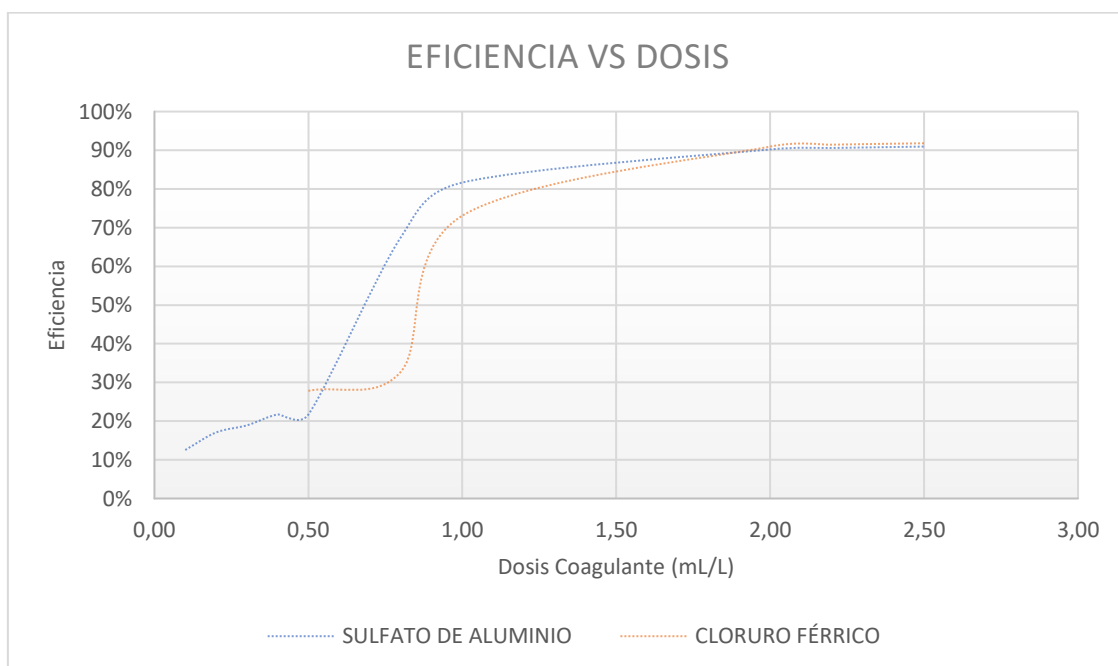
Tabla 21 Turbiedad en función de la dosis (Cloruro férrico)

<b>CLORURO FERRICO</b>				
<b>MUESTRA</b>	<b>DOSIS</b>	<b>TURBIEDAD F,</b>	<b>pH</b>	<b>Eficiencia</b>
1	0,5	5,9	7,70	28%
2	0,8	5,5	7,77	33%
3	1,0	2,2	7,86	73%

<b>4</b>	2,0	0,74	7,63	91%
<b>5</b>	2,2	0,7	7,60	91%
<b>6</b>	2,5	0,68	7,60	92%



*Ilustración 18 Turbiedad en función de la dosis de coagulante en los ensayos realizados en planta*



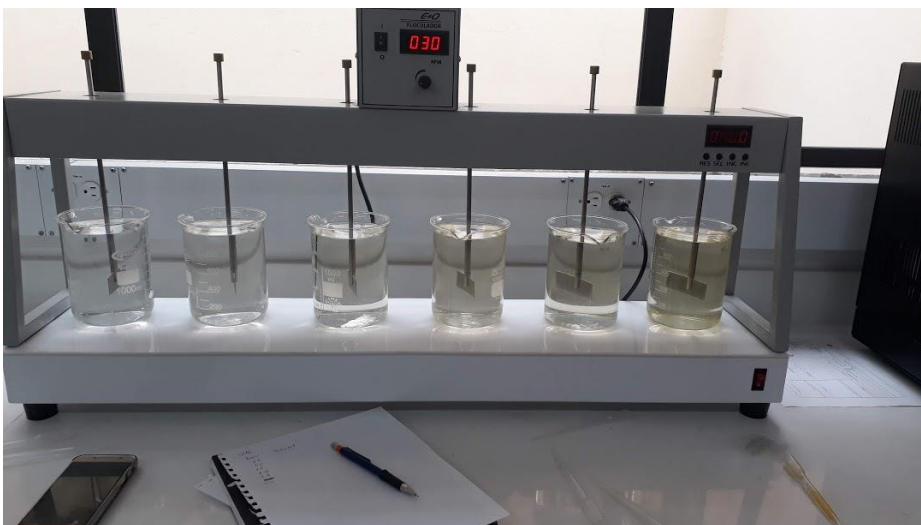
*Ilustración 19 Eficiencia en función de la dosis del coagulante de los ensayos realizados en planta*

Los resultados realizados en la planta arrojaron resultados muy similares para cada uno de los coagulantes utilizados, obteniendo en los dos casos una dosis cercana a los 2mL/L para lograr una óptima eficiencia en la floculación de las partículas sólidas presentes en el agua, lo cual equivale a 0,02mg/L que para un caudal de 15L/s supondría un consumo aproximado de 25kg diarios . De igual manera, el pH no presenta ninguna variación relevante en función de la dosis óptima encontrada para los coagulantes utilizados, por lo que este parámetro no constituiría un limitante para el uso de estos.



*Ilustración 20 Flocs formados con cloruro férrico en planta*

## **6.2 Ensayos de Jarras realizados en laboratorio universitario.**



*Ilustración 21 Equipo de jarras de la USTA*

Los datos presentados a continuación fueron tomados a partir de las muestras de agua tomadas en la planta y evaluados en el laboratorio universitario al día siguiente. (Con excepción del pH, el cual fue medido tan pronto como se tomó la muestra. De esta manera, se tomaron las siguientes consideraciones para el transporte de la muestra:

- \* Envases de almacenamiento de 20 litros de capacidad.
- \* Se garantizó la limpieza de los tanques (se lavaron tres veces con agua de la misma fuente)
- \* Se recogió la muestra sin dejar cámara de aire, o a lo sumo dejando un espacio del 1% de la capacidad del envase.
- \* Se cerró el envase asegurando un cierre hermético.
- \* Se guardó la muestra en lugar fresco (no expuesta al sol, manteniendo la temperatura constante).
- \* Se realizó el ensayo de las muestras en el menor tiempo posible desde su obtención (1 día)
- \* El procedimiento se realizó según las indicaciones del manual para toma y transporte de muestras de agua, el cual se puede consultar en la página web:

<https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacion%20SIVICAP/2011%20Manual%20Otoma%20de%20muestras%20agua.pdf>

*Tabla 22 Datos iniciales de la muestra de agua estudiada en laboratorio universitario*

<b>Datos iniciales de la muestra</b>	<b>Unidades</b>
<b>TURBIEDAD INICIAL</b>	7,23 NTU
<b>TEMPERATURA</b>	17,1 °C
<b>pH</b>	7,66

## Sulfato de aluminio (Concentración 1%)

Tabla 23 Turbiedad en función de la dosis sulfato de aluminio

<b>SULFATO DE ALUMINIO</b>				
<b>MUESTRA</b>	<b>DOSIS</b>	<b>TURBIEDAD F.</b>	<b>pH</b>	<b>EFCIENCIA</b>
<b>1</b>	0	6,51	7,61	10%
<b>2</b>	0,5	5,26	7,60	27%
<b>3</b>	1	3,21	7,56	56%
<b>4</b>	1,5	1,98	7,52	73%
<b>5</b>	2	1,64	7,51	77%
<b>6</b>	2,5	1,58	7,51	78%



Ilustración 22: Flocs formador por sulfato de aluminio

## Cloruro férrico (Concentración 1.0%)

Tabla 24 Turbiedad en función de la dosis (cloruro férrico)

CLORURO FERRICO				
MUESTRA	DOSIS	TURBIEDAD F.	pH	EFCIENCIA
1	0	6,96		4%
2	0,5	5,57		23%
3	1	5,49		24%
4	1,5	2,15		70%
5	2	1,53		79%
6	2,5	1,87		74%

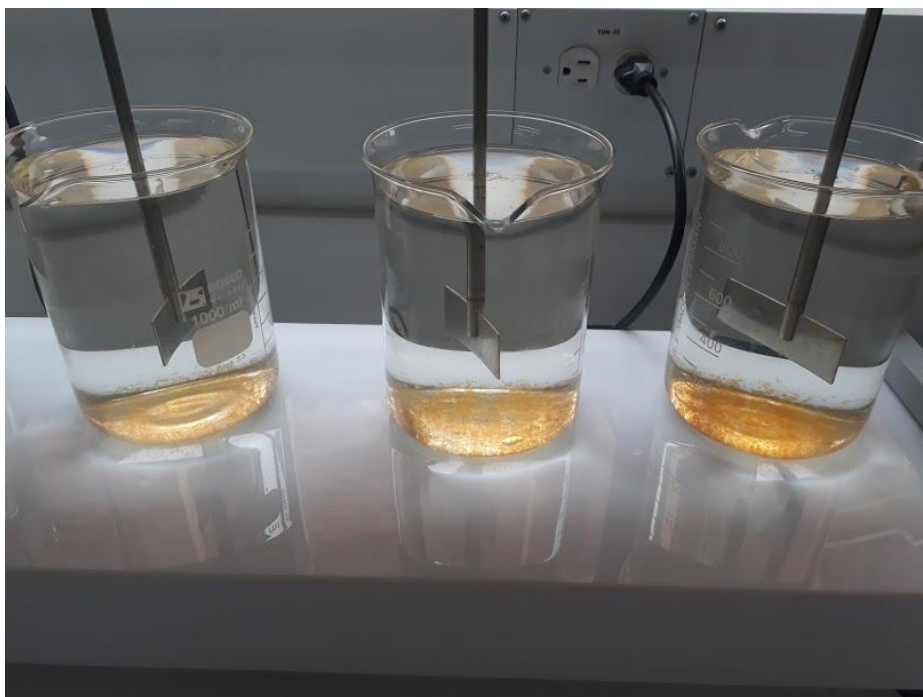


Ilustración 23 flocs formados con cloruro férrico en laboratorios universitario

## Sulfato ferroso (1.0%)

Tabla 25 Turbiedad en función de la dosis (sulfato ferroso)

SULFATO FERROSO				
MUESTRA	DOSIS	TURBIEDAD F.	pH	EFICIENCIA
1	0	6,96		4%
2	0,5	5,32		26%
3	1	4,22		42%
4	1,5	3,90		46%
5	2	4,12		43%
6	3	9,04		-25%



Ilustración 24 flocs formados con sulfato ferroso en laboratorios universitarios

La variación de dosis se incrementó gradualmente con el objetivo de buscar la dosis óptima de cada coagulante. Se realizaron muestras con diferentes incrementos

hasta encontrar una dosis en donde se denotará una clara evidencia de la disminución de la eficiencia (que se hubiera superado la dosis óptima o bien en donde se evidenciase un estancamiento entre la variación en la cantidad de dosis aplicada y la variación del incremento.

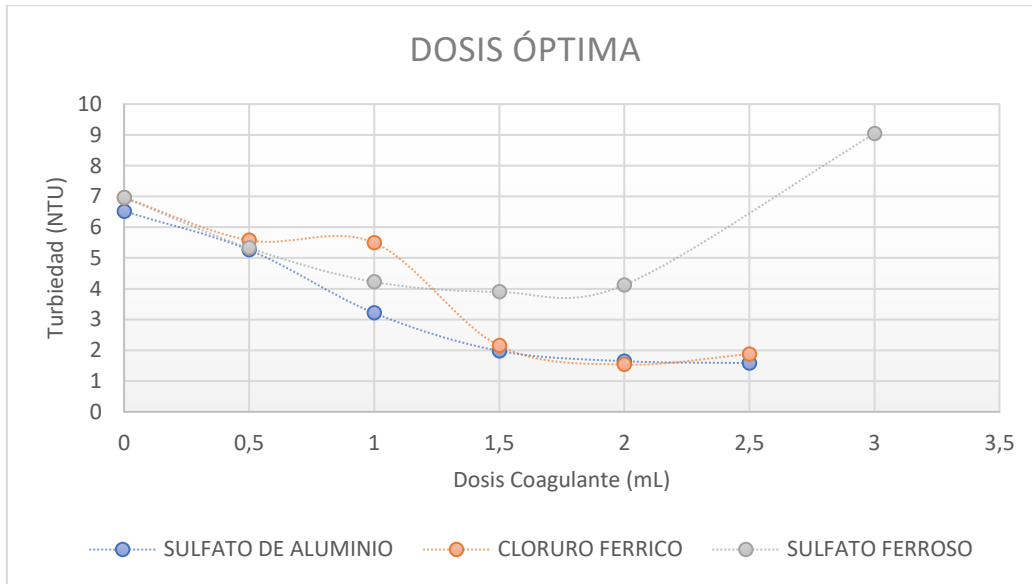


Ilustración 25 Turbiedad en función de la dosis del coagulante los ensayos realizados en el laboratorio universitario

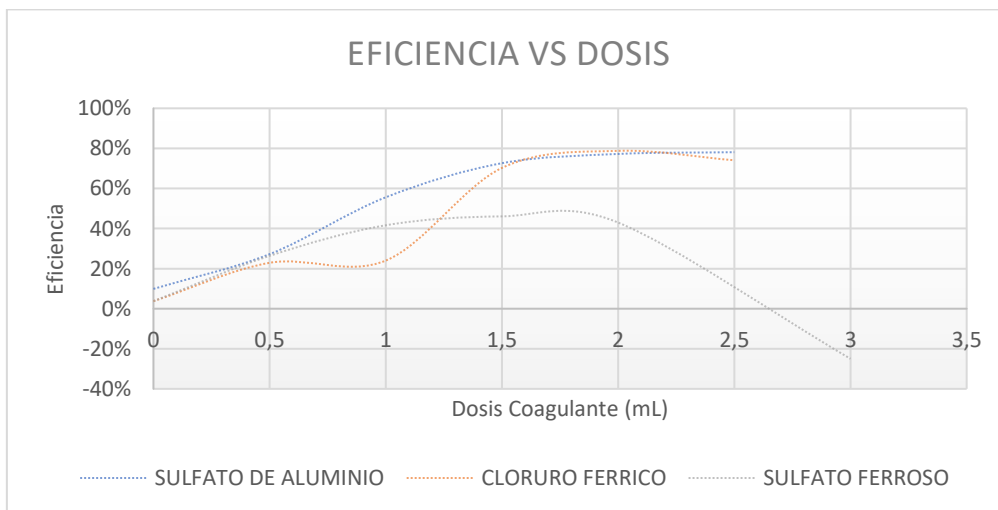


Ilustración 26 Eficiencia en función de la dosis del coagulante los ensayos realizados en el laboratorio universitario

## 6.3 Alcalinidad



*Ilustración 27 Muestras de agua de estudio neutralizadas*

La alcalinidad del agua puede definirse como la capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones de hidrogeno. La determinación de alcalinidad es importante para los procesos de coagulación química, ablandamiento y el control de corrosión. La alcalinidad es debida generalmente a la presencia de tres clases de iones: Bicarbonatos, Carbonatos e hidróxidos.

### 6.3.1 Datos de alcalinidad en laboratorios universitarios

Para la determinación de alcalinidad se hace con dos tipos de muestras y con volúmenes distintos para tener un valor muy aproximado, en una primera parte el cálculo de ácido gastado se hace para el agua después de aplicado el coagulante con su dosis optima y para el agua sin ningún tipo de tratamiento por lo que se tienen los siguientes datos:

Tabla 26 Dosis de ácido en función del volumen de la muestra después de aplicar coagulante

<b>CLORURO FERRICO</b>			
<b>CANTIDAD DE MUESTRA</b>	<b>VOLUMEN INICIAL DE ACIDO (mL)</b>	<b>VOLUMEN FINAL DE ACIDO (mL)</b>	<b>DOSIS (mL)</b>
<b>50</b>	-0.1	0.4	0.5
<b>80</b>	0.4	1.15	0.75
<b>100</b>	1.15	2.05	0.9

Tabla 27 Dosis de ácido en función del volumen de la muestra antes de aplicar coagulante

<b>CLORURO FERRICO</b>			
<b>CANTIDAD DE MUESTRA</b>	<b>VOLUMEN INICIAL DE ACIDO (mL)</b>	<b>VOLUMEN FINAL DE ACIDO (mL)</b>	<b>DOSIS (mL)</b>
<b>50</b>	2.35	2.95	0.6
<b>100</b>	2.95	4.15	1.2

### 6.3.2 Cálculo de la alcalinidad

- **ALCALINIDAD DESPUES DE LA APLICACIÓN DEL COAGULANTE**

$$Va.Na = Vb.Nb$$

$$\frac{Va.Na}{Vb} = Nb$$

$$\frac{0.5 * 0.02}{50} = Nb$$

$$Nb = 2 * (10^{-4}) \frac{Eq}{L}$$

$$Alcalinidad = 2 * 10^{-4} * \frac{50 g CaCO3}{1 Eq CaCO3} * \frac{1000mg}{1g}$$

$$Alcalinidad = 10 \frac{mg}{L}$$

Tabla 28 Alcalinidad de la muestra después de aplicado el coagulante

<b>CANTIDAD DE MUESTRA (ml)</b>	<b>VOLUMEN INICIAL DE ACIDO (ml)</b>	<b>VOLUMEN FINAL DE ACIDO (ml)</b>	<b>DOSIS (ml)</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>
<b>50</b>	-0.1	0.4	0.5	10
<b>80</b>	0.4	1.15	0.75	9.4
<b>100</b>	1.15	2.05	0.9	9

Alcalinidad promedio: 9,5 mg/L

- **ALCALINIDAD ANTES DE LA APLICACIÓN DEL COAGULANTE**

$$Va.Na = Vb.Nb$$

$$\frac{Va.Na}{Vb} = Nb$$

$$\frac{0.6 * 0.02}{50} = Nb$$

$$Nb = 2.4 * (10^{-4}) \frac{Eq}{L}$$

$$Alcalinidad = 2.4 * 10^{-4} * \frac{50 g CaCO3}{1 Eq CaCO3} * \frac{1000mg}{1g}$$

$$Alcalinidad = 12 \frac{mg}{L}$$

Tabla 29 Alcalinidad de la muestra antes de aplicado el coagulante

<b>CANTIDAD DE MUESTRA (ml)</b>	<b>VOLUMEN INICIAL DE ACIDO (ml)</b>	<b>VOLUMEN FINAL DE ACIDO (ml)</b>	<b>DOSIS (ml)</b>	<b>Alcalinidad (mg/l)</b>
<b>50</b>	2.35	2.95	0.6	12
<b>100</b>	2.95	4.15	1.2	12

*Alcalinidad promedio: 12 mg/L*

### **6.3.3 Conclusiones de ensayos de laboratorio**

- El sulfato ferroso presento un comportamiento poco satisfactorio para las características del agua estudiada. Este coagulante presento una dosis óptima de 1.5mL/L para una eficiencia de 46%. De igual manera, se evidencia que al aumentar la dosis del coagulante a un valor superior al de la dosis óptima, la turbidez comienza a aumentar proporcionalmente (disminuyendo la eficiencia), acrecentándola a un nivel mayor del valor inicial presentado en el agua. De esta forma se descarta el uso de este componente químico como coagulante.
- Los coagulantes de cloruro férrico y sulfato de aluminio presentaron una eficiencia menor en los ensayos realizados en el laboratorio de la universidad que en los ensayos realizados en campo (16% menor, aproximadamente). Sin embargo, este dato es explicable debido a que durante el transporte y el almacenamiento de la muestra las partículas más grandes debieron sedimentarse sin necesidad de coagulantes, reduciendo de esta forma la turbidez inicial de la muestra y disminuyendo la cantidad de material potencialmente precipitable. Esto puede ser fácilmente comprobado observando los datos iniciales de turbidez de cada una de las muestras.

- Los valores obtenidos para las dosis óptimas para los coagulantes de cloruro férrico como de sulfato de aluminio se encuentran alrededor de 2mL/L, tanto en el laboratorio de la planta como en el laboratorio de la universidad (independientemente de los valores de eficiencia).
- El cloruro férrico presenta una eficiencia óptima superior al sulfato de aluminio. Sin embargo, debido a que la diferencia no es lo suficientemente relevante y a que el cloruro férrico es más agresivo en cuanto a la pigmentación que este puede llegar a producir si no se maneja con cuidado, se recomienda continuar usando sulfato de aluminio como coagulante con una dosis de 2mL/L a una concentración de 1% (o cualquier dupla concentración-dosis equivalente).

## 1. DIAGNÓSTICO DE LA PTAP “LA CHICA”

### FOTO

### DESCRIPCIÓN



**Clarificador de manto de lodos:** Es la estructura que abarca todos los procesos unitarios de tratamiento de agua. En este caso se realiza la floculación en sedimentación en el anillo exterior del tanque y la filtración en el anillo interior.



**Caja de válvulas de lavado:** Son las válvulas que se accionan cuando el filtro se colmata o el floculador este se encuentra saturado sucio. Permitiendo a si la salida de los lodos de estos elementos en los momentos correspondientes.



**Cámara de entrada:** El agua llega desde la PTAP La Mesa por gravedad hasta la primera cámara ubicada en la parte superior del tanque. En esta cámara el agua es preclorada para evitar aparición de algas dentro del tanque.



---

**Dosificador:** se encuentra después del canal de entrada, sin embargo, en la actualidad este elemento se encuentra descompuesto, debido a que la bomba que se encarga de la mezcla del coagulante con el agua no se encuentra en funcionamiento



**Aforo y coagulación:** En esta sección se encuentra el aforo, el cual consta de un vertedero triangular y una regleta. De igual manera la dosificación del coagulante es aplicada allí proveniente del tanque dosificador.



**Tanque dosificador:** Tanque que se usa como plan “B” debido a que el dosificador principal se encuentra descompuesto. El coagulante es aplicado directamente en seco en este tanque, donde se disuelve con una escoba y se vierte dentro de la cámara de aforo.

---



---

**Floculador/sedimentador:** Es el anillo externo de la planta compacta. Es la estructura más robusta ya que es el que hace el proceso con mayor requerimiento de TRH. El agua entra a éste elemento desde la zona inferior y asciende en lentamente, con una trayectoria circular hasta ser recolectada por la canaleta de recolección. Los flocs formados se sedimentan en su base, la cual es lavada manualmente cada tres o cuatro aproximadamente.



**Cámara de distribución:** Es la cámara que recibe el agua del aforo y/o mezclador rápido proveniente del canal de entrada y permite disipar la energía proveniente de la diferencia de cotas entre la zona superior e inferior del tanque. Conecta el canal de entrada sistema con la zona inferior del floculador/sedimentador.

---



---

**Canal de recolección:** Es el canal blanco que este paralelo a la plataforma. El cual tiene una pestaña más alta que la otra para que pueda recolectar el agua por un solo costado. Este canal dirige el agua desde el floculador hacia el canal de distribución.



**Canal de distribución:** Es un canal perimetral (tipo anillo) más robusto que el anterior que tiene el objetivo de transportar el agua, una vez sedimentada, hasta una tubería descensional en la zona opuesta del anillo que conduce el agua hasta el filtro de interno de la PTAT. El canal no se encuentra pintado en su totalidad por lo que presenta síntomas de corrosión y oxidación especialmente en su cara externa.

---



---

### **Entrada tubería**

**descensional:** Este es un tubo de 8" que comunica el canal de distribución con la cámara de entrada al filtro. Se encuentra cubierta con una rejilla para evitar la entrada de grandes elementos que puedan llegar a obstruir los filtros.

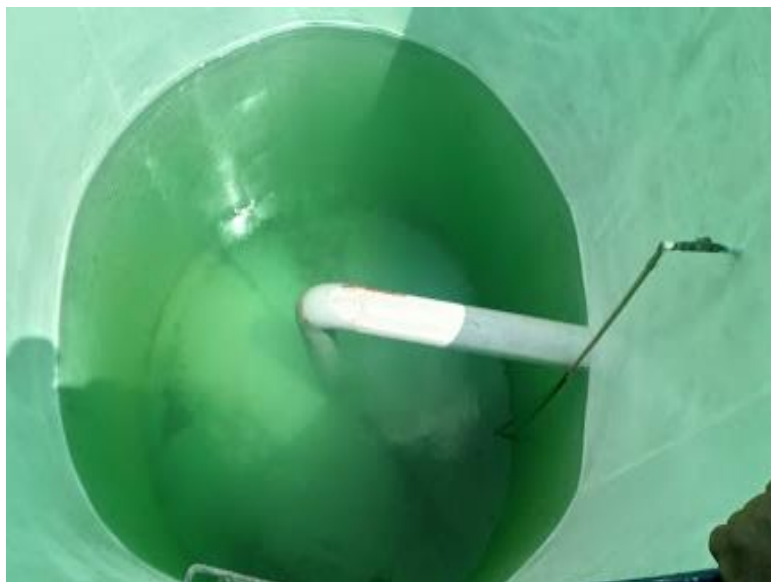


**Cobra:** Es un tubo de 2" que proviene de la cámara de entrada al filtro. Tiene la función de purgar el aire atrapado en la cámara proveniente de la tubería descensional. La cobra desemboca en la parte superior del canal de distribución, devolviendo el agua al tanque de sedimentación.



---

**Embudo:** Es un vertedero de excesos, que está conformado por un tubo de media y un embudo, ayuda al lavado. Este permite evacuar el excedente de agua del tanque de sedimentación cuando esta sobrepasa el nivel del canal de recolección. Sin embargo, la cota de entrada al embudo está ubicada por encima del nivel de recolección del canal, lo que no permite su correcto funcionamiento.



**Filtro y tanque interior:** En la imagen superior se observa el almacenamiento del filtro el cual es un cilindro de  $r=1,5m$ . El lavado automático del filtro no se encuentra en funcionamiento posiblemente a los bajos coeficientes de pérdidas de sus lechos granulares. Como ya se explica en el funcionamiento de la planta. El tanque posee dos rejillas de entrada diametralmente opuestas en la base.



---

**Cámara de zona de filtros:**

(La que se encuentra entre la escotilla y la escalera en la fotografía) Son dos cámaras ubicadas a cada extremo del tanque del filtro, el cual permite que el agua pase del lecho filtrante a la zona superior. En otras palabras dichas cámaras comunican la salida de los filtros con las rejillas de entrada del taque interior.



**Tubería de lavado:** es un sistema de sifones con purgas y válvulas, el sifón está compuesto por un tubo de 8" y de ½". Esta permite la evacuación del agua de los filtros cuando estos están siendo lavados. De igual la tubería de ½" conectada a la zona superior del sifón se encuentra conectada a la zona inferior del tanque inferior, permitiendo detener el proceso de lavado, a través de la inyección de aire al sifón cuando el tanque interior se desocupa.

---



---

**Compuertas de acceso a filtros:**

Son accesos directos al lecho filtrante para los posibles mantenimientos de las arenas, antracitas y falso fondo los cuales se encuentran ubicados bajo el tanque interior. Se encuentra alto grado de oxidación en las compuertas.



**Escaleras:** Son los accesos de la parte superior del tanque al inferior usados para el lavado del tanque Floculador /Sedimentador.

Son dos accesos que están ubicados uno en cada extremo.

---

*Tabla -30 Imágenes tomadas en campo y su descripción*

En las visitas a campo que se desarrollaron se realiza un registro fotográfico, de cada uno de los elementos que componen la planta, hay que tener en cuenta que hace menos de 6 meses se desarrolló mantenimiento a la planta y aunque se encuentra estéticamente aceptable, hay elementos que se han oxidado, por lo que se recomienda aplicar una capa

de pintura anticorrosiva no tóxica para así evitar el contacto del acero con el oxígeno del agua.

Estructuras como la cámara de distribución, canaleta de recolección, dosificador y embudo están en un estado insatisfactorio, debido a que no están cumpliendo bien con su función o están afectando con el tratamiento del agua. En el caso de la cámara de distribución y la canaleta de recolección tienen una degradación que genera desprendimiento de material de estas, lo que hace que se generen más sedimentos, es decir que se forme una contaminación residual debida al mal estado de esta. Además, el óxido y las degradaciones que estas tienen están afectando el flujo de agua, lo que puede provocar rupturas de los flocs lo que con lleva a una baja sedimentación y por consiguiente una clarificación deficiente.

En el caso del dosificador y el embudo, no están cumpliendo en este momento con la función para la que fueron diseñados; el dosificador está totalmente averiado no tiene ningún uso en la planta y el embudo no está haciendo la burbuja la cual informaba cuando se debían de abrir las válvulas de lavado, esto dejo de funcionar desde la vez que se hizo el mantenimiento a la planta, es decir que el lavado de filtros no se está desarrollando de manera efectiva.

Por otro lado, el aforo de la planta es muy aproximado, sin embargo, se registraba un rango de caudal que está entre los 15-20 lt/s, cuando se desarrollaron las pruebas de laboratorio en planta se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 31 Datos de eficiencia tomados en planta

<b>Caudal (L/s)</b>	<b>Turbiedad en la entrada (NTU)</b>	<b>Turbiedad en la salida (NTU)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>20</b>	5,2	5,1	1,9
<b>20</b>	7,5	4	46,66
<b>15</b>	9	2	77,78

En la anterior tabla se observa una eficiencia baja en el primer escenario, esto puede suceder por dos razones: la primera es que no se esté dosificando para el caudal de llegada o que debido a la turbiedad tan baja de llegada y el caudal tan grande el manto de lodos no tenga ningún tipo de eficiencia y todo el tratamiento se le deje al filtro. Lo que convierte a la planta en solo un tanque de almacenamiento dando como resultado que el lavado del filtro tenga que ser más frecuente y así dar gastos de agua elevados por lo que lleva a sobrecostos en el tratamiento por lo que puede ser una explicación de porque el acueducto de Anapoima no logre abastecer la demanda de la población, problema que va siendo más grande a medida que crece el municipio en número de habitantes.

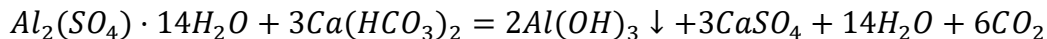
También se reporta que en temporada de invierno cuando la turbiedad sube a más de 100 NTU la PTAP La Chica no desarrollaba ningún tipo de tratamiento, y toda la responsabilidad se delegaba a la PTAP de La Mesa. Esto se debe a que la planta de La Chica si trata el agua con toda esta turbiedad se colmataría muy rápido y el lavado de la planta se deberían de desarrollar con mayor frecuencia lo que no es factible económicamente.

En resumen, es una PTAP muy antigua que para una optimización de procesos que cumpla con las necesidades del municipio hay que anexarle unidades extra como un sedimentador o por lo menos un desarenador que cumpla con la función de ayudar en época de invierno a remover sólidos y turbiedad y así amortiguarle el trabajo al clarificador de lodos y por consiguiente al filtro, evitando lavados frecuentes y desperdicios de agua. Aunque anexarle una unidad independiente a la planta pueda que rompa totalmente la esencia de una PTAP compacta que lo que busca es disminuir tareas y algo de costos.

## 8. TRATAMIENTO DE LODOS.

### 8.1 Cantidades de lodo producidas en el floculador:

Los residuos producidos por la coagulación química se concentran principalmente en el tanque de floculación-sedimentación. Este lodo se encuentra compuesto del precipitado de aluminio proveniente del coagulante utilizado (y que se recomienda seguir usando), al igual que por el material orgánico e inorgánico removido, tales como arcillas y limos (para los materiales arenosos se asumen que cerca de su totalidad fue removida por el sedimentador externo de la planta). Como en la mayoría de los casos ocurre y debido a la calidad del agua tratada, no hay razones para suponer que los lodos producidos por la planta son inestables o puedan producir problemas de septicidad. Teniendo en cuenta que el coagulante óptimo a utilizar para la floculación del agua es el sulfato de aluminio. Se tiene la siguiente reacción:



De donde se puede deducir que 1mg/L de alumbre produce 0.26mg/L de precipitado. (Si se realiza el análisis químico para el cloruro férrico se obtienen 0.66mg/L de precipitado, lo cual implica una producción de lodo casi tres veces mayor a la producida por el alumbre). De igual manera se presenta a continuación algunas características de los lodos de sales de aluminio.

Tabla 32: Romero Rojas, Pág. 314

<b>Características de lodos de sales de aluminio</b>	
<b>pH</b>	6 a 8
<b>DBO</b>	30 a 300 mg/L
<b>DQO</b>	30 a 5000 mg/L
<b>Sólidos</b>	1% a 2%
<b>Color</b>	Gris a Marrón
<b>Olor</b>	Inodoro
<b>Volumen</b>	20 a 50 L/m <sup>3</sup>
<b>Conteo Bacterial</b>	Alto

<b>Sedimentabilidad</b>	50% en 8h
<b>Secado</b>	Dos días sobre los lechos de arena para 10% de sólidos
<b>*Se suponen DQO mínimas debido a la calidad del agua</b>	

Según Romero Rojas, se puede suponer que para aguas coaguladas los sólidos suspendidos en mg/L son aproximadamente iguales a la turbiedad en NTU. De esta forma la cantidad total de lodo se calcula de la manera siguiente:

Lodo seco de alumbre= Turbiedad + Precipitado de aluminio

$$W = (S + 0.3D)Q \times 10^{-3}$$

- Donde:
- W: kg de lodo seco de alumbre
  - S: Turbiedad del agua cruda en UNT
  - D: Dosis de alumbre en mg/L
  - Q: Metros cúbicos de agua tratada

Para los parámetros de funcionamiento óptimo de la planta se tienen los siguientes valores:

<b>S</b>	<b>Turbiedad promedio (UNT)</b>	<b>7.0</b>
<b>D</b>	<b>Dosis de alumbre (mg/L)</b>	<b>2.0</b>
<b>Q</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>1296</b>

$$W = (7.0 + (0.3) \times (2.0)) \cdot 1296 \times 10^{-3} = 9.849kg/día$$

Tomando en cuenta los valores típicos de los lodos producidos por el alumbre, se supone un material con contenido de sólidos de 2% y densidad relativa igual a 1.01 el volumen del lodo sería:

$$\text{Masa diaria de lodo (humedo)} = \frac{9.849}{0.02} = 492.5 \text{ kg/día}$$

$$\text{Volumen diario de lodo (humedo)} = \frac{9.849}{1010} = 0.429 \text{ m}^3/\text{día}$$

Ahora bien, si se tiene en cuenta las dimensiones del tanque, el cual posee un área superficial de  $62.3\text{m}^2$ , se tiene que el incremento semanal de la lámina de lodos será:

$$\text{Incremento lámina de lodos}_{\text{semanal}} = 7\text{días} \times \frac{0.429 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{62.3\text{m}^2} \approx 5\text{cm}$$

De esta forma, se recomienda un lavado del floculador cada 3 meses, tiempo en el que se obtiene una lámina de lodos de aproximadamente 60cm de altura y volumen equivalente de  $38.61\text{m}^3$ .

De esta forma:

Producción de lodos mensual en floculador:  $12.9\text{m}^3$

Incremento de la lámina de lodos dentro del tanque mensualmente: 20cm

## 8.2 Cantidades de lodo producidas en el filtro:

La operación de lavado de filtros genera agua residual de concentración baja de sólidos.

Dicha cantidad puede ser del orden del 2% para la calidad del agua a tratar. De igual manera, se presenta a continuación algunas características de los lodos producidos por el agua del lavado de filtros:

Tabla 33: Características de agua de lavado

<b>Características de aguas lavado de filtros</b>	
<b>Sólidos suspendidos</b>	0,01% a 0,1%
<b>DBO</b>	2 a 10 mg/L
<b>DQO</b>	28 a 160 mg/L
<b>pH</b>	6,8 a 7,8

<b>Color</b>	Gris - Marrón - Negro
<b>Olor</b>	Inodoro
<b>Conteo bacterial</b>	Alto
<b>Sedimentabilidad</b>	80% de 2 a 24 horas
<b>Secado</b>	Mediante sedimentación

Para el cálculo de producción de lodos por el filtro se asume una dosificación de floculante menor a la sugerida por los ensayos de jarras en caso de que por motivos económicos se pretenda usar dosificaciones menores a las ideales.

De esta forma se realizarán los cálculos con las turbiedades de salida del floculador de 2.66 UNT correspondientes a una dosis de 0.8mL/L.

Si se tiene en cuenta que los resultados de turbiedad obtenidos al final del proceso de potabilización presentan valor promedio de 0.8UNT, se tienen los siguientes cálculos.

Turbiedad de entrada\*: 2.66 mg/L

Turbiedad de salida\*: 0.8mg/L

Caudal diario: 1296 m<sup>3</sup>/día

\* Se supone que para aguas coaguladas los sólidos suspendidos en mg/L son aproximadamente iguales a la turbiedad en NTU

$$Eficiencia_{Filtro} = \left( \frac{Turb_{ent} - Turb_{sal}}{Turb_{ent}} \right) = \frac{2.66 - 0.80}{2.66} = 0.70 \rightarrow 70\%$$

Para los valores dados se obtiene una eficiencia estimada del 70% de remoción de sólidos dentro del filtro. Estas cantidades pueden variar en función de la turbiedad de entrada.

*Cantidad retenida:*  $2,66 - 0,80 = 1,86\text{mg/L}$

$$\text{Peso seco retenido diario} = 1,86 \times 1296 \times 10^3 = 2,4\text{kg/día}$$

$$\text{Peso retenido diario}_{\text{humedo}} = \frac{2,4}{0,02} = 120\text{kg/día}$$

$$\text{Volumen retenido diario} = \frac{120}{1010} = 0,120\text{m}^3/\text{día}$$

Se recomienda como parte del procedimiento que el lavado de filtros se realice una vez cada 7 días, obteniendo un volumen de lodos producido dentro del filtro de  $0,84\text{m}^3/7$  días.

### **8.3 Diseño de lechos de secado de lodos:**

Para el tratamiento de los lodos se recomienda un método básico de lechos de secado, el cual remueve el exceso de agua por gravedad y concentra los sólidos por medio de filtración. De igual manera el agua decantada se puede disponer para usos de riego.

Los lechos están equipados con una base de arena y grava y una tubería de drenaje. Según recomendaciones, el número mínimo de lechos debe ser dos, con drenaje en tubería perforada de 4", capa de arena de 15 a 25cm de tamaño efectivo de 0.3mm a 1.2mm y lecho de grava de 20 a 30cm de espesor. De esta manera, se proponen 3 unidades de lechos de secado; 2 para el secado de lodos provenientes del floculador y las aguas provenientes del filtro, los cuales poseen los siguientes parámetros.

Lechos para lodos del floculador:

- Periodo de retención: 90 días
- Volumen de diseño:  $38.61\text{m}^3$
- Número de unidades: 2
- Espesor capa de grava: 30cm
- Espesor capa de arena: 25cm

- Altura efectiva lodos: 60cm
- Profundidad total: 120cm
- El área superficial de los lechos se calcula en función del volumen de lodos y la altura establecida para su disposición:

$$\text{Área}_{sup} = \frac{\text{Volumen de lodos}}{\text{Altura efectiva de lodos}} = \frac{38,6m^3}{0,60m} = 64,3$$

*Ecuación 22 Area de el lecho de lodos (m<sup>2</sup>)*

- $\frac{\text{Área}_{sup}}{\text{Unidad}} = 32.175m^2$

- Para el área calculada se establecen las siguientes dimensiones:
  - **Largo: 5,7m**
  - **Ancho:5,64**
  - **Altura: 1,2m**

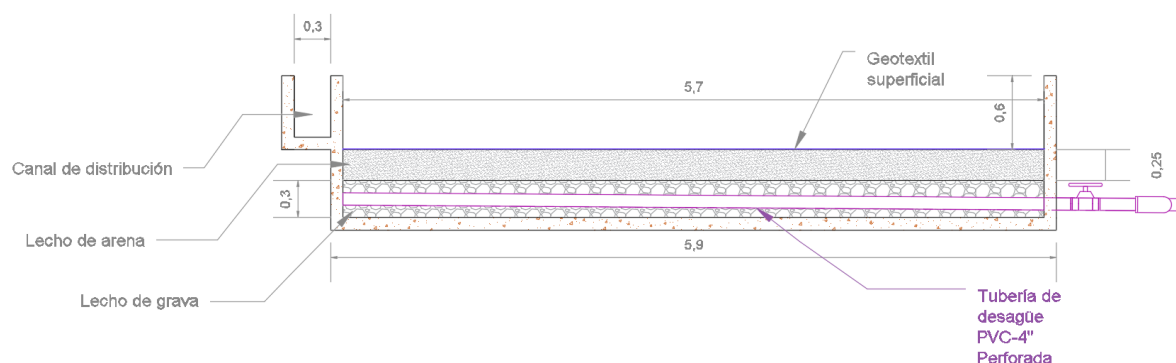
Lechos para lodos del filtro:

- Periodo de retención: 7 días
- Volumen de diseño: 0,84m<sup>3</sup>
- Número de unidades: 1
- Espesor capa de grava: 30cm
- Espesor capa de arena: 25cm
- Altura efectiva lodos: 60cm
- Profundidad total: 120cm
- El área superficial de los lechos se calcula en función del volumen de lodos y la altura establecida para su disposición:

- $\text{Área}_{sup} = \frac{\text{Volumen de lodos}}{\text{Altura efectiva de lodos}} = \frac{0,84m^3}{0,60m} = 1,4m^2$

- Para el área calculado se establecen las siguientes dimensiones:
  - **Largo: 5,7m**
  - **Ancho: 1,4**
  - **Altura: 1,2m**

La tubería de drenaje debe ser tubería PVC preferiblemente. Igualmente, se recomienda instalar un geo-textil sobre el manto de arena de los lechos para garantizar una mejor filtración y facilitar la remoción de los lodos en el momento de que estos deban ser dispuestos. De igual manera, es recomendable instalar una tubería de drenaje cada 2 metros a lo ancho de los lechos si la geometría de estos lo permite lo que implica que para los lechos del floculador se instalarán 3 tuberías equidistantes por unidad, con un diámetro de 4” cada una, mientras que el lecho para el filtro poseerá 1 (una) tubería de las mismas características. Para una mayor eficiencia en la recolección del agua se recomienda generar pendientes transversales en la base del lecho para dirigir el agua hacia las tuberías de recolección. **El lecho de secado debe encontrarse techado para protegerlo de posibles precipitaciones, las cuales afectarían de gran manera el tratamiento.** A continuación, se presenta el esquema de corte del lecho de secado. El diseño se encuentra en el plano 6 “Lecho de secado de lodos”.



*Ilustración 28: Esquema Corte lecho de secado (Fuente propia)*

El agua filtrada en lecho será recolectada mediante las tuberías perforadas y dirigidas a un pozo de recolección, desde dónde será recirculada mediante bombeo para ser tratada nuevamente en la planta.

Asimismo, existen otros métodos de tratamientos de lodos tales como lo son entre otros:

- Los métodos por espesamiento
- Los métodos por desagüe y secado
- Los filtros de vacío para secado
- Los filtros de prensa de correas
- Los procesos de congelamiento

Sin embargo, debido al costo y/o a la complejidad de funcionamiento, se optó por el diseño presentado, el cual presenta la ventaja de una operación sencilla a bajo costo a cambio de un área significativa de espacio para realizar el tratamiento, área que se posee dentro del lote donde se encuentra la planta. Adjunto al presente documento se presentarán los planos de los diseños de los lechos de secados de lodos.

De igual manera, una vez transcurra el periodo de retención, los lodos deben ser retirados de los lechos por un operario. Y su disposición debe realizarse según lo establecido en las resoluciones legales pertinentes. Es oportuno mencionar que dichos lodos poseen gran cantidad de sulfatos y metales provenientes de los coagulantes, por lo que su disposición no debe tomarse a la ligera. Si se plantea la posibilidad de depositarlos en la PTAP, es necesario evaluar el riesgo de erosión por lluvia que pueda presentarse en el terreno y reducirlo a su mínima expresión mediante la habilitación de zonas amplias con pendientes cercanas a cero o construyendo muros de contención que retengan el material. Sin embargo, ya que lo anterior puede salir demasiado costoso, se

recomienda que dichos residuos sólidos sean retirados de la planta y trasladados a un relleno sanitario.

## 5. CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Levantamiento y dibujo de planos

- El levantamiento de la planta en campo se realizó con una estación total. Sin embargo, debido a la configuración compacta de la planta, dicho levantamiento se limitó a confirmar las medidas geométricas generales de la misma (tales como diámetros y alturas).
- No se realizó georeferenciación de la planta debido a que ya se poseían planos anteriores con los posicionamientos de la unidad en coordenadas MAGNA SIRGAS. Por lo que, en cuanto a la localización el proyecto se limitó a actualizar dichos planos ya existentes.
- Debido a la configuración compacta y circular de la planta, el levantamiento de las unidades que se encuentran dentro de los tanques se realizó a partir de mediciones con cinta métrica, el día que la unidad compacta fue desocupada para su correspondiente lavado. Por lo que, si bien el trabajo de medición de la unidades se hizo con absoluta rigurosidad, es pertinente advertir que, debido a los equipos utilizados, los planos realizados deben ser considerados como un “levantamiento aproximado” de la planta.
- Se desarrollan de esta manera 5 planos (Planos 1-5). Los cuales incluyen dos vistas en planta de la PTAP compacta desde diferentes niveles. Dos cortes con las tuberías y unidades interiores. Detalles de la cámara de distribución, canales de recolección y canales de aforo y dosificación.

## 9.2 Dosificación de coagulantes

- El sulfato ferroso presento un comportamiento poco satisfactorio para las características del agua estudiada. Este coagulante presento una dosis óptima de 1.5mL/L para una eficiencia de 46%.
- Los valores obtenidos para las dosis óptimas para los coagulantes de cloruro férrico como de sulfato de aluminio se encuentran alrededor de 2mL/L, tanto en el laboratorio de la planta como un el laboratorio de la universidad (independientemente de los valores de eficiencia).
- El cloruro férrico presenta una eficiencia óptima superior al sulfato de aluminio. Sin embargo, debido a que la diferencia no es lo suficientemente relevante y a que el cloruro férrico es más agresivo en cuanto a la pigmentación que este puede llegar a producir si no se maneja con cuidado, se recomienda continuar usando sulfato de aluminio como coagulante con una dosis de 2mL/L a una concentración de 1% (o cualquier dupla concentración-dosis equivalente).

## 9.3 Diagnóstico planta

- Se encuentra que la planta de tratamiento en ocasiones trata mas caudal para la que fue diseñada (20 lps), en estos lapsos de tiempo el floculador posee una eficiencia muy baja, por lo que el filtro termina haciendo un trabajo de filtrado más arduo, así que se colmata de manera rápida y se deben de realizar lavados más frecuentes. En otras palabras, cuando la planta supera el caudal para la que fue diseñada, se impide la sedimentación de las partículas debido al incremento en la velocidad del agua. Por lo que el tratamiento en este caso quedaría limitado tan sólo a los procesos de filtración y posterior desinfección.
- Se evidencia que a partir del mantenimiento realizado al lecho filtrante a comienzos del año anterior (2018), el funcionamiento automático ha dejado de

trabajar correctamente por lo que tiene que ser asistido por el personal de la planta. Más específicamente, es necesario mantener cerrada la válvula de la tubería sifón para el proceso de filtrado y en el momento de realizar el lavado es indispensable abrir dicha válvula y la válvula de la tubería que se encarga de dirigir el agua desde el tanque interior a los tanques de almacenamiento. Lo anterior puede estar ocurriendo debido a que el lecho filtrante actual posee una conductividad hidráulica demasiado alta como para generar diferencias de energía lo suficientemente altas entre cada una de las interfaces ya antes mencionado.

- La eficiencia de la planta tiende a ser baja debido a que la fuente de agua es poco turbia en épocas de verano, lo que hace que se convierta un proceso complejo para la PTAP remover tan pocas partículas, generando la necesidad de una dosificación más alta de coagulantes. Como es bien sabido los niveles bajos de turbiedad son difíciles de remover. Por el contrario, en época de lluvias el agua baja con una turbiedad tan grande que la planta no se puede poner a funcionar para un tratamiento de agua, debido a que el filtro se colmata. Por lo que se recomienda bajar los niveles de caudal de la planta para permitir una mejor sedimentación.
- La planta presenta problemas básicos de mantenimiento, tales como alto grado de oxidación de la cámara de distribución, y demás elementos metálicos sumergidos. Igualmente, esta no se encuentra pintada en su totalidad en su zona interior, lo cual genera que se acumulen residuos en sus paredes y potencia el riesgo de la proliferación de microorganismos.

#### 9.4 Diseño de tratamiento de lodos

- Se recomienda un lavado del floculador cada 3 meses, tiempo en el que se obtiene una lámina de lodos de aproximadamente 60cm de altura y volumen equivalente de  $38.61\text{m}^3$ .
- Los lechos están equipados con una base de arena y grava y una tubería de drenaje. Se diseñan dos lechos con drenaje en tubería perforada de 4", capa de arena de 15 a 25cm de tamaño efectivo de 0.3mm a 1.2mm y lecho de grava de 20 a 30cm de espesor. De esta manera, se proponen 3 unidades de lechos de secado; 2 para el secado de lodos provenientes del floculador y las aguas provenientes del filtro, los cuales poseen los siguientes parámetros.
- Se recomienda que dichos residuos sólidos sean retirados de la planta y trasladados a un relleno sanitario. Ya que, si se plantea la posibilidad de depositarlos en la PTAP, es necesario evaluar el riesgo de erosión por lluvia que pueda presentarse en el terreno y reducirlo a su mínima expresión mediante la habilitación de zonas amplias con pendientes cercanas a cero o construyendo muros de contención que retengan el material. Sin embargo, aquello puede generar altos costos de inversión.

## Anexos

### Presupuesto para los lechos de secado

A continuación, se presentan los valores estimados para el año 2019 para la construcción de los lechos de secado para el tratamiento de los lodos producidos por la planta.

Análisis de precios unitarios:

---

#### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

##### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU

Concreto 3000 Psi En Obra				Unidad	M3	
Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 123,666</b>
1.1	Arena de rio	M3	0.56		\$ 88,333	\$ 49,466
1.2	Gravilla de 1/2"	M3	0.84		\$ 88,333	\$ 74,200
<b>2</b>	<b>CEMENTO</b>					<b>\$ 138,845</b>
2.1	Cemento Cemex Súper resistente (bulto 50 Kg.)	Kg	350		\$ 397	\$ 138,845
<b>3</b>	<b>Agua</b>					<b>\$ 1,260</b>
2.1	Agua	m3	0.18		\$ 7,000	\$ 1,260
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 42,077</b>
4.1	Mezcladora	Hora	0.19		\$ 83,300	\$ 15,827
4.2	Cuadrilla Lian (Ayudante*4)	Día	0.19		\$ 140,000	\$ 26,250
<b>CONCRETO 3000 PSI EN OBRA</b>				<b>COSTO DIRECTO</b>		<b>\$ 305,848</b>

---

#### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

##### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU

Muro doble en ladrillo tolete (0.2x.1x.06)	Unidad	M2
--------------------------------------------	--------	----

---

Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 155,263</b>
1.1	Ladrillo tolete	und	170.00		\$ 600	\$ 102,000
1.2	Mortero 1:2	m3	0.20		\$ 266,313	\$ 53,263
<b>3</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 37,500</b>
2.1	Carretilla, palustre, boquillera, balde	glb	1.00		\$ 37,500	\$ 37,500
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 24,500</b>
4.1	mano de obra	m2	1.00		\$ 24,500	\$ 24,500
<b>Muro doble en ladrillo tolete (0.2x.1x.06)</b>					<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 217,263</b>

---

#### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

#### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU

Mortero 1:2						Unidad	M3
Íte m	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total	
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 54,000</b>	
1.1	Arena de peña	und	1.00		\$ 54,000	\$ 54,000	
<b>2</b>	<b>CEMENTO</b>					<b>\$ 165,226</b>	
2.1	Cemento Cemex Súper resistente (bulto 50 Kg.)	Kg	350		\$ 472	\$ 165,226	
<b>3</b>	<b>Agua</b>					<b>\$ 1,260</b>	
2.1	Agua	m3	0.18		\$ 7,000	\$ 1,260	
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 45,827</b>	
4.1	Mezcladora	Hora	0.19		\$ 83,300	\$ 15,827	
4.2	Cuadrilla Lian (Ayudante*4)	Día	0.19		\$ 160,000	\$ 30,000	
<b>Mortero 1:2</b>					<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 266,313</b>	

---

**PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS**

---

**ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU**

<b>Viga 0.3x0.3</b>						<b>Unidad</b>	<b>ML</b>
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Cant vol.</b>	<b>Valor Und</b>	<b>Valor Total</b>	
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 115,876</b>	
1.1	Acero Transversal 3/8"	und	2.00		\$ 9,800	\$ 19,600	
1.2	Acero Longitudinal 5/8"	und	2.50		\$ 27,500	\$ 68,750	
1.3	Concreto 3000 PSI	m3	0.09		\$ 305,848	\$ 27,526	
<b>2</b>	<b>Formaleta</b>					<b>\$ 60,000</b>	
2.1	Formaleta metálica	und	2		\$ 30,000	\$ 60,000	
<b>3</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 30,000</b>	
2.1	Carretilla, palustre, boquillera, balde	glb	1.00		\$ 30,000	\$ 30,000	
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 29,600</b>	
4.1	mano de obra	ml	1.00		\$ 29,600	\$ 29,600	
<b>5</b>	<b>Equipo</b>					<b>\$ 50,000</b>	
5.1	Vibrador eléctrico	día	1.00		\$ 50,000	\$ 50,000	
<b>Viga 0.3x0.3</b>					<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 285,476</b>	

---

**PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS**

---

**ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU**

<b>Excavación</b>	<b>Unidad</b>	<b>M3</b>
-------------------	---------------	-----------

---

Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
<b>1</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 150,000</b>
1.1	Carretilla, palas, pica, Palín	glb	1.00		\$ 150,000	\$ 150,000
<b>2</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 15,000</b>
2.1	mano de obra	m3	0.25		\$ 60,000	\$ 15,000
<b>3</b>	<b>Maquinaria</b>					<b>\$ 4,063</b>
3.1	Pajarita (Excavación y movimiento de tierras)	día	0.06		\$ 65,000	\$ 4,063
<b>Excavación</b>					<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 169,063</b>

---

#### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

#### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU

Columna 0.2x.3					Unidad	MI
Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 116,501</b>
1.1	Acero Transversal 3/8"	und	3.00		\$ 9,800	\$ 29,400
1.2	Acero Longitudinal 5/8"	und	2.50		\$ 27,500	\$ 68,750
1.3	Concreto 3000 PSI	m3	0.06		\$ 305,848	\$ 18,351
<b>2</b>	<b>Formaleta</b>					<b>\$ 120,000</b>
2.1	Formaleta metálica	und	4		\$ 30,000	\$ 120,000
<b>3</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 30,000</b>
2.1	Carretilla, palustre, boquillera, balde	glb	1.00		\$ 30,000	\$ 30,000
<b>4</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 29,600</b>
4.1	mano de obra	ml	1.00		\$ 29,600	\$ 29,600
<b>5</b>	<b>Equipo</b>					<b>\$ 50,000</b>
5.1	Vibrador eléctrico	día	1.00		\$ 50,000	\$ 50,000

---

Columna 0.2x.3

COSTO DIRECTO

\$ 346,101

---

---

**PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS**

---

**ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU**

<b>Pañete de 2 cm</b>					<b>Unidad</b>	<b>M2</b>
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Cant vol.</b>	<b>Valor Und</b>	<b>Valor Total</b>
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 39,947</b>
1.1	Mortero 1:2	m3	0.15		\$ 266,313	\$ 39,947
<b>2</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 25,000</b>
2.1	palustre boquillera, llana,	glb	1.00		\$ 25,000	\$ 25,000
<b>3</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 13,200</b>
3.1	mano de obra	m2	1.00		\$ 13,200	\$ 13,200
<b>Pañete de 2 cm</b>					<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 78,147</b>

---

---

**PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS**

---

**ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU**

<b>Placa en concreto reforzado de 0.2</b>					<b>Unidad</b>	<b>M2</b>
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Cant vol.</b>	<b>Valor Und</b>	<b>Valor Total</b>
<b>1</b>	<b>MATERIAL</b>					<b>\$ 184,970</b>
1.1	Concreto de 3000 PSI	m3	0.20		\$ 305,848	\$ 61,170
1.2	Malla electro soldada XY -131	und	1.00		\$ 115,000	\$ 115,000
1.3	Recebo B200	m3	0.20		\$ 44,000	\$ 8,800
<b>2</b>	<b>Herramienta menor</b>					<b>\$ 45,000</b>
2.1	Carretilla, palustre, boquillera, balde	glb	1.00		\$ 45,000	\$ 45,000
<b>3</b>	<b>MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 46,500</b>

---

3.1	mano de obra placa de concreto	m2	1.00	\$ 36,000	\$ 36,000
3.2	Mano de obra compactación	m2	1.00	\$ 10,500	\$ 10,500
<b>4</b>	<b>Equipo</b>				<b>\$ 51,000</b>
4.1	Vibrador eléctrico	día	0.30	\$ 50,000	\$ 15,000
4.2	Pluma	día	0.30	\$ 60,000	\$ 18,000
4.3	Vibro compactador tipo rana	día	0.30	\$ 60,000	\$ 18,000
<b>Placa en concreto reforzado de 0.2</b>				<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 327,470</b>

---

### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

#### ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS APU

Pañete de 2 cm					Unidad	M2
Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
<b>1</b>	<b>Grava para lecho</b>					<b>\$ 2,467,080</b>
1.1	Grava	m3	27.72		\$ 89,000	\$ 2,467,080
<b>2</b>	<b>Arena para lecho</b>					<b>\$ 2,055,900</b>
2.1	Arena	glb	23.10		\$ 89,000	\$ 2,055,900
<b>3</b>	<b>Geotextil</b>					<b>\$ 239,316</b>
3.1	Geotextil NT 2500	m2	92.40		\$ 2,590	\$ 239,316
<b>3</b>	<b>Mano de obra</b>					<b>\$ 1,663,200</b>
3.1	Instalación de materiales internos de filtro	m2	92.40		\$ 18,000	\$ 1,663,200
<b>Pañete de 2 cm</b>				<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>\$ 6,425,496</b>	

---

### PROYECTO DE GRADO LECHO DE LODOS

---

#### PRESUPUESTO

Ítem	Descripción	Und	Cant.	Cant vol.	Valor Und	Valor Total
1	Replanteo	m3		92.40	\$ 30,000	\$ 2,772,000
2	Excavación	m3		111.54	\$ 39,063	\$ 1,857,231
3	Placa en concreto reforzado de 0.1m	m2		85.8	\$ 97,470	\$ 8,096,895

<b>4</b>	Viga 0.3x0.3	ML	52	\$ 285,476	\$ 14,844,770
<b>5</b>	Columna 0.2x.3	ML	26 33.8	\$ 346,101	\$ 11,698,210
<b>6</b>	Muro doble en ladrillo tolete (0.2x.1x.06)	m2	72.8	\$ 217,263	\$ 15,816,711
<b>7</b>	Pañete de 2 cm	m2	79	\$ 78,147	\$ 6,173,604
<b>8</b>	Impermeabilizada	m2	79		\$ -
<b>9</b>	Hidráulica	ml			\$ -
<b>10</b>	Material interno del lecho	Glb	1	\$ 6,425,496	\$ 6,425,496
<b>11</b>					\$ -
<b>12</b>					\$ -
<b>13</b>					\$ -
					\$ 64,684,917

## Contenido

GLOSARIO.....	0
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN .....	10
OBJETIVOS .....	13
Objetivo general .....	13
Objetivos específicos .....	13
JUSTIFICACIÓN .....	14
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	16
1. ANTECEDENTES.....	18
1.1 Marco Histórico .....	18
MARCO DE REFERENCIA .....	21
2.2 Marco Geográfico .....	21
2.3 Marco Conceptual.....	22
Parámetros de las PTAP'S .....	22
Dotaciones y Caudales de Diseño según Norma.....	24
Procesos Unitarios.....	27
2.4 Marco Económico-Social.....	47
2.4.1 Proyecciones de Población.....	49
2.5 Marco Legal .....	53
1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	55
2. METODOLOGÍA .....	57
3. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA .....	64
5.1 Aducción /Conducción.....	64
Operación y Mantenimiento.....	64
5.2 Entrada y dosificación.....	65
5.3 Aforo de caudal de entrada.....	66
5.4 Cámara de distribución.....	68
5.5 Tanque de floculación-sedimentación.....	70

5.6 Filtración .....	73
5.7 Lavado de filtros .....	75
4. DETERMINACIÓN DE COAGULANTE Y DOSIS ÓPTIMA. ....	83
Sulfato de aluminio tipo B: .....	83
Cloruro Férrico.....	83
Policloruro de aluminio.....	84
6.1 Ensayo de jarras en campo .....	84
Ensayos realizados en planta:.....	85
Sulfato de aluminio (Concentración 1%).....	86
Cloruro férrico (Concentración 1.0%).....	86
6.2 Ensayos de Jarras realizados en laboratorio universitario.....	88
Sulfato de aluminio (Concentración 1%).....	90
Cloruro férrico (Concentración 1.0%).....	91
Sulfato ferroso (1.0%).....	92
6.3 Alcalinidad .....	94
6.3.1 Datos de alcalinidad en laboratorios universitarios.....	94
6.3.2 Cálculo de la alcalinidad .....	95
6.3.3 Conclusiones de ensayos de laboratorio.....	97
1. DIAGNÓSTICO DE LA PTAP “LA CHICA” .....	99
8. TRATAMIENTO DE LODOS. ....	110
8.1 Cantidades de lodo producidas en el floculador:.....	110
8.2 Cantidades de lodo producidas en el filtro: .....	112
8.3 Diseño de lechos de secado de lodos: .....	114
5. CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES .....	119
9.1 Levantamiento y dibujo de planos .....	119
9.2 Dosificación de coagulantes.....	120
9.3 Diagnóstico planta.....	120
9.4 Diseño de tratamiento de lodos .....	122
Anexos.....	123
Presupuesto para los lechos de secado .....	123
REFERENCIAS .....	135

Ilustración 1 Ubicación de la PTAP (tomado de Google Maps) .....	22
Ilustración 2 Ingreso a la PTAP (Tomado de Google Maps) .....	22
Ilustración 3 Clarificador de Lodos (Tomado de Wills, Castro, Correa) .....	39
Ilustración 4: Esquema de funcionamiento de filtros automáticos.....	43
Ilustración 5 Curva del punto de quiebre (CEPIS-OMS, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida).....	45
Ilustración 6 Distribución de la población según lugar de nacimiento (DANE, Censo 2005).....	48
Ilustración 7 Hogares según número de personas (DANE, Censo 2005).....	49
Ilustración 8 Crecimiento poblacional de Anapoima según DANE (incluyendo población flotante).....	53
Ilustración 9 Proceso de elaboración del proyecto (fuente propia) .....	57
Ilustración 10 Esquema sistema de entrada y dosificación de la planta .....	66
Ilustración 11 Esquema de cámara de distribución .....	69
Ilustración 12 Esquema Tanque de floculación sedimentación.....	71
Ilustración 13 Interacción de fuerzas en el floc .....	73
Ilustración 14 Esquema de funcionamiento filtro (Fuente Propia).....	75
Ilustración 15 Equipo de ensayo de jarras en planta .....	84
Ilustración 16 Turbiedad en función de la dosis de coagulante en los ensayos realizados en planta.....	87
Ilustración 17 Eficiencia en función de la dosis del coagulante de los ensayos realizados en planta.....	87
Ilustración 18 Flocs formados con cloruro férrico en planta.....	88
Ilustración 19 Equipo de jarras de la USTA.....	88
Ilustración 20 flocs formados con cloruro férrico en laboratorios universitario .....	91
Ilustración 21 flocs formados con sulfato ferroso en laboratorios universitarios.....	92
Ilustración 22 Turbiedad en función de la dosis del coagulante los ensayos realizados en el laboratorio universitario.....	93
Ilustración 23 Eficiencia en función de la dosis del coagulante los ensayos realizados en el laboratorio universitario.....	93
Ilustración 24 Muestras de agua de estudio neutralizadas.....	94
Ilustración 25: Esquema Corte lecho de secado .....	116

Tabla -1 Asignación del nivel de complejidad (RAS 2000, Titulo A).....	24
Tabla 2 Dotación neta según nivel de complejidad (Resolución 0330 de 2017, Titulo B) .....	25
Tabla3 Dotación neta máxima según nivel de complejidad (Resolución 0330 de 2017)	26
Tabla 4 Porcentajes Máximos admisibles de pérdidas Técnicas (Resolución 0330 de 2017, Art 44) .....	27
Tabla 5. Tipo de dosificador y material con los coagulantes (VALDÉZ, E. C. Abastecimiento de Agua Potable.) .....	31
Tabla 6. Parámetros de mezcladores rápidos (Resolución 0330 de 2017, Art. 112).....	33
Tabla 7 Criterios de diseño para mezcladores lentos (Resolución 0330 de 2017, Art. 112).....	35
Tabla 8 Criterios de diseño para sedimentadores (Resolución 0330 de 2017, Art. 130)	36
Tabla 9 Criterios de diseño para manto de lodos 8 Resolución (0330 de 2017, Art. 125) .....	40
Tabla 10. Variables en el diseño de filtros (Tomado de Romero).....	41
Tabla 11 Proyección de la población de Anapoima .....	50
Tabla 12 Valores de funcionamiento del tanque de floculación (fuente propia).....	70
Tabla 13 Requisitos químicos del sulfato de aluminio tipo B .....	83
Tabla 14 Datos iniciales de la muestra obtenida de la planta.....	85
Tabla 15 Turbiedad en función de la dosis (sulfato de aluminio) .....	86
Tabla 16 Turbiedad en función de la dosis (Cloruro férrico) .....	86
Tabla 17 Datos iniciales de la muestra de agua estudiada en laboratorio universitario ..	89
Tabla 18 Turbiedad en función de la dosis sulfato de aluminio.....	90
Tabla 19 Turbiedad en función de la dosis (cloruro férrico).....	91
Tabla 20 Turbiedad en función de la dosis (sulfato ferroso).....	92
Tabla 21 Dosis de ácido en función del volumen de la muestra después de aplicar coagulante.....	95
Tabla 22 Dosis de ácido en función del volumen de la muestra antes de aplicar coagulante.....	95
Tabla 23 Alcalinidad de la muestra después de aplicado el coagulante .....	96
Tabla 24 Alcalinidad de la muestra antes de aplicado el coagulante .....	97
Tabla -25 Imágenes tomadas en campo y su descripción.....	106
Tabla 26 Datos de eficiencia tomados en planta .....	108
Tabla 1: Romero Rojas, Pág. 314 .....	110

Ecuación 1 Dotación Bruta (Resolución 0330 de 2017, art 44) .....	26
Ecuación 2 Crecimiento poblacional (método geométrico) .....	51
Ecuación 3 Rata de Crecimiento Poblacional.....	51
Ecuación 4 Rata de Crecimiento .....	51
Ecuación 5 Crecimiento poblacional (método lineal) .....	52
Ecuación 6 Pendiente de crecimiento poblacional .....	52
Ecuación 7 Pendiente de crecimiento de Anapoima .....	52

## REFERENCIAS

- ARBOLEDA VALENCIA, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3rd ed.). SANTA FE DE BOGOTÁ: NOMOS S.A.
- DANE. (2005). *BOLETÍN CENSO GENERAL*; (). BOGOTÁ: Recuperado de [https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL\\_PDF\\_CG2005/25035T7T000.PDF](https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/25035T7T000.PDF)
- *Diseño del plan de optimización de la planta de tratamiento de agua potable de la vereda " el Tobal", Subachoque* (2017).
- LOPEZ CUALLA, R. A. (1999). *Elementos de diseño de acueductos y alcantarillado* (2nd ed.). BOGOTA COLOMBIA: ESCUELA DE INGENIEROS.
- Nueva resolución 0330, RESOLUCIÓN U.S.C. (2017). Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- ROMERO ROJAS, J. A. (2015). *Purificación del agua* (2nd ed.). COLOMBIA: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA.
- SILVA GARAVITO, L. F. *Diseño de plantas de purificación* UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
- VALDEZ, E. C. (1994). *Abastecimiento de agua potable* (4th ed.). MÉXICO DF: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- WILLS, B. A., CASTRO, C. C., & CORREA, M. A. (2010). Evaluación de un clarificador de manto de lodos a escala de laboratorio. *Revista EIA*, (14), 53-65. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=59494825&lang=es&site=ehost-live>
- Informe sobre el estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia 2016, INSTITUTO NACIONAL DE SALUD (2016)
- GARCÉS PAZ. (2010) *Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira*. Tesis Química Industrial Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira.