

**ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE
AGUA POTABLE PARA LA REMOCIÓN DE HIERRO Y FOSFATOS EN UNA
PLANTA COMPACTADA DE FLUJO A PRESIÓN EN EL CORREGIMIENTO
DEL HORMIGUERO.**

JUAN ESTEBAN LARA SOTO - 1941441



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA,
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2025**

**ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE
AGUA POTABLE PARA LA REMOCIÓN DE HIERRO Y FOSFATOS EN UNA
PLANTA COMPACTADA DE FLUJO A PRESIÓN EN EL CORREGIMIENTO
DEL HORMIGUERO.**

JUAN ESTEBAN LARA SOTO - 1941441

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
SANITARIO Y AMBIENTAL**

DIRECTOR

ING.MSC. PHD. LUIS DARÍO SÁNCHEZ TORRES, INSTITUTO CINARA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA,
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
- EIDENAR**

PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

SANTIAGO DE CALI

2025

Tabla de contenido

Índice de figura	4
1. Introducción	9
2. Antecedentes	10
3. Planteamiento del problema	11
4. Justificación.....	13
5. Objetivos	14
5.1 Objetivo general	14
5.2 Objetivos específicos.....	14
6. Marco contextual.....	15
6.1 Área de estudio.....	15
7. Marco conceptual	15
7.2 Abastecimiento de agua.....	15
7.3 Agua segura.....	16
7.4 Agua subterránea.....	16
7.5 Incrustación	17
7.6 Plantas compactas	17
8. Metodología	18
8.1 Diagnóstico de la operación y mantenimiento	18
8.1.1 Descripción de la planta y sus componentes	18
8.1.2 Revisión del sistema de bombeo	20
8.1.3 Medición de la calidad de agua cruda y tratada	21
8.1.4 Identificación y priorización de problemas	22
8.2.1 Revisión de la coagulación con cloruro férrico y Sulfoc.	22
8.2.2 Aplicación del coagulante en la PTAP	23
7.3 Selección de alternativa de optimización de la PTAP del Hormiguero	24
7.3.1 Definición de criterios de selección e indicadores	24
7.3.2 Aplicación del método AHP	25
7.3.3 Determinación de los pesos porcentuales.....	25
7.3.4 Análisis de inconsistencia.....	26
7.3.5 Matriz de decisión	27
7.4 Requerimientos de optimización de la PTAP del Hormiguero.....	27
7.4.1 Bandejas de aireación.....	27
7.4.2 Vertedero frontal.....	27
7.4.3 Floculador en grava.....	28
7.4.4 Sedimentador de alta tasa.....	29
7.4.5 Filtro rápido.....	29

7.4.6 Cámara de contacto de cloro	30
8. Resultados	30
8.1 Diagnóstico de la planta	30
8.1.1 Descripción de la PTAP	30
8.1.2 Evaluación de los parámetros de operación	35
8.1.3 Identificación y priorización de problemas	42
8.2 Aplicación de la coagulación como optimación de la PTAP del Hormiguero.....	43
8.2.1 Selección de coagulante óptimo	43
8.2.2 Aplicación de cloruro férrico en la PTAP del Hormiguero	44
8.3 Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.....	46
8.3.1 Descripción de alternativas de optimización.....	46
8.3.2 Selección de alternativa de optimización de la PTAP del Hormiguero.....	47
8.4 Alternativa de mejora de la PTAP del Hormiguero	48
8.4.1 Determinación del caudal de diseño.....	49
8.4.2 Sistema de bombeo.....	49
8.4.3 Sistema de aireación.....	50
8.4.4 Unidad de coagulación	51
8.4.5 Unidad de floculación	52
8.4.6 Unidad de sedimentación	53
8.4.7 Unidad de filtración rápida.....	54
8.4.8 Unidad de cloración	56
8.4.9 Pozo de succión.....	57
9. Conclusiones	60
10. Recomendaciones.....	61
11. Referencia	62

Índice de figuras

Figura 1. Árbol de problemas de la planta compacta del Hormiguero.....	13
Figura 2. Ubicación del corregimiento del Hormiguero	15
Figura 3. Proceso metodológico.....	18
Figura 4. Ubicación de manómetros para medir pérdidas de energía en la PTAP.....	20
Figura 5. Ubicación de puntos de muestreo.	21
Figura 6. Fotómetro multiparámetro de sobremesa.	21
Figura 7. Esquema de aplicación de coagulante en la PTAP del Hormiguero.	24
Figura 8. Esquema de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.	31
Figura 9. Componente del sistema de bombeo y sistema de aireación.	32
Figura 10. Unidades de tratamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.....	34
Figura 11. Tanque de almacenamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.	35

Figura 12. Sistema de cloración de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.....	35
Figura 13. Niveles de agua el pozo de la PTAR del corregimiento del Hormiguero.	36
Figura 14. Ubicación del punto óptimo de operación del sistema de bombeo.....	37
Figura 15. Consumo de energía del sistema de bombeo de la PTAP del Hormiguero.	38
Figura 16. Estado interno del filtro de arena y grava sedimentos gelatinosos.	39
Figura 17. Manifold de lavado de los filtros, con ranuras obstruidas.	39
Figura 18. Comportamiento de hierro en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero.....	40
Figura 19. Comportamiento de manganeso en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero. ...	40
Figura 20. Comportamiento de fosfatos en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero.	41
Figura 21. Comportamiento del oxígeno disuelto en la PTAP del Hormiguero.....	41
Figura 22. Comportamiento del fosfato en las pruebas con Sulfoc y 60 mg/L cal.	43
Figura 23. Comportamiento del fosfato en las pruebas con FeCl ₃ y 60 mg/L cal.....	43
Figura 24. Comportamiento del fosfato en las pruebas con cal y 20 mg/L FeCl ₃	44
Figura 25. Resultados de la primera jornada de aplicación de cloruro férrico.....	45
Figura 26. Resultados de la segunda jornada de aplicación de cloruro férrico.	45
Figura 27. Resultados de la tercera jornada de aplicación de cloruro férrico.	45
Figura 28. Problemas en la aplicación del cloruro férrico en la PTAP.....	46
Figura 29. Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.....	47
Figura 30. Resultados de los pesos porcentuales por cada criterio de evaluación.	47
Figura 31. Resultados de los pesos porcentuales por cada alternativa de optimización.	48
Figura 32. Perfil hidráulico de la alternativa propuesta.	49
Figura 33. Sistema de bombeo pozo- estructura de aireación.....	50
Figura 34. Bandejas de aireación.	51
Figura 35. Vertedero frontal.	52
Figura 36. Floculador en grava.	53
Figura 37. Sedimentador de alta tasa.	54
Figura 38. Filtro rápido.	56
Figura 39. Unidad de cloración.....	57
Figura 40. Esquema del pozo de succión.	58
Figura 41. Vista en planta de la alternativa de optimización.....	59

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos de eliminación de hierro para aguas subterráneas.	11
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos característicos de las aguas subterráneas en el Valle del Cauca.....	17
Tabla 3. Medición de parámetros de operación.....	19
Tabla 4. Procedimiento de cálculo para determinar altura dinámica de bombeo.	20

Tabla 5. Procedimiento de las pruebas de jarras.....	22
Tabla 6. Procedimiento para la determinación de dosis óptima de coagulante y cal.....	23
Tabla 7. Criterios de selección e indicadores.	24
Tabla 8. Escala de evaluación.....	25
Tabla 9. Matriz de comparaciones pareadas.....	25
Tabla 10. Coeficiente de aleatorio.	26
Tabla 11. Parámetros de referencia para las bandejas de aireación.	27
Tabla 12. Ecuaciones de diseño del vertedero frontal.	28
Tabla 13. Ecuaciones de diseño del floculador en grava.	28
Tabla 14. Ecuaciones de diseño del filtro rápido.....	29
Tabla 15. Ecuaciones de diseño del filtro rápido y caudal de lavado.....	29
Tabla 16. Ecuaciones de diseño de múltiples, laterales y canaleta recolectora.	29
Tabla 17. Ecuaciones de diseño de la cámara de contacto de cloro.	30
Tabla 18. Sistema de bombeo y aireación de la PTAP del Hormiguero.	32
Tabla 19. Tren de tratamiento de la PTAP del Hormiguero.....	33
Tabla 20. Tanque de almacenamiento y sistema de cloración de la PTAP del Hormiguero.	34
Tabla 21. Estimación del caudal de operación.	35
Tabla 22. Comparación de la bomba actual y requerida de la PTAP del Hormiguero.	37
Tabla 23. Parámetros de operación en unidades de tratamiento.	38
Tabla 24. Problemas identificados en la PTAP del Hormiguero.	42
Tabla 25. Análisis de costo por metro cubico de agua tratada con FeCl_3 y Sulfoc.....	44
Tabla 26. Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.	46
Tabla 27. Caudales de diseño.	49
Tabla 28. Diseño del sistema de bombeo.	50
Tabla 29. Diseño de bandejas de aireación.....	51
Tabla 30. Diseño de bandejas de aireación.....	52
Tabla 31. Diseño del floculador en grava.....	53
Tabla 32. Diseño del sedimentador.....	54
Tabla 33. Parámetros de recomendados para los módulos de placas.	54
Tabla 34. Diseño del filtro en grava.	55
Tabla 35. Medio filtrante recomendado.....	55
Tabla 36. Diseño de recolectores principales, laterales y canaletas.	55
Tabla 37. Diseño de la unidad de cloración.....	56
Tabla 38. Diseño del pozo de succión.	57

Agradecimientos

Quiero expresar los más sinceros agradecimientos a toda la comunidad del corregimiento del Hormiguero, a la junta de acción comunal, Asohormiguero y en especial la señora Lucero Hernández que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, quiero darle gracias Dios y a mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y los sacrificios que han hecho para permitirme llegar hasta este momento.

A mi director de tesis, Luis Darío Sánchez, por su orientación experta, paciencia y dedicación durante todo el proceso de investigación y redacción de este trabajo académico.

A todos los ingenieros por su acompañamiento y en especial a la ingeniera Jasmín Gonzales por sus consejos profesionales y apoyo para la realización de los procesos experimentales del trabajo de grado.

¡Gracias a todos!

Resumen

El presente trabajo de grado tuvo como propósito plantear estrategias de optimización del proceso de tratamiento de agua potable para la remoción de hierro y fosfatos en la planta compacta de flujo a presión del corregimiento El Hormiguero, en Santiago de Cali. Para ello, se realizó un diagnóstico de la operación y mantenimiento de la planta, identificando deficiencias en los procesos de tratamiento, así como altos costos energéticos derivados del sistema de bombeo. Se evaluó la coagulación química con cloruro férrico y Sulfoc, encontrando que ambos coagulantes reducen las concentraciones de hierro, fosfatos y manganeso por debajo de los límites establecidos en la Resolución 2115 de 2007. Sin embargo, las condiciones operativas actuales limitan la eficiencia del proceso de tratamiento. En este trabajo de grado se plantearon alternativas de optimización bajo criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. La alternativa más viable incluyó la implementación de bandejas de aireación, coagulación por estructura hidráulica, floculación ascendente en grava, sedimentación de alta tasa, filtración rápida y cloración. Con ello, se busca mejorar la calidad del agua suministrada, reducir costos de operación y mejorar la calidad del agua.

Palabras claves: Agua potable, hierro, fosfatos, plantas compactas, optimización de procesos, coagulación, aireación, floculación, sedimentación, filtración rápida, acueductos rurales.

1. Introducción.

El agua es un recurso que genera desarrollo en las poblaciones y es esencial para el crecimiento socioeconómico, energético, productivo, ecosistémico y sobre todo para la supervivencia del ser humano (ONU, 2022b). Sin embargo, el cambio climático ha generado obstáculos en las poblaciones menos resilientes a este, trayendo retos en su desarrollo y obligándolos a encontrar nuevas fuentes de abastecimiento para garantizar sus necesidades de agua. En este sentido, el agua subterránea, resulta de gran interés para mejorar la seguridad hídrica ya que representa el 99% de la totalidad del agua dulce en estado líquido lo que permite a las comunidades una posibilidad de adaptación al cambio climático, puesto que, aumenta la capacidad de almacenamiento de agua (ONU, 2022a).

Colombia es un país con una gran cantidad de recursos hídricos ya que aproximadamente tiene un rendimiento hídrico a nivel nacional de 56 L/s-Km² (IDEAM, 2022). Sin embargo, la mala gestión y la falta de planeación de las cuencas han hecho que cada día las fuentes superficiales se vean altamente contaminadas por las actividades antropogénicas (Montes, 2010). Por lo cual, el uso de aguas subterráneas se ha incrementado en los últimos años con un registro para el año 2022 de 68.397 captaciones de agua subterránea en todo el país lo que representa un aumento del 35,5 %, según el estudio nacional de agua para el 2022, así mismo, del total de agua captada, el 42,1% es destinada a abastecer el consumo humano (IDEAM, 2020) demostrando la importancia del agua subterránea en relación con el abastecimiento a nivel nacional.

No obstante, las aguas subterráneas en muchas ocasiones contienen contaminantes como el hierro, manganeso y fosfatos que provocan color, olor y turbiedad en el agua generando daños en los sistemas de tratamiento, sistemas sanitarios, tuberías y accesorios trayendo problemas de operación y mantenimiento (O&M) en las plantas de tratamiento y, sobre todo, en la disminución de la calidad de agua, produciendo rechazo en los consumidores. Esto conlleva a la necesidad de realizar tratamientos para remover los contaminantes presentes y así evitar la formación de depósitos, incrustaciones y formación de biopelícula en las unidades de tratamiento y en las tuberías de distribución (Sánchez, 2016).

En la actualidad se encuentra una gran variedad de tecnologías a nivel mundial que eliminan el hierro y fosfatos de las aguas subterráneas, entre ellas se encuentra los métodos tradicionales como la oxidación con oxígeno, cloro, permanganato de potasio, dióxido de cloro y ozono, así como, la precipitación, la filtración, entre otros (Frolova et al., 2017; Khatri et al., 2017). En Colombia, por su parte, se han implementado en zonas rurales tecnologías como las plantas compactas que han traído dificultades a las comunidades en temas de operación y mantenimiento por la falta de conocimiento técnico y la debilidad de las unidades para remover ciertos contaminantes, poniendo en riesgo la sostenibilidad de los acueductos comunitarios y por ende el bienestar de la población (Sánchez y Quiroga, 2020). De manera que, resulte de gran importancia estudiar alternativas de optimización que permitan mejorar las condiciones de los acueductos con el propósito de prevenir los riesgos asociados a consumir agua que pueda generar problemas de salud pública. Por lo tanto, el presente trabajo de grado pretende plantear estrategias de optimización del proceso de tratamiento de agua potable para la remoción de hierro y fosfatos en la planta compacta de flujo a presión ubicada en el corregimiento del Hormiguero, Valle del Cauca.

2. Antecedentes.

Las tecnologías que se encuentran en la actualidad para remover el hierro y manganeso del agua se subdividen en tecnologías convencionales, estrategias biológicas, estrategias basadas en tecnologías de membranas y nanotecnología (Khatri et al., 2017) lo que indica una gran variedad de alternativas posibles para el tratamiento de aguas con niveles superiores de los contaminantes. De estas tecnologías, a nivel mundial, es usual encontrar la oxidación, la adsorción, el intercambio iónico, la precipitación y la filtración ya que permiten una remoción del 90% (Boyle et al., 1977). No obstante, se han utilizado otro tipo de tratamientos mediante el ablandamiento por Zeolita, filtración en lecho de piedra caliza, separación en medios filtrantes, estabilización, , electro flotación, aireación y humedales artificiales (Khatri et al., 2017).

Entre las tecnologías más utilizadas para remover el hierro del agua subterránea se encuentra la oxidación mediante agentes oxidantes como el hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, cloro, ozono y dióxido de cloro lo que conlleva a la eliminación indirecta de microorganismo, siendo una ventaja de la tecnología, sin embargo, dependiendo del tipo de agente oxidante se puede incrementar los costos de operación y presentar problemas de corrosión en las unidades (Bordoloi et al., 2013). Además, se han realizado estudios en filtros de grava con niveles de oxígeno disuelto (OD) altos (6 mg/L) y bajos (<0,1 mg/L) donde se han alcanzado porcentajes de remoción de 64 % a un pH 7 con valores altos de OD (Sánchez, 2016).

Por otra parte, la separación en medios filtrantes ha reportado eficiencia de hasta el 90% de eliminación cuando hay una combinación de arena y antracita (El-Naggar, 2010). Así mismo, se han utilizado medios de grava de flujo ascendente en combinación con filtración lenta en arena teniendo eficiencias similares del 90 % (Wang et al., 2013). Igualmente, se han realizado tratamiento con aireación y filtración que ayudan más a la remoción del hierro alcanzando un 99% de eficiencia (Štembal et al., 2005).

La coagulación como método para la remoción de hierro se han empleado en estudios con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en aguas subterráneas para concentraciones de 0,56 mg/L de hierro, hallando una eficiencia del 71,4 % con una dosis óptima de 5 a 25 mg/L ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$),. (Olano-Arévalo et al., 2023). Así mismo, se han aplicado hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y policloruro de aluminio (PAC) en aguas con concentraciones de 0,54 mg/L de hierro consiguiendo una eficiencia de remoción por encima del 90% (Durán Morales, 2016). En la *Tabla 1* se presentan otros métodos de remoción de hierro reportados en la literatura y las eficiencias que han alcanzado.

Tabla 1. Métodos de eliminación de hierro para aguas subterráneas.

Método	Eficiencia de eliminación	Referencia
Oxidación, precipitación y filtración	88%	(Kan et al., 2012)
Separación en medios filtrantes	90%	(El-Naggar, 2010; Wang et al., 2013)
Vyredox	3,12%	(Osuna et al., 1988)
Aireación	70 – 90%	(Štembal et al., 2005)
Proceso de secuestro	66%	(Volpe, 2012)
Ultrafiltración	98%	(Du et al., 2017)
Microfiltración	95%	(Lin et al., 2013)

Fuente: Adaptado de (Khatri et al., 2017).

Los métodos de remoción de fosfatos consideran procesos físicos, químicos y biológicos (Wu et al., 2019). De los cuales la adsorción, biofiltración y electrocoagulación han conseguido remociones entre 70% a 90% (Frolova et al., 2017). Así mismo, se han utilizado medios filtrantes en combinaciones con arena de cuarzo, resina y zeolita natural alcanzando eficiencias entre el 65 a 67% de remoción (Mažeikienė & Šarko, 2022). Otros autores han reportado la alta capacidad de la arena recubierta de hierro, procedente de la producción de agua potable, para la adsorción del fosfato, sin embargo, es una alternativa que se sigue estudiando debido a la posibilidad de la reducción del hierro pudiendo disolverse en el agua o en su defecto aumentar la concentración de fosfatos (Barcala et al., 2023). También se ha implementado la coagulación para la remoción de fosfatos en fuentes superficiales con eficiencias del 90% empleando coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, cloruro férrico y cal hidratada (Díaz et al., 2007).

La literatura científica evidencia la gran variedad de métodos y tecnologías que se han estudiado y aplicado para la remoción de hierro y fosfatos teniendo resultados con altas eficiencias. Sin embargo, se encontró un mayor número de estudios para la eliminación del hierro en comparación a la remoción de fosfatos de las aguas subterráneas. Por lo cual, resulta de gran importancia el estudio de nuevas alternativas que permitan la disminución del fosfato ayudando a prevenir la formación de biopelícula en las redes de distribución de agua potable.

3. Planteamiento del problema.

El agua subterránea es uno de los recursos hídricos que actualmente se está utilizando para abastecer a comunidades alrededor del mundo, porque, son de gran interés para mejorar la seguridad hídrica en lugares donde no hay fuentes superficiales o donde están contaminadas por la descarga de aguas residuales y la erosión de los suelos, trayendo problemas para su potabilización (ONU, 2022b).

Las aguas subterráneas, aunque, suelen ser un recurso factible para abastecer a los sectores más vulnerables de la sociedad, representan a su vez, grandes retos para su obtención, tratamiento y distribución (ONU, 2022a), dado que, implica un elevado consumo de energía eléctrica para su extracción y distribución, trayendo altos costos de

operación y mantenimiento (O&M) en el proceso de abastecimiento. Así mismo, las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas implican un desafío para su potabilización, debido, a la alta presencia de hierro y fosfatos que pueden ocasionar rechazo en los consumidores por la presencia de color, sabor y sedimentos, además, de dañar las unidades de tratamiento, tuberías y accesorios (Rivas et al., 2021).

Actualmente la comunidad del corregimiento del Hormiguero se abastece mediante una fuente subterránea a través de la explotación de un pozo profundo. El cual tiene una concentración de hierro total de 0,38 mg Fe / L y 1,99 mg PO₄ /L de fosfatos, según la última prueba de tratabilidad realizada el 27 de octubre del 2023. Al comparar los registros históricos del agua tratada por el acueducto comunitario, se observó que la concentración promedio para el hierro total ha sido de 0,48 mg Fe / L y 1,99 mg PO₄ /L para los fosfatos, lo que indica que la planta de tratamiento de tipo compacta (PC), con la que cuenta la comunidad, no está cumpliendo con los valores guía de referencia establecidos por la Resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Ambiente de Colombia, la cual, establece niveles de hierro y fosfatos por debajo 0,3 mg Fe / L y 0,5 mg PO₄ /L, respectivamente. Igualmente, el acueducto, estaría poniendo en riesgo el bienestar de la población en términos de aceptabilidad del agua de consumo, el impacto en la operación y mantenimiento y la integridad del agua en el sistema de distribución.

La presencia de hierro y fosfatos en las redes de distribución han generado problemas y falta de credibilidad en la gestión del servicio del acueducto frente a la comunidad, debido a los múltiples reclamos de usuarios que expresan la permanencia de color marrón rojizo en el agua que llega a sus casas, generando desconfianza para el consumo y manchas en la ropa. Así mismo, se ha expresado al acueducto, la presencia de sedimentos en los tanques de almacenamiento y unidades sanitarias, provocando la obstrucción de las tuberías. De igual modo, la turbiedad del agua no cumple con las 2 Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT) que establece la Resolución 2115 del 2007 ya que a la salida de la planta la turbiedad se encuentra en promedio en 2,53 UNT.

Además de los problemas con la comunidad, el acueducto, presenta dificultades de operación y mantenimiento (O&M), formaciones de depósitos de hierro en la red de distribución, ingreso de nutrientes como el fosfato que puede contribuir a la formación de biofilm y, por ende, la obstrucción y la contaminación del agua tratada. Por lo tanto, se genera elevados costos de O&M ya que la exigencia de operación se incrementa al igual que los daños en las unidades de tratamiento.

Los problemas expuestos evidencian la falta de capacidad y el ineficiente funcionamiento de la planta de tratamiento del corregimiento para remover el hierro y el fosfato, debido a que las unidades presentes para el tratamiento no cuentan con los mecanismos de remoción adecuados, generando el incumplimiento de la norma. Adicionalmente, la falta de conocimiento técnico del proceso por parte de los operarios debido a la escasez de información de la calidad de agua, la debilidad en el seguimiento de parámetros de operación como el caudal, la carencia de instrumentos de medición y la débil asistencia técnica por entes gubernamentales e institucionales son las principales causas que han llevado a la insostenibilidad de la planta (ver árbol de problema en Figura 1).

La prioridad es optimizar los procesos de tratamiento existentes en la planta compacta del corregimiento del Hormiguero para aprovechar las estructuras preexistentes para mejorar la calidad de agua de consumo, ahorrando tiempo y dinero en la construcción de nuevas plantas. Así mismo, se requiere mejorar la operación y mantenimiento, para garantizar la

sostenibilidad del proceso de potabilización. Con base a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué estrategias de optimización se pueden aplicar en el tratamiento de agua potable para la eliminación de hierro y fosfatos en la planta compacta de tratamiento de agua potable del corregimiento del Hormiguero?

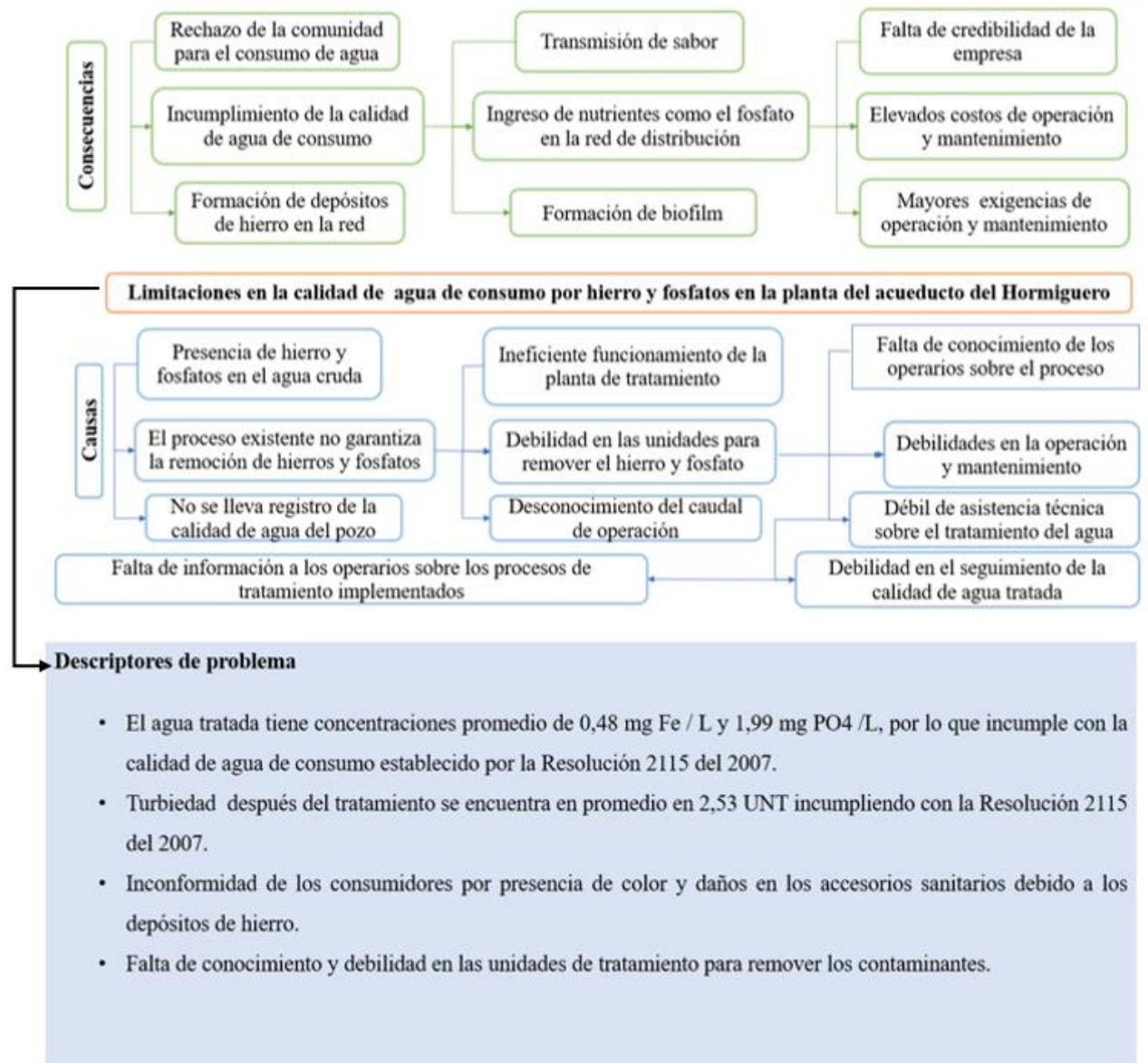


Figura 1. Árbol de problemas de la planta compacta del Hormiguero.

4. Justificación

Las Naciones Unidas para el año 2010 reconocen el derecho humano al abastecimiento de agua, en donde, las personas pueden disponer de forma continua, accesible, asequible y de una calidad aceptable el agua de consumo. Sin embargo, el cambio climático ha generado que las comunidades opten por fuentes de agua resilientes a los cambios extremos, por lo que, las aguas subterráneas suelen ser una opción viable (ONU, 2022a). No obstante, se debe garantizar un buen proceso de tratamiento para generar agua salubre que no ponga en riesgo la salud pública, ya

que, se estima que cada año un millón de personas fallecen a causa de enfermedades diarreicas contraídas por la ingesta de agua insalubre (ONU, 2023).

Por esa razón es fundamental, la optimización de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del corregimiento del Hormiguero y el mejoramiento de los procesos de tratamiento, para prevenir el riesgo de consumir agua contaminada que pueda generar problemas de salud pública, además, de impulsar el crecimiento económico al garantizar mejores condiciones de salud en la población (Fajardo Zúñiga, 2021). Así mismo, permite contribuir a la meta de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en materia del acceso universal y equitativo del agua potable salubre y asequible a las comunidades, proporcionando recursos frente al cambio climático y a las enfermedades transmitidas por el agua.

Del mismo modo, la optimización de las PTAP, en términos de la remoción de contaminantes como el hierro y fosfatos, contribuirá a mejorar la eficiencia en el proceso de potabilización, previniendo problemas de operación y mantenimiento, debido a, la reducción de los riesgos en daños de las unidades de tratamiento y, sobre todo, en las redes de distribución. Esto impacta positivamente los costos de O&M, aumenta la eficiencia del tratamiento y por ende mejora la calidad de agua, garantizando la sostenibilidad de la planta en el tiempo.

Este trabajo de grado contribuirá a mejorar el proceso de tratamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero y fortalecer la credibilidad en la empresa prestadora del servicio de suministro de agua, lo que genera un fortalecimiento de la capacidad de gestión comunitaria, mejorando el esquema participativo en la planificación, administración, control y finanzas en la prestación del servicio (Sánchez y Quiroga, 2020). Así mismo, la satisfacción de los usuarios se puede incrementar en la medida que se logren mejoras en la calidad del agua que llega a sus casas y que estos se puedan sentir seguros del consumo, redundando en un bienestar colectivo.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Plantear una estrategia de optimización del proceso de tratamiento de agua potable para la remoción de hierro y fosfatos en la planta compactada de flujo a presión en el corregimiento del Hormiguero.

5.2 Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico de la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento para identificar las limitaciones en la remoción de hierro y fosfatos.
2. Identificar las alternativas para mejorar las condiciones existentes de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua potable del corregimiento del Hormiguero.
3. Analizar la coagulación química como estrategia para optimizar la remoción de hierro y fosfatos en la planta de tratamiento del Hormiguero.

6. Marco contextual

6.1 Área de estudio

El corregimiento del Hormiguero es uno de los 15 corregimientos de la zona rural de Santiago de Cali, se encuentra ubicado al Suroriente del municipio, limita al norte con el corregimiento de Navarro, al noroccidente con la comuna 17 y 22 de la ciudad de Cali. El Hormiguero se compone de cinco veredas: Flamenco, Cascajal I y II, Pizamos y El Hormiguero (cabecera) para un total de 5.684,93 hectáreas (Alcaldía de Santiago de Cali, 2021).

La población del corregimiento es de aproximadamente de 4.642 habitantes (Alcaldía de Santiago de Cali, 2022), los cuales tienen como actividades principales, el cultivo de caña de azúcar y la extracción de arena del río Cauca ya que su topografía se caracteriza por ser plana, con una elevación aproximada de 900 m.s.n.m y una temperatura media de 25°C (Alcaldía de Santiago de Cali, 2021).

El corregimiento cuenta con un total de 1.665 viviendas, dos puestos de salud, un puesto de policía, dos puestos educativos para preescolar, tres de primaria y uno de secundaria para un total de 1.172 personas matriculadas (Alcaldía de Santiago de Cali, 2022).

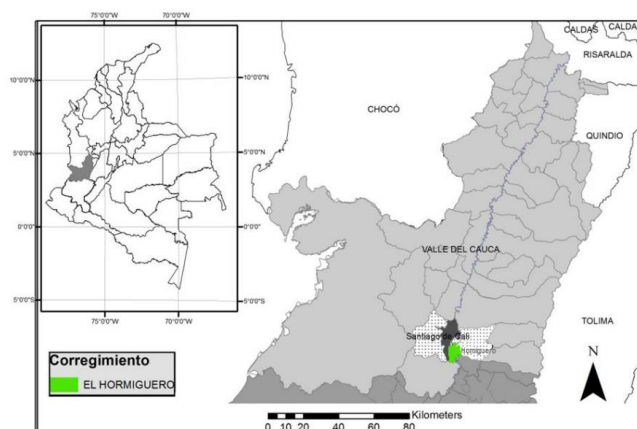


Figura 2. Ubicación del corregimiento del Hormiguero

Fuente: (Hurtado Chaves, 2018).

7. Marco conceptual

7.2 Abastecimiento de agua

El abastecimiento de agua es el proceso por el cual se capta, controla, conduce, almacena, trata y se distribuye agua a una población para consumo y uso doméstico. Este proceso se genera por un grupo de obras hidráulicas que transportan el agua por la fuerza de gravedad o por sistemas de bombeo desde el punto de captación hasta el punto de consumo.

7.3 Agua segura

El agua segura se entiende como el agua de consumo humano que no genera ningún riesgo a la salud, por lo que, el agua es libre de contaminantes físicos, químicos y biológicos. Además, las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua están bajo la orientación de la norma de calidad de agua del país en que se consume (ONU, 2023). Actualmente, a nivel internacional, la Organización de las Naciones Unidas cuenta con la guía para la calidad del agua potable en donde se establecen los lineamientos recomendados para que cada país tenga la posibilidad de decretar sus normas nacionales de calidad de agua (OMS, 2017). En Colombia, por ejemplo, se encuentra el Decreto 2115 del 2007 en el que se establece las “características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”.

7.4 Agua subterránea

En el planeta Tierra existen diferentes fuentes de agua como la superficial, de lluvia y subterránea. Estas por su parte, se genera naturalmente por la infiltración en el subsuelo por parte del agua de los ríos, lagos y precipitación que gracias a la porosidad, grietas y rocas del suelo permite el flujo del agua desde la superficie hasta lugares profundos en donde se almacena. Estos lugares conocidos como acuíferos tienen la característica de transferir y almacenar el agua generando diferentes servicios ecosistémicos a los seres humanos. Entre los que se encuentran el aprovechamiento de agua para consumo humano (ONU, 2022a).

Las características químicas de las aguas subterráneas dependen, sobre todo de las propiedades inherentes del suelo, ya que, el paso de agua por el subsuelo arrastra y disuelve minerales presentes en las rocas, así como, metales como el hierro y manganeso siendo estos los elementos más característicos de las aguas subterráneas (Tóth, 2000). En el departamento del Valle del Cauca, desde finales de 1967, la Corporación autónoma regional del Valle del Cauca (CVC) ha evaluado el potencial de la cantidad y calidad del agua subterránea del territorio, reportando una reserva total de 10.858,11 Mm³ (CVC, 2017), lo que convierte al departamento en uno de los más privilegiados del país.

Por otra parte, el CVC ha realizado la caracterización fisicoquímica de los diferentes acuíferos reportado en la *Tabla 2*. En ella se observan diferentes elementos como el hierro, manganeso y algunos nutrientes que en un contexto de aprovechamiento de agua para consumo humano generan problemas en las tuberías, accesorios, unidades de tratamiento y rechazo por parte de los consumidores (Rivas et al., 2021). En los reportes de la CVC no aparecen los fosfatos como constituyentes del agua subterránea.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos característicos de las aguas subterráneas en el Valle del Cauca.

Parámetros	Unidad	Rango característico
pH	Unidades	7,0 – 7,5
Turbiedad	UNT	0,1
Oxígeno disuelto	mg/l	0,1 – 0,98
Conductividad	uS/cm	300 – 600
Sólidos totales	mg/l	15 – 500
Dureza total	mg/l	150 – 250
Magnesio	mg/l	25,1
Alcalinidad total	mg/l	176 – 252
Cloruros	mg/l	2,5 – 8,0
Sulfatos	mg/l	2 – 9
Nitratos	mg/l	0,0 – 1,2
Nitrógeno total	mg/l	0 – 1
Manganeso	mg/l	0,0 – 0,3
Hierro total	mg/l	0,0 – 0,4

Fuente: (CVC, 2012).

7.5 Incrustación

La incrustación, se entiende como la acumulación, al paso del tiempo, de minerales, sedimentos y sustancias que se depositan o se adhieren dentro de las tuberías. Esto genera, disminución de la calidad de agua, la obstrucción del flujo y el ambiente propicio para la proliferación de bacterias patógenas que puedan poner en riesgo la salud humana (Mora Arellano & Cedeño, 2006).

Entre los contaminantes que conducen a la incrustación se encuentran el calcio, magnesio y el hierro (De Sousa et al., 2010). Sin embargo, se ha comprobado que la materia biológica genera a su vez los mismos problemas debido a la formación de biopelícula gracias a la presencia de otros contaminantes como los nitratos y los fosfatos (Gariboglio, 1993). Es por esto, que en la actualidad existen diferentes tecnologías de tratamiento que permiten la remoción de estos contaminantes presentes en las fuentes de agua.

7.6 Plantas compactas

Las plantas compactas (PC) o también llamadas plantas prefabricadas son tecnologías que fueron aplicadas inicialmente en el sector industrial de Reino Unido en los años 50 y que, al paso del tiempo, se fue implementando en el sector de agua potable alrededor del mundo. Las PC han sido aplicadas para tratar agua superficial, marina y subterránea ya que reúnen tecnologías convencionales de tratamiento como la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Además, de tecnologías de vanguardia como la osmosis inversa, microfiltración y la ultrafiltración (Castillo, 2006).

La característica más importante de las PC es la capacidad que tiene de agrupar todas las etapas de tratamiento en unidades pequeñas, de fácil manipulación y el funcionamiento a gravedad o por flujo a presión, permitiendo el ahorro de dinero y de tiempo en el diseño, construcción y en la O&M. Esto ha permitido la aplicación de la tecnología en lugares remotos y rurales con presupuestos limitados de dinero para garantizar el suministro de

agua (Loor & Sornoza, 2020). Sin embargo, la mala aplicación de la tecnología en estos lugares, la falta de capacitación para la O&M, los elevados consumos de energía, el bajo tiempo de retención hidráulico, los problemas asociados a la reparación de las unidades prefabricadas y sobre todo el poco acompañamiento a las comunidades han traído problemas de funcionamiento y de reducción de la calidad de agua (Cuenca & Maya, 2012). En donde, las unidades, al no funcionar correctamente, generan problemas de O&M a comunidades con pocos recursos económicos y técnicos para resolver los efectos como la no remoción de contaminantes, la baja eficiencia en las unidades de tratamiento y daños en la red de distribución.

8. Metodología

El presente trabajo de grado se realizó en la planta de tratamiento de agua potable del corregimiento del Hormiguero del municipio de Cali, en el Valle del Cauca. El trabajo se abordó mediante un diagnóstico de la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento identificando y priorizando los problemas. Posteriormente, se evaluó la aplicación de coagulante (FeCl_3) y parámetros de operación para realizar la coagulación, floculación y sedimentación. Por último, se planteó estrategias para la optimización de la planta de tratamiento. La Figura 3 presenta las actividades desarrolladas durante el trabajo de grado.

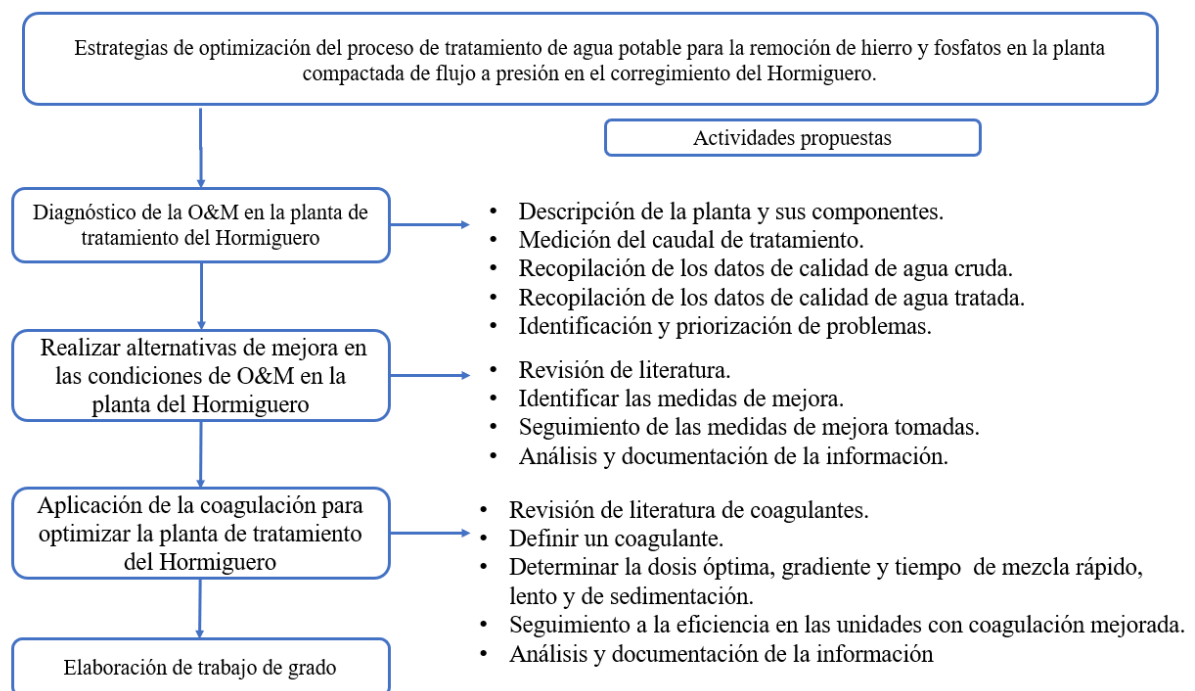


Figura 3. Proceso metodológico.

8.1 Diagnóstico de la operación y mantenimiento

8.1.1 Descripción de la planta y sus componentes

La revisión de la PTAP del corregimiento del Hormiguero consistió en la identificación de los componentes de la planta de tratamiento desde la captación, conducción, procesos de tratamiento y tanque de almacenamiento. Esto se hizo teniendo en cuenta la poca

información que se identificó al revisar el manual de operación de la planta. Por lo tanto, se programaron visitas técnicas con el propósito de entender y recopilar información del funcionamiento hidráulico, los procesos de tratamiento y de los equipos de operación.

Durante el trabajo de campo se identificó la ausencia de equipos e instrumentos para la medición de parámetros de operación, por lo cual, se realizaron los cálculos para estimar el caudal de operación, tiempo de retención hidráulico (TRH), gradiente de mezcla rápida y lenta. Además, se realizaron mediciones de niveles de agua en el pozo y la concentración de oxígeno disuelto en afluente y efluente de la PTAP. En la *Tabla 3* se presentan los procedimientos y cálculos empleados para la determinación de los parámetros de operación.

Tabla 3. Medición de parámetros de operación.

Parámetro	Equipo o ecuación
Caudal	$Q = \frac{V}{T}$ Ec. 1
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	$TRH = \frac{V}{Q}$ Ec.2 $V = \frac{(\pi)(h)(3r^2+h^2)}{6} + (\pi)(r^2)(H)$ Ec.3
Gradiente y tiempo de mezcla rápida	$T = \frac{D}{v}$ Ec.3 $G = \sqrt{\frac{(\rho)(g)(v)}{(\mu)}}$ Ec.4
Gradiente de mezcla lenta	$J = \frac{150v(1-\epsilon_o)^2(V_{ap})}{g(\epsilon_o)^3(C_s)(D_{mg})^2} + \frac{1,75(1-\epsilon_o)(V_{ap})^2}{g(\epsilon_o)^3(C_s)(D_{mg})}$ Ec.5 $G = \sqrt{\frac{(v)(V_{ap})(J_{mg})}{(\mu)(\epsilon_o)}}$ Ec.6
Oxígeno disuelto (OD)	Método electrométrico con oxímetro Hach (sensION 6) Procedimiento: 1. Calibración del oxímetro con solución electrolítica. 2. Toma de muestra de agua cruda y tratada. 3. Medición de oxígeno con el oxímetro. 4. Lectura y registro de resultado.
Nivel de agua en el pozo	Medición de niveles de agua con medidor sónico de nivel. Procedimiento: 1. Ingreso de la sonda en el pozo de agua hasta el nivel de agua. 2. Lectura y registro de resultado.

Donde: Q = caudal de operación; V= volumen del tanque de agua; T= tiempo de llenado; h = altura del casquete; r = radio del cilindro; H: altura del cilindro; G= gradiente de mezcla; ρ = densidad del agua ($997,7 \text{ Kg/m}^3$); g = gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); v = velocidad del agua; μ = viscosidad dinámica ($8,91 \times 10^{-4} \text{ Kg/ms}$).

8.1.2 Revisión del sistema de bombeo

La revisión del sistema de bombeo consistió en verificar la correcta selección de la bomba, considerando parámetros, tales como: caudal, altura de bombeo, potencia y eficiencia comparando el punto de operación actual y el punto óptimo de operación de la bomba, además, se identificó la correcta operación del sistema de bombeo con la verificación del NPSH requerido y disponible. Por tanto, se indagó las especificaciones y la curva característica de la bomba tipo lapicero por medio del fabricante. Posteriormente, se determinó la altura estática y dinámica de bombeo teniendo en cuenta, las pérdidas por fricción y pérdidas menores desde la tubería de succión en el pozo de agua hasta el tanque de almacenamiento *Tabla 4*. Además, se midieron las pérdidas generadas en las unidades de tratamiento (clarificador, filtro grueso de grava y filtro purificador de arena) con la instalación de manómetros a la entra y salida de la PTAP *Figura 4*.



Figura 4. Ubicación de manómetros para medir pérdidas de energía en la PTAP.

Tabla 4. Procedimiento de cálculo para determinar altura dinámica de bombeo.

Parámetro	Ecuación
Altura estática de bombeo (H_e)	$H_e = H_s + H_d$ Ec. 7
Altura dinámica de bombeo (H_b)	$H_b = H_e + \sum hf$ Ec. 8
Caudal de bombeo (Q_b)	$Q_b = (QMD) \frac{24}{N}$
Pérdidas por fricción Hazen – Williams (hf_1)	$hf_1 = 10,675 \left(\frac{Q_b}{C} \right)^{1,85} * \frac{L}{d^{4,87}}$ Ec. 9
Pérdidas menores (hf_2)	$hf_2 = (K) \frac{v^2}{(2)(g)}$ Ec. 10
Potencia (P)	$P = 9.81 * Q_b \frac{H_b}{(eb)(em)}$ Ec. 11
NPSH disponible	$NPSH = Hatm + H_s - H_v - H_{fs}$ Ec. 12

Donde: H_s = altura de succión de bombeo; H_d = altura de descarga; QMD = caudal máximo diario; N = número de horas de bombeo; C = coeficiente de Hazen – Williams; L = longitud de la tubería; d= diámetro de la tubería; K= coeficiente de pérdidas menores; v = velocidad del agua; g = gravedad (9,81 m/s²); eb= eficiencia de la bomba (%); em= eficiencia del motor; Hatm= presión atmosférica (9,2 m a 900 m.s.n.m); H_s = altura estática de succión (m); H_v = presión de vapor del agua (0,323 m a 25 °C); H_{fs} = Perdidas de energía totales en la tubería de succión (m).

8.1.3 Medición de la calidad de agua cruda y tratada

La medición de la calidad de agua se realizó por medio de dos (2) jornadas de medición (mañana y tarde) con una duración de 6 horas durante un (1) mes. Debido a la ausencia de puntos de muestreo en el afluente y efluente de la PTAP se instalaron llaves de agua antes del clarificador (afluente) y a la salida del filtro de arena (efluente) acorde a la presentado en la *Figura 5* con el objetivo de medir la concentración de hierro, fosfato y manganeso con la ayuda de un equipo multiparamétrico de la marca Hanna (HI 83300) *Figura 6*.



Figura 5. Ubicación de puntos de muestreo.



Figura 6. Fotómetro multiparámetro de sobremesa.

Las concentraciones obtenidas en el muestreo fueron organizadas en tablas y en graficas de series de tiempo con el objetivo de observar el comportamiento y la tendencia de las concentraciones en función del tiempo. Así mismo, se calculó las eficiencias de remoción *Ecuación 12* para identificar el rendimiento de la planta en términos de la eliminación de contaminantes. También se revisó el cumplimiento de la resolución 2115 del 2007 de calidad del agua para consumo humano del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y ministerio de protección social.

$$\text{Eficiencia} = \frac{CA - CE}{CA} \times 100\% \quad \text{Ec. 12}$$

Donde: CA=concentración del afluente (mg/L); CE =Concentración del efluente(mg/L).

7.1.4 Identificación y priorización de problemas

Se identificaron los problemas persistentes en la PTAP del corregimiento del Hormiguero, inicialmente comprendiendo el funcionamiento de la planta y determinando los procesos de tratamiento que no funcionaran de forma correcta, para lo cual se hizo la revisión de la planta y los manuales, juntamente con la revisión literatura de cada unidad con los parámetros de operación recomendados para identificar el funcionamiento. La revisión incluyó la revisión del sistema de bombeo y los consumos de energía con la tecnología existente. Por otra parte, se identificaron los parámetros fisicoquímicos con la menor eficiencia de remoción verificando con la resolución 2115 del 2007.

7.2.1 Revisión de la coagulación con cloruro férrico y Sulfoc.

Se evaluó la efectividad de remoción del cloruro férrico (FeCl_3) y Sulfoc Al (OH)Cl como coagulantes que removieran el hierro, fosfatos y manganeso en la PTAP del Hormiguero. En primer lugar, se realizaron pruebas de jarras donde se determinó la dosis óptima, gradiente de mezcla rápido y lento, así como, el tiempo óptimo de coagulación, floculación y sedimentación. Las pruebas se hicieron con un equipo de jarras de 2 litros. En la *Tabla 5* y *6* se presenta el procedimiento realizado.

Tabla 5. Procedimiento de las pruebas de jarras.

Pasos	Descripción
1	Se recolectaron 10 litros de agua cruda a la salida del pozo de la PTAP del Hormiguero.
2	Se realizó una dilución de cloruro férrico del 99% al 2%. Para lo cual, se utilizó la <i>Ecuación 13</i> . $(C_1) (V_1) (\rho) = (C_2) (V_2) (\rho) \text{ Ec. 13}$ Donde: C_1 = Concentración inicial del coagulante (mg/L); V_1 =Volumen del coagulante (L); C_2 = Concentración final de la solución (mg/L); V_2 =Volumen de agua aplicada (L) $\rho 1$ =densidad del coagulante;) $\rho 2$ = densidad de la solución.
3	Se prepararon jeringas plásticas con concentraciones definidas en la Tabla 6.
4	Se adiciono el coagulante a cada jarra y se garantizó una agitación de 280RPM durante 40 segundos.
5	Se redujo la velocidad a 30 RPM y se continuo el proceso por 15 minutos.
6	Se apago el equipo de jarras y se esperó por 15 minutos.
7	Se tomaron muestras del sobrenadante y se realizaron las mediciones de hierro, fosfatos y manganeso con la ayuda del multiparámetro <i>Figura 6</i> .
8	Se determino la dosis óptima y variables operacionales.

Tabla 6. Procedimiento para la determinación de dosis óptima de coagulante y cal.

Coagulante	Fase experimental	Ensayo	Dosis de coagulante (mg/L)	Dosis de cal (mg/L)
Sulfoc	Variación de coagulante	1	50	60
		2	60	60
		3	70	60
		4	80	60
		5	90	60
		6	100	60
Cloruro férrico	Variación de coagulante	1	16	60
		2	17	60
		3	18	60
		4	20	60
		5	21	60
		6	22	60
Cloruro férrico	Variación de coagulante	1	18	60
		2	20	60
		3	22	60
		4	24	60
		5	26	60
		6	28	60
Cloruro férrico	Variación de cal	1	20	20
		2	20	30
		3	20	40
		4	20	50
		5	20	60
		6	20	80

7.2.2 Aplicación del coagulante en la PTAP

La dosis óptima determinada del coagulante seleccionado en la prueba de jarras se aplicó en la PTAP del Hormiguero durante 6 horas por 3 días donde se realizó simultáneamente el seguimiento cada hora del comportamiento de las concentraciones de hierro y fosfatos. En primera medida, se determinó el punto de dosificación y la presión que se necesitó vencer para la aplicación del coagulante *Figura 7*. Posteriormente, se instaló una bomba dosificadora con una altura de bombeo de 36 mca y un caudal de 0,008 L/s.

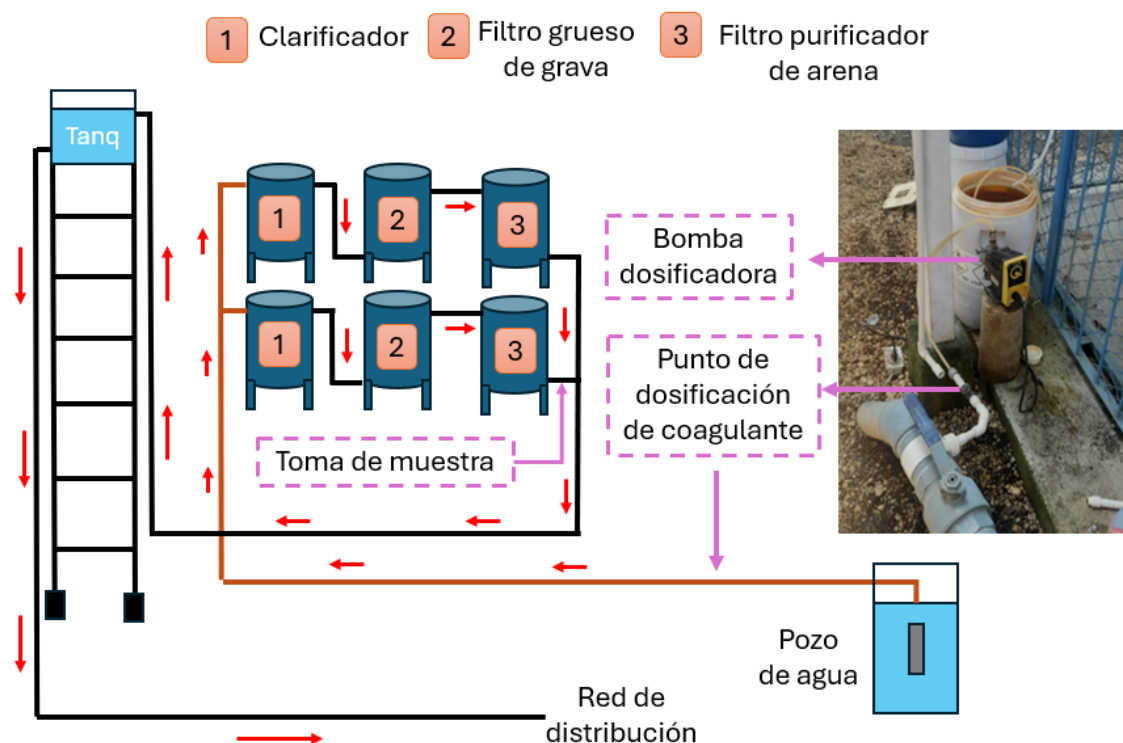


Figura 7. Esquema de aplicación de coagulante en la PTAP del Hormiguero.

7.3 Selección de alternativa de optimización de la PTAP del Hormiguero

La optimización del sistema de tratamiento de la PTAP del Hormiguero consiste en plantear tres alternativas de mejoramiento de las cuales se seleccionó la mejor con la ayuda de una matriz multicriterio evaluada por el proceso analítico Jerárquico (AHP), acorde con Thomas(1980). El AHP es un proceso de análisis jerárquico diseñado para la resolución de problemas de criterios múltiples, proporciona evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios.

7.3.1 Definición de criterios de selección e indicadores

Los criterios e indicadores para la selección de las alternativas propuestas para la optimización de la PTAP del Hormiguero se identificaron a partir de lo establecido por la resolución 0330 del 2017 y las características propias del lugar. Los criterios utilizados abordan aspectos sociales, económicos, técnicos y ambientales (ver Tabla 7).

Tabla 7. Criterios de selección e indicadores.

Criterios	Indicadores
Social	Aceptación tecnológica Adaptabilidad
Económico	Costos de inversión inicial Costos de O&M
Técnico	Eficiencia de remoción Complejidad operativa
Ambiental	Sostenibilidad Área requerida

7.3.2 Aplicación del método AHP

El método AHP para la evaluación de la matriz de selección consistió en realizar las comparaciones pareadas de los criterios seleccionados y las alternativas, estimando el nivel de preferencia entre ellas. En este caso el procedimiento se basó en encuestar cinco profesionales del área de ingeniería sanitaria con el objetivo de priorizar la importancia de un criterio con respecto a otro. En la *Tabla 8* se presenta la escala numérica y la escala de valoración según Saaty (1987). Se destaca que para evitar la dispersión de las respuestas se utilizó solo la escala numérica 1, 3 y 5.

Tabla 8. Escala de evaluación.

Escala Numérica	Escala de valoración	Explicación
1	Igual	Los dos elementos contribuyen igualmente al criterio
3	Moderada	Moderadamente más importante un elemento que el otro
5	Fuerte	Fuertemente más importante un elemento que el otro

Posteriormente, se realizó la matriz de comparación de los criterios con la ayuda de los evaluadores para decidir si todos los criterios influyen de la misma forma en el interés de las alternativas o por el contrario influyen con un porcentaje diferente. Este proceso se realizó con la escala de ponderación pareada (ver *Tabla 9*).

Tabla 9. Matriz de comparaciones pareadas.

	Social	Ambiental	Económico	Técnico
Social	1	a	b	c
Ambiental	1/a	1	d	e
Económico	1/b	1/d	1	f
Técnico	1/c	1/e	1/f	1

Nota: a, b, c, d, e y f son valores adoptados por los evaluadores según la escala numérica de Saaty (1980).

7.3.3 Determinación de los pesos porcentuales

Al definir las matrices de comparación de criterios y de alternativas se determinó los pesos porcentuales. Por lo cual, se normalizó cada matriz sumando cada columna de la tabla, luego se dividió cada elemento de la columna por la suma total de la columna (ver ecuación 14).

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde: n_{ij} : elemento normalizado en la fila i y columna j ; a_{ij} : elemento original de la matriz de comparaciones; $\sum_{k=1}^n a_{kj}$: suma de todos los elementos de la columna j .

Finalmente, se determinó el peso porcentual calculando el vector de prioridades de cada criterio el cual se determina calculando el promedio de cada fila de criterios (ver ecuación 15).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n n_{ij}}{n} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde: w_i : es peso porcentual; $\sum_{j=1}^n n_{ij}$: es la suma de todos los elementos de la fila i en la matriz normalizada; n : es el número de elementos.

7.3.4 Análisis de inconsistencia

El análisis de inconsistencia de la matriz de selección se realizó para verificar la racionalidad de los juicios emitidos por los evaluadores. Este proceso determina si el nivel de inconsistencia inherente a las valoraciones subjetivas se encuentra dentro de un umbral tolerable, garantizando así la confiabilidad de los resultados. El cálculo de la relación de inconsistencia se realizó con la Ecuación 16. Si el resultado de RI es menor o igual a 0,1 el nivel de inconsistencia es aceptable, si el resultado es mayor se debe revisar la estimación.

$$RI = \frac{IC}{CA} \quad \text{Ec. 16}$$

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde: RI: razón de inconsistencia; IC: índice de inconsistencia; CA: Coeficiente de aleatorio; n : número de elementos.

El coeficiente de aleatorio se determinó con la *Tabla 10*.

Tabla 10. Coeficiente de aleatorio.

N° de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7
Índice aleatorio de consistencia	0	0	0,58	0,89	1,11	1,24	1,32

Fuente: Saaty (1987).

7.3.5 Matriz de decisión

Finalmente, para sintetizar los resultados y obtener la mejor alternativa de optimización para la PTAP del Hormiguero se construyó la matriz de decisión. Esta matriz se conforma con los pesos porcentuales de las alternativas para cada criterio. El porcentaje global de cada alternativa se calcula mediante la combinación lineal de estos vectores, ponderándolos con los pesos relativos de los criterios previamente obtenidos, es decir, el resultado es el producto de la matriz de prioridades de las alternativas por el vector de pesos de los criterios.

7.4 Requerimientos de optimización de la PTAP del Hormiguero

La optimización del sistema de tratamiento de la PTAP del Hormiguero consiste en plantear unidades de tratamiento acorde con los resultados del ensayo de jarras y criterios de diseño estipulados en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). A continuación, se presenta los procedimientos.

7.4.1 Bandejas de aireación

En la *Tabla 11* se presenta los valores de referencia que se emplearon para las bandejas de aireación. El procedimiento de cálculo fue determinar el área de las bandejas con el caudal de diseño y la carga hidráulica seleccionada, posteriormente, se estimaron las dimensiones y el número de bandejas según los rangos recomendados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2017).

Tabla 11. Parámetros de referencia para las bandejas de aireación.

Parámetro	Valor
Carga hidráulica (m/d)	500 – 1500
Altura total (m)	1,2 – 3,0
Número de bandejas	3 - 9
Distancia entre bandejas (m)	0,3 -0,5
Altura de bandejas (m)	0,20 – 0,25
Diámetro medio orificios (cm)	0,5 -0,6
Separación entre orificios (m)	0,25
	4 - 5
Oxígeno disuelto (mg/L)	(Fuentes, 2013)

Fuente: MVCT, 2017.7.4.2 Vertedero frontal.

7.4.2 Vertedero frontal

En la *Tabla 12* se presenta las ecuaciones empleadas para vertedero frontal las cuales se encuentran organizadas secuencialmente según el procedimiento de cálculo. El criterio de diseño empleado para el vertedero fue el gradiente de mezcla rápido establecido en las pruebas de jarras.

Tabla 12. Ecuaciones de diseño del vertedero frontal.

Parámetro	Ecuación
Profundidad crítica (Y_c)	$Y_c = \sqrt[3]{\frac{QMD^2}{b^2(g)}} \text{ Ec. 18}$
Profundidad antes del resalto hidráulico (Y_1)	$Y_1 = \frac{(Y_c)(1,144)}{\sqrt{2,56 + \frac{P_{vr}}{Y_c}}} \text{ Ec. 19}$
Profundidad después del resalto hidráulico (Y_2)	$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \sqrt{1 + 8(Fr_1)^2} - 1 \text{ Ec. 20}$
Energía específica (En)	$En = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4(Y_1)(Y_2)} \text{ Ec. 21}$
Largo del resalto hidráulico (L_r)	$L_r = 5(Y_2 - Y_1) \text{ Ec. 22}$
Tiempo de mezcla (T_{mr})	$T_{mr} = \frac{L_r}{V_m} \text{ Ec. 23}$
Gradiente de mezcla (G)	$G = \sqrt{\frac{(\gamma)(En)}{(\mu)(T_m)}} \text{ Ec. 24}$

Fuente: Valencia (1972).

Donde: QMD= caudal máximo diario; b = ancho del vertedero; P_{vr} = altura del vertedero; Fr = número de Froude; V_m = velocidad media en el resalto hidráulico; γ = peso específico del agua (9789 N/m^3); μ = viscosidad absoluta ($8,91 \times 10^{-4} \text{ Kg m/s}^2$); g = gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

7.4.3 Floculador en grava

En la *Tabla 13* se presenta el procedimiento de cálculo del floculador en grava para el cual se tuvo en cuenta el tiempo y gradiente de mezcla lento óptimo.

Tabla 13. Ecuaciones de diseño del floculador en grava.

Parámetro	Ecuación
Área de floculador (A_f)	$A_f = \frac{(\pi)(d^2)}{4} \text{ Ec. 25}$
Volumen del floculador (V_f)	$V_f = \frac{QMD}{A_f} \text{ Ec. 26}$
Pérdida unitaria en medios porosos (Ergun,1952)	$J_{mg} = \frac{150\nu(1-\epsilon_o)^2(V_{ap})}{g(\epsilon_o)^3(C_s)(D_{mg})^2} + \frac{1,75(1-\epsilon_o)(V_{ap})^2}{g(\epsilon_o)^3(C_s)(D_{mg})} \text{ Ec. 27}$
Gradiente de velocidad (Di Bernardo y Sabogal, 2008)	$G = \sqrt{\frac{(\gamma)(V_{ap})(J_{mg})}{(\mu)(\epsilon_o)}} \text{ Ec. 28}$

Fuente: Valencia (1972).

Donde: QMD= caudal máximo diario; d = diámetro del cilindro; ν = viscosidad dinámica ($9,47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$); γ = peso específico del agua (9789 N/m^3); μ = viscosidad absoluta ($8,91 \times 10^{-4} \text{ Kg m/s}^2$); V_{ap} = velocidad de aproximación; g = gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); ϵ_o = porosidad del medio limpio; C_s = coeficiente de esfericidad; D_{mg} = diámetro de participa.

7.4.4 Sedimentador de alta tasa

En la *Tabla 14* se presenta el procedimiento de cálculo del sedimentador de alta tasa para el cual se tuvo en cuenta el tiempo de retención hidráulico óptimo y la velocidad crítica de sedimentación.

Tabla 14. Ecuaciones de diseño del filtro rápido.

Parámetro	Ecuación
Área de sedimentación (As)	$As = \frac{(\pi)(d^2)}{4}$ Ec. 29
Velocidad de arrastre (Vo)	$Vo = \frac{QMD}{As}$ Ec. 30
Velocidad de sedimentación crítica (Vcs)	$Vcs = \sqrt{\frac{8(Vo)(\nu)}{\sqrt{3}(a)}}$ Ec. 31

Fuente: Valencia (1972).

Donde: QMD= caudal máximo diario; d= diámetro del cilindro; ν = viscosidad dinámica ($9,47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$); a = ancho de placas.

7.4.5 Filtro rápido

En la *Tabla 15* se presenta el procedimiento de cálculo del filtro rápido. Además, en la *Tabla 16* se muestra las ecuaciones empleadas para el cálculo de las tuberías de recolección de múltiples, laterales y canaleta recolectora.

Tabla 15. Ecuaciones de diseño del filtro rápido y caudal de lavado.

Parámetro	Ecuación
Número de filtros	$N = 0,0044 \sqrt{C}$ Ec. 32
Área de filtración requerida (Af)	$Af = \frac{QMD}{Tf}$ Ec. 33
Diámetro del filtro (Df)	$Df = \sqrt{\frac{4(Af)}{\pi}}$ Ec. 34
Caudal de lavado (Q)	$Q = (Af)(V)$ Ec. 35

Fuente: Valencia (1972).

Donde: QMD= caudal máximo diario; Tf = tasa de filtración rápida; C = volumen diario; V = velocidad ascensional de lavado.

Tabla 16. Ecuaciones de diseño de múltiples, laterales y canaleta recolectora.

Parámetro	Ecuación
Profundidad de canaleta (y)	$y = (0,98)\left(\frac{Q}{b}\right)^{\frac{2}{3}}$ Ec. 36
Área de orificios (Ao)	$Ao = (Ro)(Af)$ Ec. 37
Número de orificios	$N = \frac{Ao}{Aor}$ Ec. 38
Área de laterales (Al)	$Al = (Rl)(Ao)$ Ec. 39
Número de laterales	$N = \frac{Al}{Ala}$ Ec. 40

Fuente: Valencia (1972).

Donde: Q = caudal de lavado; b = ancho de canaleta; Ro = relación área de orificio y área de filtración (0,0015 – 0,005); Aor = área de un orificio; Rl = relación área de lateral y área de orificios (2); Ala = área transversal de un lateral.

7.4.6 Cámara de contacto de cloro

En la *Tabla 17* se presenta el procedimiento del cálculo de la cámara de contacto de cloro. El tiempo mínimo de contacto (20 minutos) se definió según con lo recomendado por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2017).

Tabla 17. Ecuaciones de diseño de la cámara de contacto de cloro.

Parámetro	Ecuación
Volumen de la cámara de cloro (V_c)	$V_c = (QMD)(T)$ Ec. 41
Área de la cámara de cloro (A_c)	$A_c = (V)(h)$ Ec. 42
Longitud total (L)	$L = \frac{A_c}{a}$ Ec. 43
Número de canales	$N = \frac{L}{La}$ Ec. 44

Fuente: Valencia (1972).

Donde: QMD= caudal máximo diario; T = tiempo de contacto de cloro; h = altura de lámina de agua; a = ancho de los canales; La = largo del canal.

8. Resultados

Los resultados del trabajo realizado en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero son presentados en el siguiente capítulo. En primer lugar, se presenta la descripción de la planta y sus componentes, los parámetros de operación y la evaluación del sistema de bombeo. En segundo lugar, se muestra los resultados de las pruebas de coagulación química con cloruro férrico realizadas en el laboratorio y en la planta de tratamiento como posible estrategia para la optimización. Finalmente, se presenta las propuestas de mejora en la planta para las condiciones existentes de operación.

8.1 Diagnóstico de la planta

8.1.1 Descripción de la PTAP

La PTAP del corregimiento del Hormiguero está constituida por un pozo profundo, un sistema de bombeo y un sistema de aireación. Posteriormente, el agua es distribuida en dos líneas de tratamiento compuestos de un clarificador, filtro grueso de grava y filtro purificador de arena es importante mencionar que en la PTAP actualmente no se aplica ningún tipo de coagulante que ayude al proceso de tratamiento. Finalmente, el agua es almacenada en un tanque elevado donde posteriormente se realiza la cloración antes de la distribución a la red de abastecimiento. En la *Figura 8* se presenta el esquema de la PTAP y el sentido de flujo del agua al paso de la planta de tratamiento.

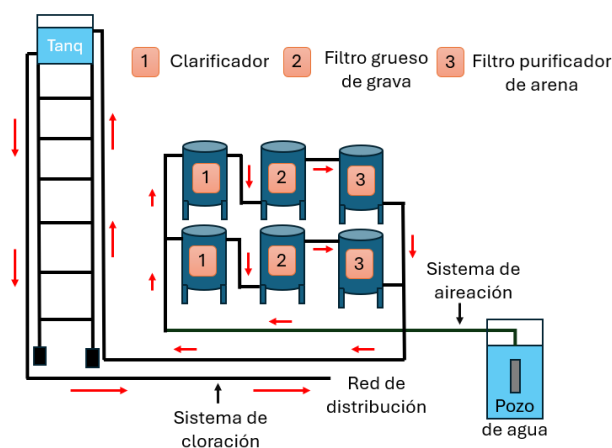


Figura 8. Esquema de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.

- Sistema de alimentación

La PTAP del corregimiento del Hormiguero se alimenta con agua subterránea mediante un pozo con una profundidad de 276 m. El sistema tiene una concesión emitida por la autoridad ambiental del territorio (Corporación autónoma regional del Valle del Cauca - CVC). Sin embargo, no se pudo obtener información de la caracterización de la calidad del agua según lo estipulado en el decreto 2115 de 2007, tampoco se encontró información sobre las pruebas de bombeo que permitan identificar la cantidad de agua que se puede extraer de forma sustentable, tampoco se dispone de información sobre el caudal de operación, niveles estáticos y dinámicos del agua.

La administración del acueducto de El Hormiguero desconoce el estado de la calidad de agua cruda, el volumen total de agua suministrada y caudal máximo aprovechable de agua del pozo, tampoco se mide el agua extraída y el tiempo de bombeo se realiza durante 24 horas al día lo que implica un incumplimiento de las horas estipuladas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, cuyo período máximo debe ser de 16 horas (CVC, 2025).

- Sistema de bombeo y Sistema de aireación

El agua del pozo profundo es extraída mediante un sistema de bombeo ubicado a 100 metros de profundidad por debajo del nivel de terreno. Posteriormente, es aireada en la tubería de impulsión con un compresor de aire y un sistema de tubería de $\frac{1}{2}$ " pulgada con una válvula de chueque que evita el ingreso de agua al sistema de aireación. En la *Tabla 18* se especifican las características de la bomba y los accesorios del sistema de bombeo. Además, en la *Figura 9* se muestra el esquema del sistema de bombeo y aeración.

Tabla 18. Sistema de bombeo y aireación de la PTAP del Hormiguero.

Descripción	
Bomba	- Tipo de bomba: lapicero. - Marca: Franklin. - Caudal: 22 L/s - Altura de bombeo: 70 m. - Potencia: 30 HP. - Eficiencia: 83%.
Accesorios	- Tubería de impulsión: 4 pulgadas de hierro galvanizado. - Componentes: Manómetro (0-150 psi), válvulas (compuerta, ventosa, cheque, mariposa), caudalímetro.

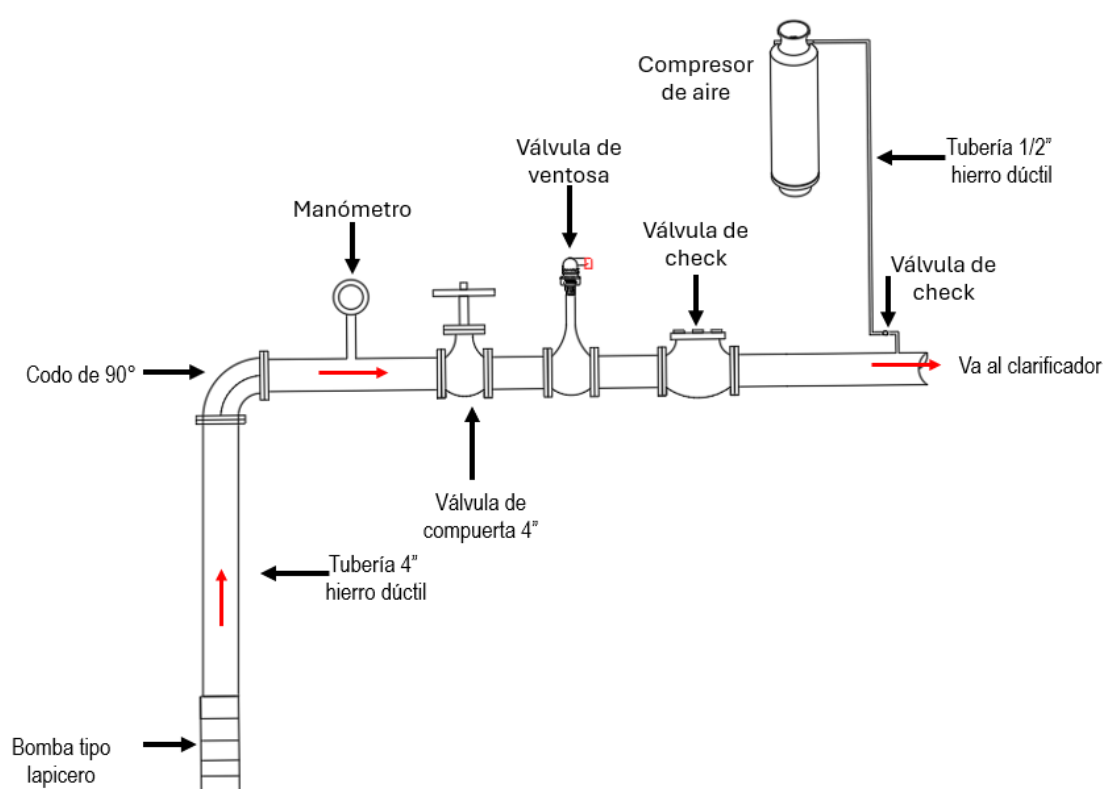


Figura 9. Componente del sistema de bombeo y sistema de aireación.

- Unidades de tratamiento

Las tres unidades de tratamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero son tres tanques de acero de 1,8 m de diámetro por 2 m de altura. El primer tanque (clarificador) fue diseñado con el objetivo de funcionar como tanque de contacto y sedimentador, el segundo tanque es un filtro en grava de flujo ascendente constituido por una capa de soporte y dos capas de material filtrante. Finalmente, el tercer tanque es un filtro de arena de cuarzo de flujo descendente el cual pretende realizar un proceso de pulimiento y retención de todas las partículas (Loaiza, 2009). En la *Tabla 19* se presenta la descripción por cada unidad de tratamiento y en la *Figura 10* se muestra el esquema de funcionamiento.

Tabla 19. Tren de tratamiento de la PTAP del Hormiguero.

Descripción	
Clarificador (Tanque 1)	-Proceso de tratamiento: sedimentador. -Dimensiones: tanque de acero de 1,8 metros de diámetro por 2 metros altura. - Entrada: el agua en este tanque ingresa por la parte superior con una tubería de 4 pulgadas a una estructura interna de forma cilíndrica de 0,5 m de diámetro que genera un flujo descendente. - Salida: el agua sale del cilindro interno hacia la parte externa del tanque clarificador de forma ascendente donde se encuentra una zona de placas inclinadas.
Filtro de grava (Tanque 2)	-Proceso de tratamiento: filtración en grava. -Dimensiones: tanque de acero de 1,8 metros de diámetro por 2 metros altura. - Entrada: el agua ingresa de forma descendente por la parte inferior del tanque por medio una tubería principal de 4 pulgadas y distribuida en el filtro por 12 tuberías de 2 pulgadas. - Medio filtrante: grava de ½” y ¼”. - Salida: el agua sale de la unidad por una tubería de 4 pulgadas a la última de unidad de tratamiento.
Filtro de arena (Tanque 3)	-Proceso de tratamiento: filtración en arena. -Dimensiones: tanque de acero de 1,8 metros de diámetro por 2 metros altura. - Entrada: el agua ingresa por la parte superior del tanque por medio una tubería de 4 pulgadas. - Medio filtrante: arena No. 20-40, arena No. 10-20 y arena No. 6-10. - Salida: el agua sale por 12 tuberías de 2 pulgadas perforadas que van conectadas a una tubería de salida de 4 pulgadas que lleva el agua hasta el tanque de almacenamiento.

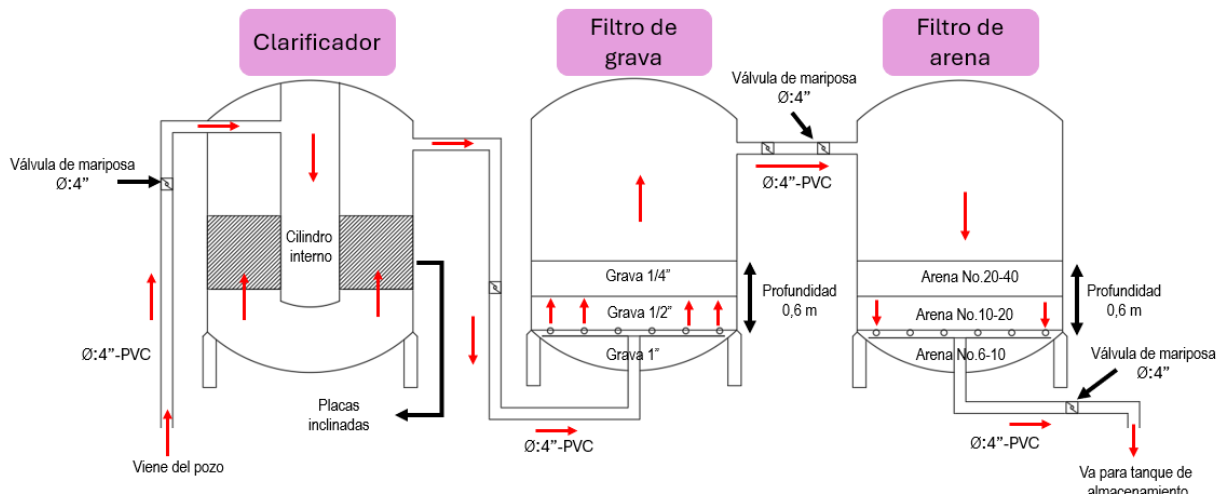


Figura 10. Unidades de tratamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.

- Tanque de almacenamiento y sistema de cloración

Al finalizar el proceso de tratamiento, el agua es llevada a un tanque de almacenamiento (ver Figura 11). Antes de que el agua sale de la PTAP se realiza la cloración por medio de una bomba dosificadora (ver Figura 12). En la Tabla 20 se presenta la descripción del sistema de almacenamiento y cloración.

Tabla 20. Tanque de almacenamiento y sistema de cloración de la PTAP del Hormiguero.

	Descripción
Tanque de almacenamiento	-Dimensiones: 4,2 metros de ancho, 4 metros de largo y 3,4 metros de profundidad. -Altura: 24 metros desde la línea de terreno hasta la losa del tanque. - Entrada: el agua ingresa al tanque por medio de una tubería de 4 pulgadas ubicada a 3 m desde la losa del tanque. - Salida: el agua sale por una tubería de 4 pulgadas ubicada a 0,4 m desde la losa del tanque.
Sistema de cloración	-Dosificación: bomba dosificadora de 7 L/S y una altura de bombeo de 27 mca. -Mecanismo de dosificación: diferencial de presión generado por un tubo Venturi instalado en la tubería de impulsión (ver figura x). - Tipo de desinfectante: hipoclorito de calcio al 70%. - Medio filtrante: grava de ½" y ¼". - Salida: el agua sale de la unidad por una tubería de 4 pulgadas a la última de unidad de tratamiento.

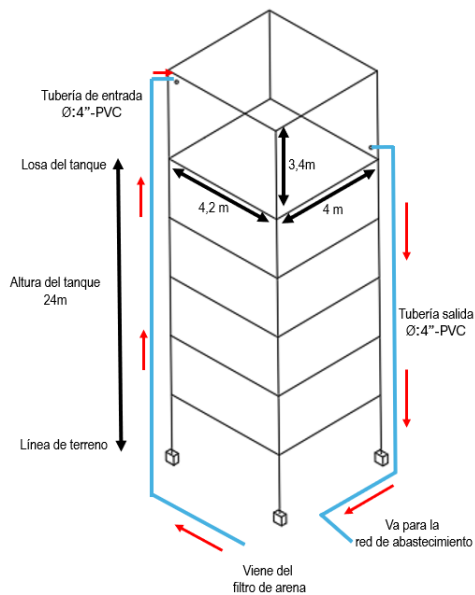


Figura 11. Tanque de almacenamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.

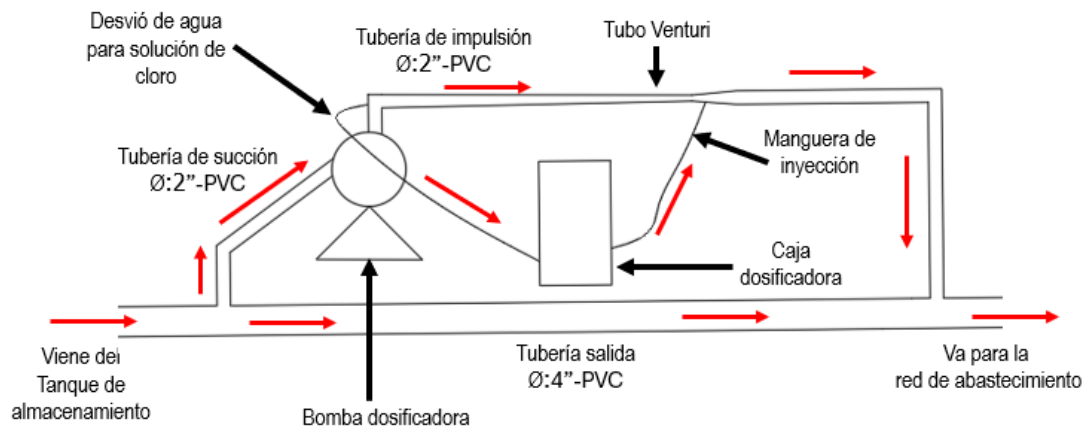


Figura 12. Sistema de cloración de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.

8.1.2 Evaluación de los parámetros de operación

- Estimación del caudal de operación

El caudal de operación de la planta se estimó de manera indirecta, ya que la PTAP no cuenta con un caudalímetro para medir el caudal extraído del pozo. Para ello, se midió tres veces el tiempo de llenado del tanque de almacenamiento de 50 m³ de capacidad. En la *Tabla 21* se presenta los resultados obtenidos y el caudal de operación calculado (11 L/s).

Tabla 21. Estimación del caudal de operación.

Tiempo de llenado del tanque (s)	Caudal de operación (L/S)
4490	11,1
4625	10,8
4525	11,0
Promedio	11,0

-Estimación de los niveles estáticos y dinámicos del pozo

En la *Figura 13* se presenta el comportamiento del nivel dinámico del agua en el pozo para un caudal de operación de 11 L/s. La medición de los niveles de agua indica que se produce una reducción de 3 m durante las 6 horas de operación. Esto indica una columna de agua de 83 m hasta la boquilla de succión de la bomba, asegurando el caudal de bombeo extraído.

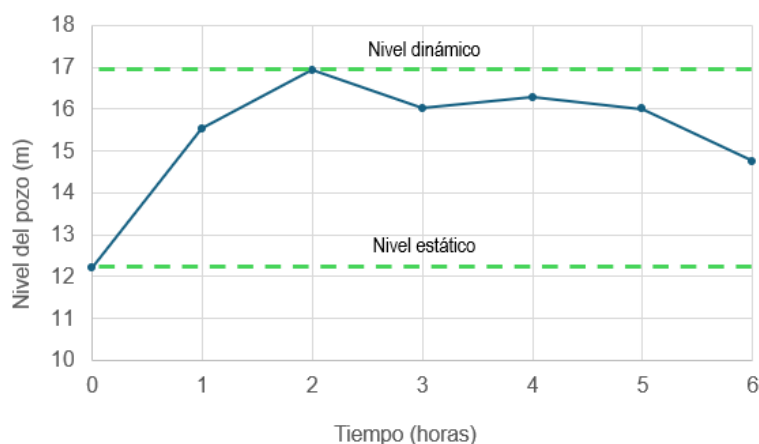


Figura 13. Niveles de agua el pozo de la PTAR del corregimiento del Hormiguero.

- Revisión del sistema de bombeo

La revisión del sistema de bombeo se realizó con el objetivo de determinar si la bomba estaba correctamente seleccionada. Por tanto, se buscó la curva característica de la bomba y se determinó la curva de pérdidas del sistema teniendo en cuenta las pérdidas de energía por fricción, pérdidas menores por accesorios y pérdidas generadas en la planta, las cuales se determinaron con la instalación de dos manómetros a la entra y a la salida de la planta. En la *Figura 14* se presenta la intersección de la curva de la bomba con la curva de pérdidas de energía del sistema. Se observa como el punto de operación real de la bomba (círculo rojo) se encuentra desplazado del punto de máxima eficiencia (círculo azul). Si bien se descartaron problemas de cavitación, ya que el NPSH disponible (52,5 m) es muy superior al NPSH requerido (3,89 m), el funcionamiento constante fuera del rango óptimo reduce la vida útil del impulsor, disminuye la eficiencia energética y aumenta el consumo de energía y los costos operativos. (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, 2018).

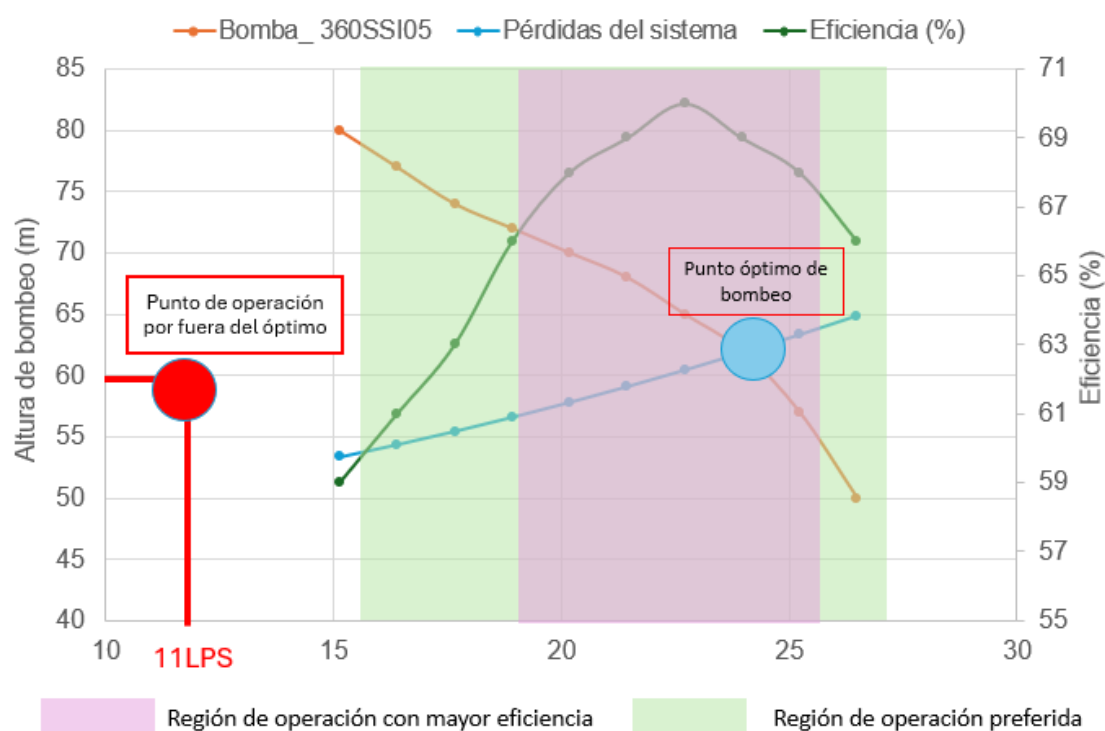


Figura 14. Ubicación del punto óptimo de operación del sistema de bombeo.

- Análisis de consumo del sistema de bombeo

Con el objetivo de evaluar el consumo de energía y el gasto mensual por el sistema de bombeo. En la *Tabla 22* se presenta la comparación entre la bomba actual de la PTAP del corregimiento del Hormiguero y la bomba requerida según las condiciones actuales de caudal de operación y altura dinámica. Se observa como la bomba actual de la PTAP tiene una baja eficiencia del 43% con un elevado consumo energético de 22Kwh que generan gastos económicos a la planta de más de \$ 12'000.000 cada mes (ver figura 15) y un costo de tratamiento de 48 \$/m³. Por otra parte, al seleccionar una bomba con una mayor eficiencia los gastos mensuales se reducen a \$5'000.000 por mes, bajando los costos de tratamiento a 19 \$/m³. Por lo tanto, la bomba actual de la PTAP se encuentra sobre dimensionado para las condiciones de altura de bombeo y caudal de operación actual generando sobre costos en el tratamiento.

Tabla 22. Comparación de la bomba actual y requerida de la PTAP del Hormiguero.

	Bomba actual	Bomba requerida
Caudal (L/S)	11	11
Altura de bombeo (m)	56	56
Porcentaje de eficiencia (%)	43	80
Potencia (Kwh)	22	8
Tiempo de bombeo (h)	24	16

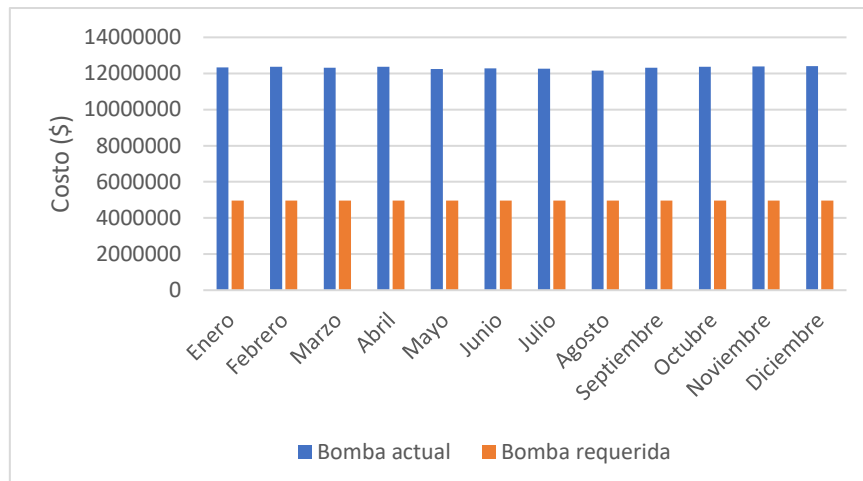


Figura 15. Consumo de energía del sistema de bombeo de la PTAP del Hormiguero.

- Revisión de las unidades de tratamiento.

Las unidades de tratamiento de la PTAP del corregimiento del Hormiguero se evaluaron teniendo en cuenta el proceso de tratamiento (coagulación, floculación y sedimentación) que realizarían si se aplicara un coagulante en el proceso de tratamiento. Por lo tanto, se calcularon los tiempos de retención y gradientes de mezcla. En la *Tabla 23* se presentan los parámetros calculados en cada unidad de tratamiento. Estos se compararon con los valores óptimos determinados en el ensayo de jarras presentando en el apartado 8.2, donde se determinaron los valores de tiempo y gradiente de mezcla rápido y lento.

Tabla 23. Parámetros de operación en unidades de tratamiento.

Proceso de tratamiento	Unidad de tratamiento	Parámetros	Valor calculado	Valor óptimo
Coagulación	Punto de dosificación-clarificador	Tiempo de mezcla rápida (s)	20	40
		Gradiente de mezcla rápida (RPM)	5239	280
Coagulación - Floculación	Clarificador (cilindro interno)	Tiempo de mezcla lenta(s)	65	40
		Gradiente de mezcla lenta (RPM)	346	280
Floculación	Clarificador (cilindro externo)	Tiempo de mezcla lenta (min)	14	15
		Gradiente de mezcla lenta (RPM)	154	30
Filtración	Filtro de grava	Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	191	7,2 -14,4 (MVCT,2017)
Filtración	Filtro de arena	Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	191	7 – 14 (MVCT,2017)

En la *Tabla 23* se observa como el tiempo de coagulación inicia en el punto de dosificación - clarificador y finaliza en el cilindro interno del clarificador, sin embargo, las altas velocidades que se presentan en el tramo P1-clarificador (1,6 m/s) no permiten

cumplir con el gradiente óptimo. La floculación, por su parte, inicia en el cilindro interno del clarificador y finaliza en el cilindro externo del mismo. No obstante, el gradiente de mezcla lento calculado es elevado con respecto al óptimo evitando la formación del flocs.

Al no permitir una buena formación del floc en el proceso de coagulación y floculación, no se puede garantizar una buena sedimentación de partículas floculentas (Crittenden et al., 2012), además, las unidades existentes no garantizan condiciones óptimas de sedimentación como la velocidad de sedimentación crítica (V_{cs}) ya que la unidad de grava donde se tendría la sedimentación presenta una velocidad de 0,2 cm/s, valor que se encuentra por encima de lo recomendado por Crittenden et al. (2012) (0,03 a 0,04 cm/s). Esto conlleva a una sobre carga en los filtros de grava y arena debido a la retención de partículas generando la colmatación de los filtros, ver *Figura 16*. Adicionalmente, la PTAP no tiene un plan definido para el lavado de los filtros, así como, un tiempo mínimo y caudal de lavado que permita la limpieza de las unidades. Asimismo, el sistema de drenaje para limpieza se encuentra mal diseñadas y taponadas lo que impide la expansión del medio filtrante *Figura 17*.



Figura 16. Estado interno del filtro de arena y grava sedimentos gelatinosos.



Figura 17. Manifold de lavado de los filtros, con ranuras obstruidas.

Revisión del comportamiento de la calidad de agua

La falta de aplicación de un coagulante, el mal funcionamiento de las unidades de tratamiento y la escasez de información de la calidad de agua en la PTAP del corregimiento del Hormiguero produjo la necesidad de realizar mediciones del agua cruda y tratada durante un mes, para los parámetros de interés sanitario característicos de las aguas subterráneas como el hierro, el manganeso y los fosfatos y así verificar el cumplimiento de los valores establecidos en la resolución 2115 del 2007 del ministerio de salud.

La *Figura 18* presenta las concentraciones de hierro para el agua cruda (afluente) y el efluente de la planta valores por encima de los 0,30 mg/L de hierro que establece la resolución 2115 del 2007. Por otra parte, la *Figura 19* presenta los resultados obtenidos de la concentración de manganeso en el afluente y el efluente de la planta donde ningún

valor del efluente cumple con la resolución 2115 de 2007 ya que el valor limite es de 0,1 mg/L, sin embargo, a diferencia del hierro, la exposición constante de manganeso ha demostrado problemas en el sistema nervioso ya que produce efectos neurológicos en las personas (USEPA, 2004). Por lo tanto, es de gran preocupación sanitaria la presencia del manganeso en el efluente de la PTAP del corregimiento del Hormiguero.

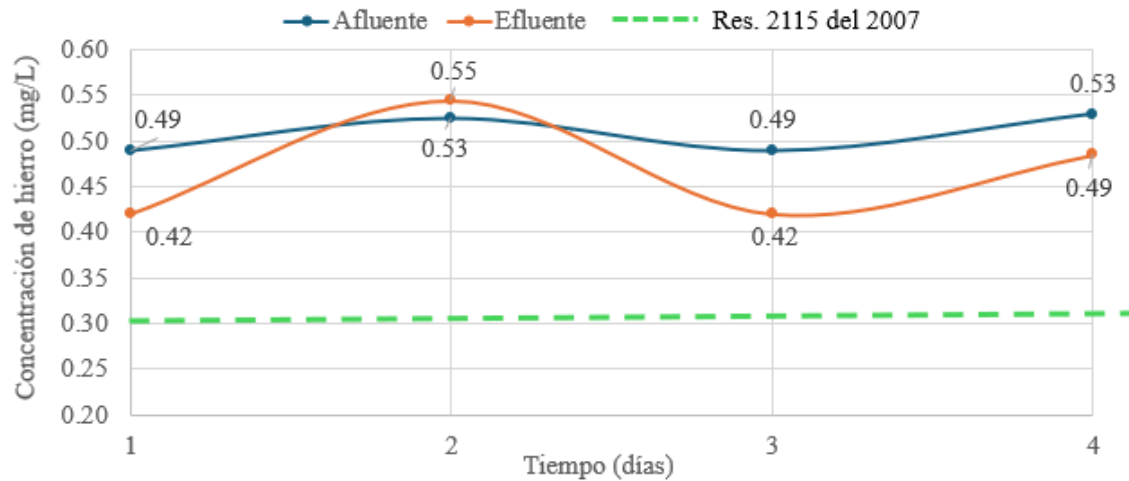


Figura 18. Comportamiento de hierro en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero.

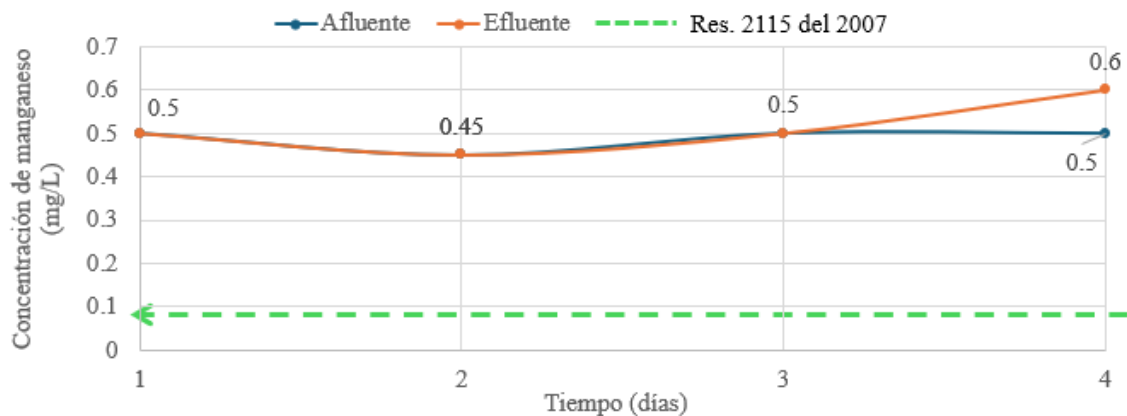


Figura 19. Comportamiento de manganeso en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero.

El comportamiento de los fosfatos se presenta en la *Figura 20*, se encontraron valores entre 1,0 y 6,5 mg/L en el afluente Por otra parte, los valores del efluente se presentaron entre 2,0 y 2,5 mg/L incumpliendo con el 0,5 mg/L de fosfato estipulado en la resolución 2115 del 2007. Además, estos valores inducen a la proliferación de biopelícula en la red de abastecimiento generando problemas de obstrucción y crecimiento de microorganismos que pueden afectar la salud humana (Song et al., 2011).

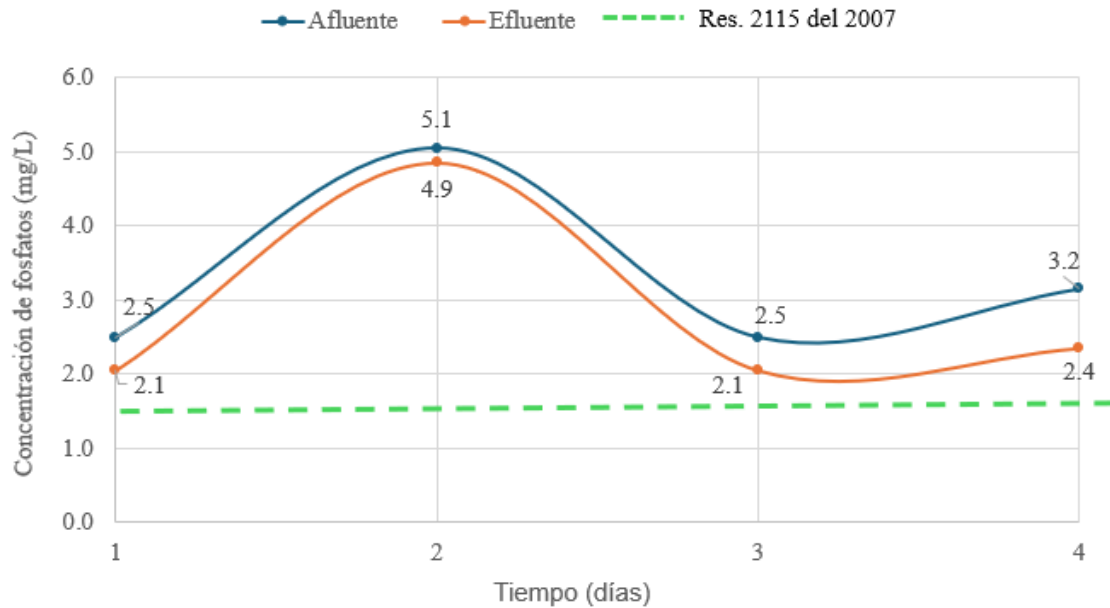


Figura 20. Comportamiento de fosfatos en la PTAP del Corregimiento del Hormiguero.

La *Figura 21* muestra el comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto generado por el sistema de inyección de aire de la PTAP. Se observa como los niveles de oxígeno del efluente se encuentran por debajo 5 mg/L valor recordado para la oxidación del hierro y manganeso (Fuentes, 2013; Hernández, 2019). Esto ha llevado a precipitados de hierro en el tanque de almacenamiento, tuberías de distribución y color rojizo en el agua que llega a las casas de los usuarios.

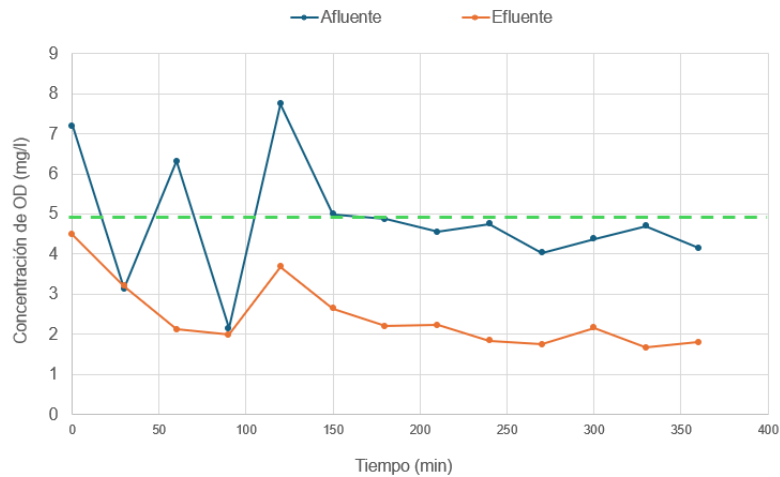


Figura 21. Comportamiento del oxígeno disuelto en la PTAP del Hormiguero.

8.1.3 Identificación y priorización de problemas

En la *Tabla 24* se presenta los principales problemas identificados en la PTAP del hormiguero.

Tabla 24. Problemas identificados en la PTAP del Hormiguero.

Problema identificado	Descripción del problema
Concesión del pozo de agua	Falta de concesión para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, incumplimiento con el artículo 29 del acuerdo No. 0.03 de 2025 de la CVC. Esto será objeto de la aplicación de las medidas preventivas o sancionatorias de la ley 1333 de 2009.
Micromedidor	Falta de medición del consumo del agua subterránea, incumpliendo con el artículo 37 del acuerdo No. 0.03 de 2025 de la CVC. Igualmente, no se lleva registro de la fecha y hora de operación diaria. Esto será objeto de la aplicación de las medidas preventivas o sancionatorias de la ley 1333 de 2009.
Sistema de bombeo	Sobre dimensionamiento de la bomba del pozo de agua la cual opera por fuera del punto óptimo de operación, reduciendo su vida útil, trabajando ineficientemente y generando sobre costos de operación.
Sistema de aireación	Incapacidad del sistema de aireación para garantizar la oxidación de hierro. Además, incrementa los costos de operación y colmata el sistema de tratamiento de aire generando problemas operación.
Tren de tratamiento (Clarificador, filtro de grava y arena)	Incapacidad de las unidades de tratamiento para garantizar tiempos y gradientes óptimos de mezcla rápida y lenta que permitan la remoción del hierro, manganeso y fosfatos.
Mantenimiento	Deficiencia en el mantenimiento de los filtros de grava y arena debido al desconocimiento de la carrera de filtración y caudal de lavado.
Calidad de agua	Concentraciones de hierro, manganeso y fosfatos por encima de lo establecido por la resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Salud.

8.2 Aplicación de la coagulación como optimización de la PTAP del Hormiguero

8.2.1 Selección de coagulante óptimo

La selección del coagulante óptimo para la aplicación en la PTAP del Hormiguero se basó en la concentración de fosfatos, al ser este el parámetro más difícil de remover. Sin embargo, se midió la concentración de hierro y manganeso al mejor resultado de fosfatos para verificar el cumplimiento con la norma.

Las Figuras 22 y 23 se presentan los resultados obtenidos para los coagulantes Sulfoc y FeCl_3 . La dosis óptima para cada uno fue de 100 mg/L y 20 mg/L, respectivamente, utilizando en ambos casos una dosis de cal de 60 mg/L. Si bien ambos coagulantes cumplen con el límite establecido para fosfatos en la Resolución 2115 de 2007, se seleccionó el FeCl_3 como la mejor opción debido a su menor costo operativo ya que el costo por metro cúbico de agua tratada con Sulfoc es de 350 \$/m³, mientras que el tratamiento con FeCl_3 tiene un costo de 100 \$/m³ (ver Tabla 25).

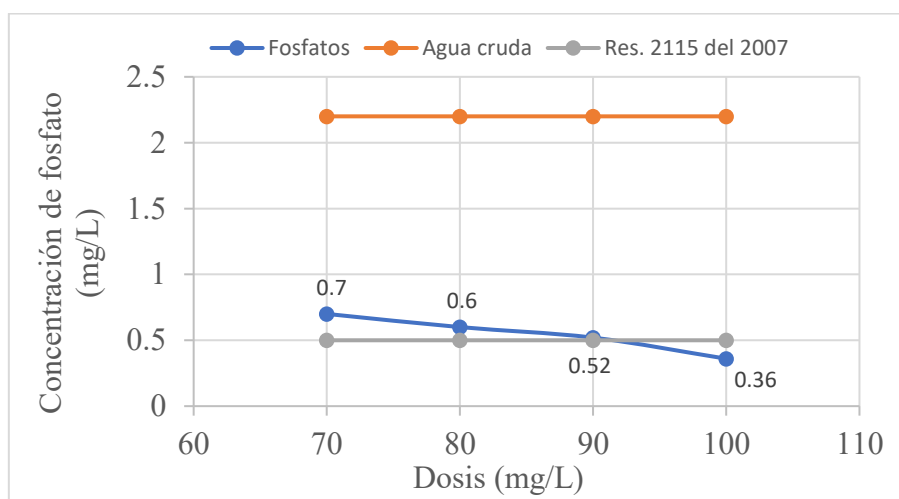


Figura 22. Comportamiento del fosfato en las pruebas con Sulfoc y 60 mg/L cal.

Nota: concentración de hierro 0,04 mg/L y 0,1 mg/L de manganeso con dosis de 100 mg/L.

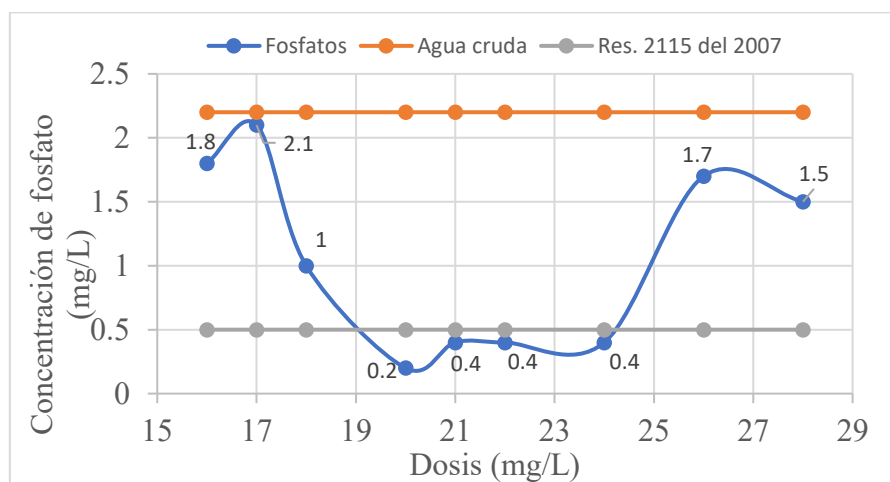


Figura 23. Comportamiento del fosfato en las pruebas con FeCl_3 y 60 mg/L cal.

Nota: concentración de hierro 0,15 mg/L y 0,0 mg/L de manganeso con dosis de 20 mg/L.

Tabla 25. Análisis de costo por metro cubico de agua tratada con FeCl₃ y Sulfoc.

	Insumo	Dosis óptima (mg/L)	Consumo total por día (kg)	Costo por unidad (\$)	Costo (\$/d)	Costo (\$/m ³)
Operación FeCl₃	FeCl ₃	20	173	\$ 2.000	\$ 345.600	\$ 40
	Cal	60	518	\$ 1.000	\$ 518.400	\$ 60
	Total				\$ 864.000	\$ 100
Operación Sulfoc	Sulfoc	100	864	\$ 2.900	\$ 2.505.600	\$ 290
	Cal	60	518	\$ 1.000	\$ 518.400	\$ 60
	Total				\$ 3.024.000	\$ 350

Con el objetivo de reducir los costos de operación, se realizó un ensayo para disminuir la concentración de cal aplicada. La *Figura 24* se observa una concentración de fosfatos de 0,2 mg/L con una concentración de cal de 40 mg/L, lo que implica una reducción de 100 \$/m³ a 80 \$/m³.

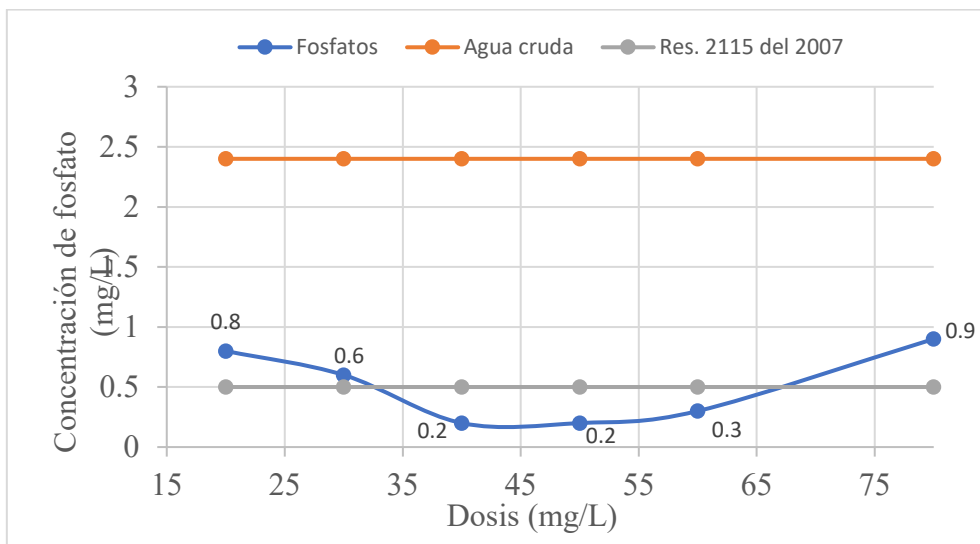


Figura 24. Comportamiento del fosfato en las pruebas con cal y 20 mg/L FeCl₃.

Nota: concentración de hierro 0,10 mg/L y 0,0 mg/L de manganeso con dosis de 20 mg/L.

8.2.2 Aplicación de cloruro férrico en la PTAP del Hormiguero

En las *Figuras 25, 26 y 27* se presentan los resultados obtenidos del comportamiento del cloruro férrico en la remoción de hierro, fosfatos y manganeso en la PTAP del Hormiguero para los 3 días de ensayos. Las mediciones fueron hechas en el punto presentado en la *Figura 7*.

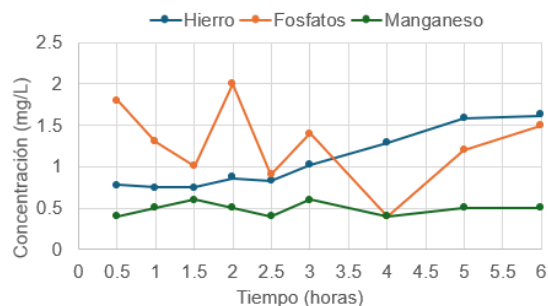


Figura 25. Resultados de la primera jornada de aplicación de cloruro férrico.

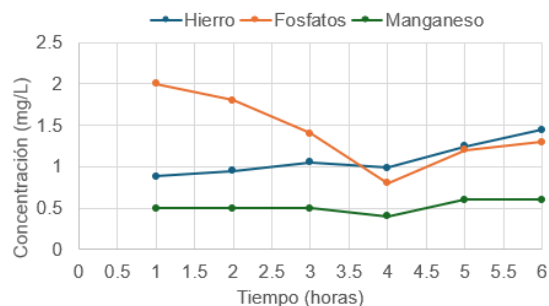


Figura 26. Resultados de la segunda jornada de aplicación de cloruro férrico.

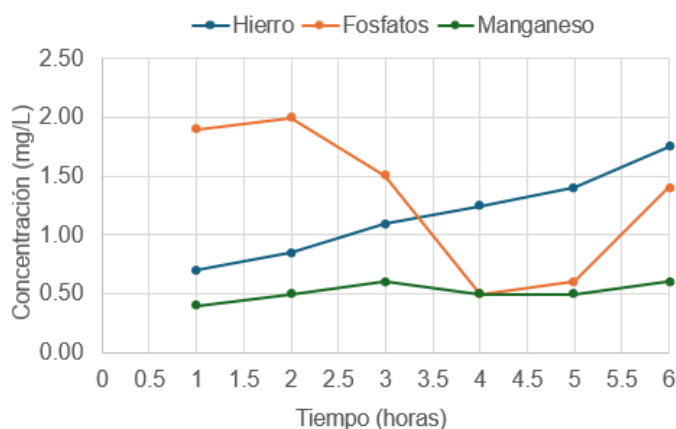


Figura 27. Resultados de la tercera jornada de aplicación de cloruro férrico.

Los resultados para los 3 días de prueba indican un comportamiento similar donde la concentración de hierro tiende al aumento a causa de la aplicación del FeCl_3 a lo largo del ensayo. Por otra parte, los fosfatos en las primeras horas de la prueba tuvieron una tendencia a disminuir su concentración, sin embargo, siempre estuvieron por encima de 0,5 mg/L establecidos en la resolución 2115 del 2007. Por último, se observa como la aplicación del coagulante no tuvo una influencia en la remoción del manganeso el cual se mantuvo constante.

Según los resultados de la aplicación de cloruro férrico en la PTAP del Hormiguero se demuestra, la ineficiencia de la planta para la remoción de contaminantes como hierro, fosfatos y manganeso debido a las malas condiciones de operación como gradientes óptimos de mezcla, tiempos de coagulación, floculación y sedimentación que no se cumplen para realizar un buen proceso de tratamiento. Adicionalmente, la aplicación de un coagulante en una planta de flujo a presión implica el uso de una bomba dosificadora que incrementa los costos de operación y conducen a daños en el sistema debido a las altas presiones como se presentó en los ensayos realizados *Figura 28*. Por tanto, se requiere plantear una restructuración de la PTAP que garantice la remoción óptima de contaminantes donde se asegure una sencillez operativa que permita reducir los costos de operación y mantenimiento.



Figura 28. Problemas en la aplicación del cloruro férrico en la PTAP.

8.3 Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero

8.3.1 Descripción de alternativas de optimización.

Las alternativas de optimización propuestas para la PTAP del Hormiguero se presentan en la *Tabla 26*.

Tabla 26. Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.

	Descripción
Alternativa 1	Optimización de los procesos de tratamiento existentes de la PTAP dosificando un coagulante para el proceso de coagulación-floculación seguido de un cambio de los medios filtrantes para mejorar el proceso de filtración existente.
Alternativa 2	Diseño de una PTAP implementando bandejas de aireación para la remoción de gases disueltos. Posteriormente, se realizará la coagulación en una unidad de mezcla rápida, seguida de una floculación en medio granular. El agua floculada pasa a un sistema de sedimentación de alta tasa. El efluente del sedimentador ingresa a un proceso de filtración directa donde finalmente pasa a un proceso de desinfección.
Alternativa 3	Diseño de una PTAP implementando bandejas de aireación para la remoción de gases disueltos. Posteriormente, se realizará la coagulación en una unidad de mezcla rápida, seguida de una floculación en medio granular. El agua floculada pasa a un proceso de filtración por membranas cerámicas donde finalmente pasa a un proceso de desinfección.

La *Figura 29* muestra el tren de tratamiento propuesto para las tres alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.

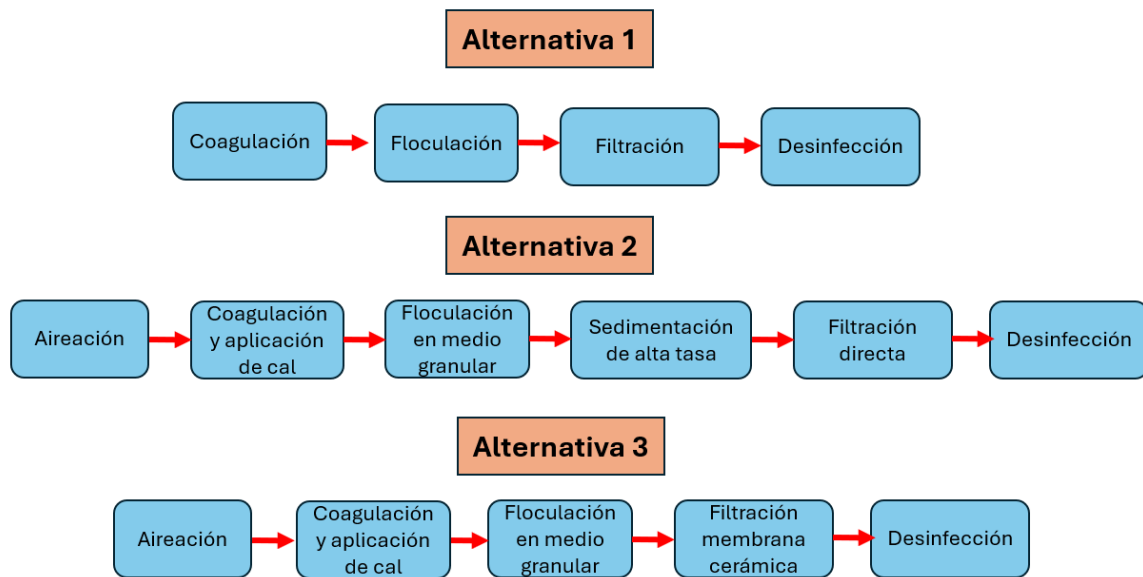


Figura 29. Alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero.

8.3.2 Selección de alternativa de optimización de la PTAP del Hormiguero.

En la *Figura 30* se presenta el resultado de los pesos porcentuales de los criterios de selección de acuerdo con la opinión de los profesionales encuestados. El criterio técnico y económico fueron los de mayor importancia seguido del criterio social y ambiental. Por lo tanto, para considerar la implementación de una alternativa de optimización en la PTAP del hormiguero es importante tener presente costos de inversión inicial, O&M, eficiencia de remoción y complejidad operativa.

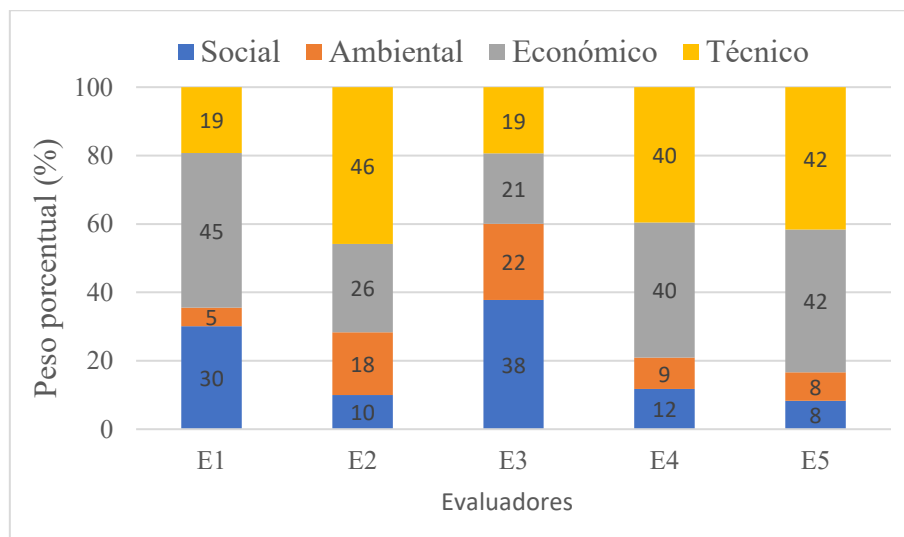


Figura 30. Resultados de los pesos porcentuales por cada criterio de evaluación.

Nota: los resultados tuvieron una razón de consistencia del 3,32 % menor al 10% recomendado para una inconsistencia aceptable.

En la *Figura 31* se presenta el resultado de los pesos porcentuales de las alternativas de optimización de la PTAP del Hormiguero de acuerdo con la opinión de los evaluadores encuestados. Se observa que a diferencia del evaluador 2 y 5, la mejor alternativa de optimización es la número 2 (aireación, coagulación, floculación en grava, sedimentación de alta tasa, filtración directa y desinfección) con un porcentaje de 42 a 50 %.

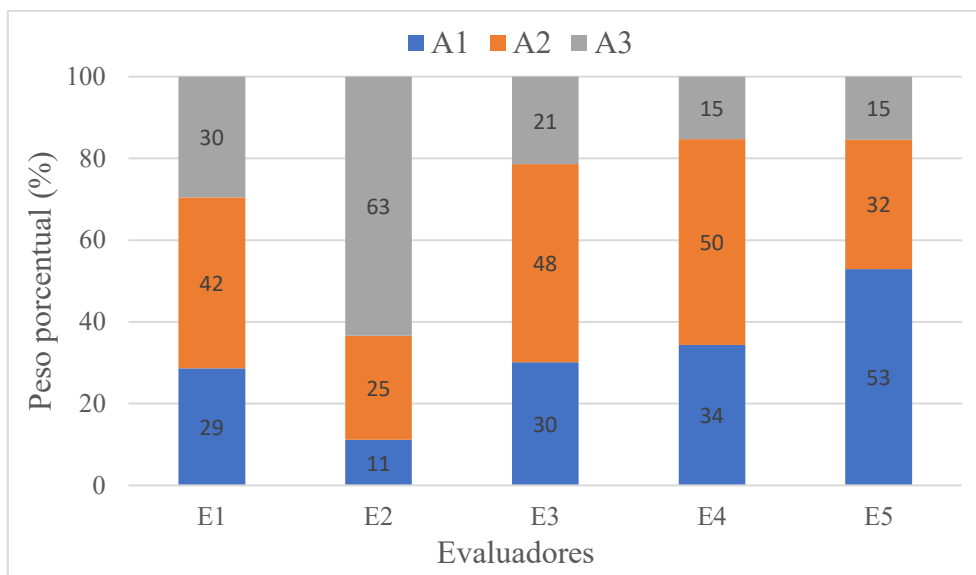


Figura 31. Resultados de los pesos porcentuales por cada alternativa de optimización.

Nota: los resultados tuvieron una razón de consistencia del 5,52 % menor al 10% recomendado para una inconsistencia aceptable.

8.4 Alternativa de mejora de la PTAP del Hormiguero

La alternativa de mejora propuesta para la PTAP del Hormiguero consistió en una planta de flujo a gravedad seleccionando un sistema de bombeo que descargue a una estructura de aireación, seguido de una unidad de coagulación. Posteriormente, se buscó utilizar los tanques existentes para realizar los procesos de floculación, sedimentación y filtración. Por último, se estableció un sistema de cloración que permitiera el tiempo de contacto de cloro en el agua. Finalmente, el agua será bombeada desde un pozo de succión hasta el tanque de almacenamiento elevado. En la *Figura 32* se presenta el tren de tratamiento y el funcionamiento hidráulico perfil de la alternativa de mejora de la PTAP del Hormiguero. Esta solución implica doble bombeo, pero facilita la labor de operación y mantenimiento de la planta y controlar de una manera eficaz y eficiente el control del agua cruda de entrada a la planta para facilitar la coagulación y el control del caudal que ingresa al tanque de almacenamiento.

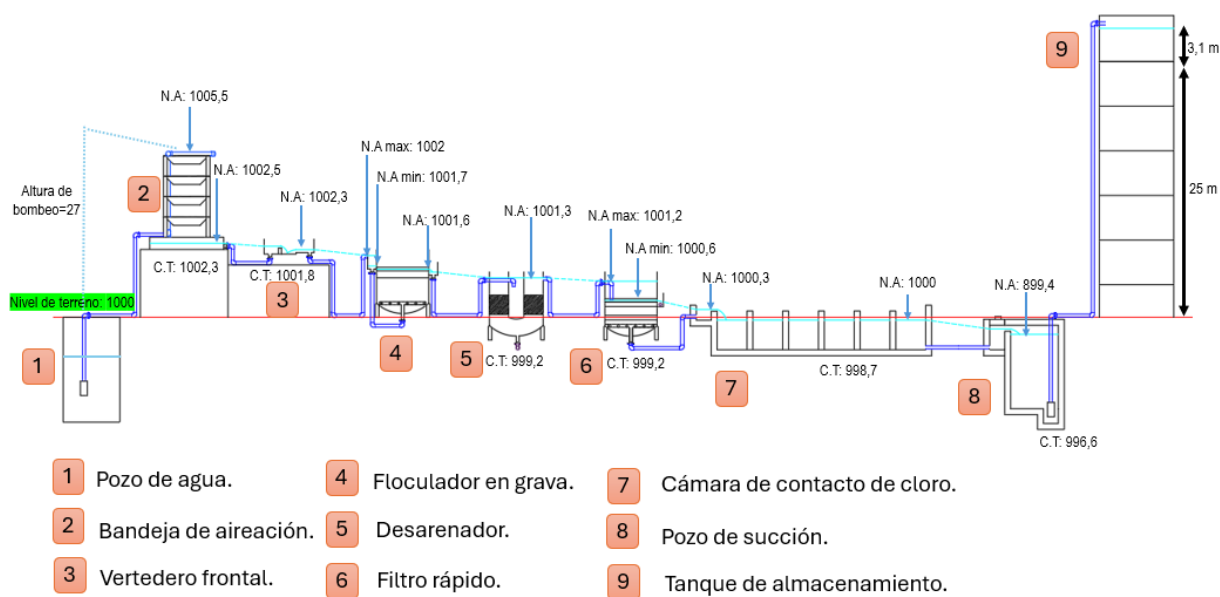


Figura 32. Perfil hidráulico de la alternativa propuesta.

8.4.1 Determinación del caudal de diseño

La estimación del caudal de diseño se determinó teniendo en cuenta los datos demográficos establecidos en el documento gubernamental de la Alcaldía de Santiago de Cali (2023) donde se establecieron el número total de centros de salud, colegios y cuarteles de policía. Además, se proyectó la población de 2025 (3.693 habitantes) al periodo de diseño (25 años) establecido en el (MVCT, 2017). Por último, se estableció un porcentaje de pérdidas de agua del 50% teniendo en cuenta la antigüedad de la red de abastecimiento y los problemas de O&M reportados por el acueducto. En la *Tabla 27* se presentan los resultados de los caudales de diseño.

Tabla 27. Caudales de diseño.

Caudal de diseño (L/s)	Valor
Qmd	12,03
QMD (k1= 1,2)	14,4
QMH (k2=1,5)	18,05

8.4.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo se determinó teniendo en cuenta la altura estática total desde la ubicación de la bomba hasta la entrada a las torres de aireación, además se calculó las pérdidas de energía generadas por los accesorios característicos de un sistema de succión negativa *Figura 33*. Por último, se seleccionó la bomba y se calculó el consumo mensual del sistema *Tabla 28*.

Tabla 28. Sistema de bombeo.

Parámetro	Valor
Caudal de bombeo (L/s)	22
Altura de bombeo (m)	26,5
Potencia (Hp)	10
Eficiencia (%)	72
Tiempo de bombeo (h)	16
Consumo mensual (\$)	3'261.600

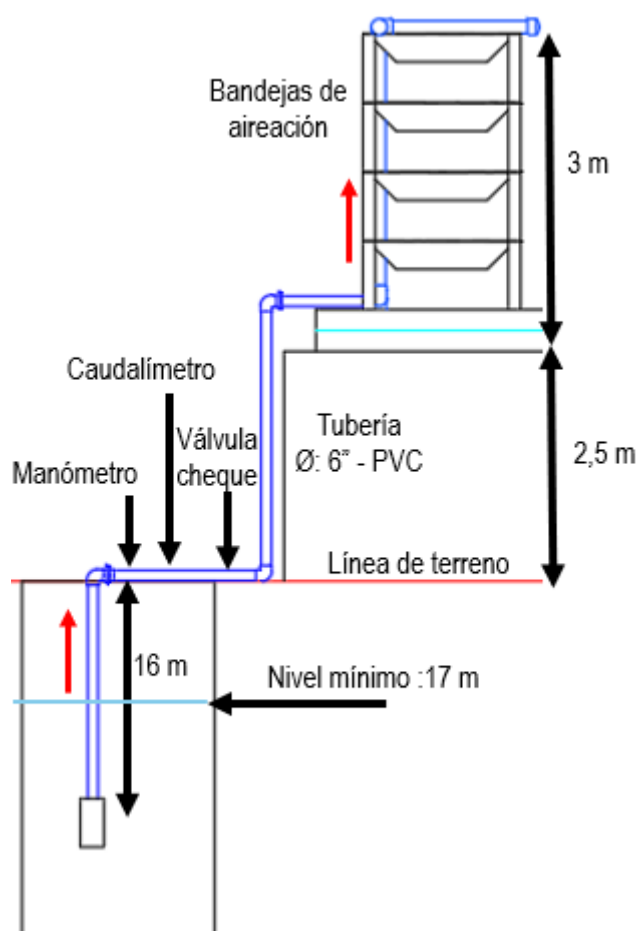


Figura 33. Sistema de bombeo pozo- estructura de aireación.

8.4.3 Sistema de aireación

La primera etapa del proceso de tratamiento consistió en un sistema de bandejas de aireación, ubicado al inicio del sistema de tratamiento para garantizar una adecuada oxigenación del agua. Esta unidad es fundamental, ya que favorece la remoción de gases disueltos (CO_2 y H_2S), mejora la calidad organoléptica del agua y promueve la oxidación de metales como hierro y manganeso, facilitando su posterior eliminación. En la *Figura 34* se ilustra la disposición de las bandejas, mientras que en la *Tabla 29* se presentan los parámetros técnicos y dimensiones considerados para su implementación.

Tabla 29. Bandejas de aireación.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/s)	14,4
Carga hidráulica (m/d)	500
Altura total (m)	2,7
Número de bandejas	4
Distancia entre bandejas (m)	0,4
Altura de bandeja (m)	0,2
Altura de bandeja receptora (m)	0,3
Diámetros de orificios (m)	0,006
Espacio entre orificios (m)	0,25
Número de orificios	480
Área de las bandejas (m ²)	2,5
Largo (m)	1,6
Ancho (m)	1,6
Oxígeno disuelto transferido (mg/L)	4,5

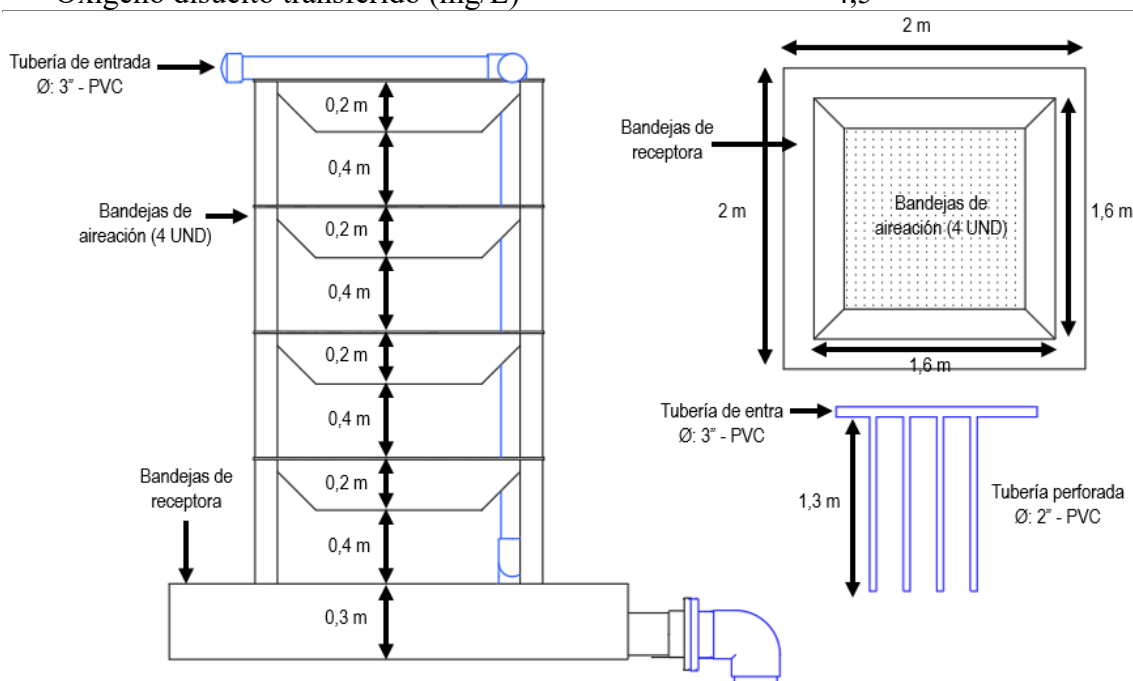


Figura 34. Bandejas de aireación.

8.4.4 Unidad de coagulación

Se calculó un sistema con vertedero para realizar el proceso de coagulación, garantizando una distribución homogénea del coagulante (cloruro férrico) y una mezcla eficiente. Para lograr esto, se garantizó un gradiente óptimo de mezcla rápido de 288 s^{-1} . La alternativa hidráulica del vertedero se presenta en la *Tabla 30* y en la *Figura 35* se presenta la distribución del vertedero.

Tabla 30. Vertedero frontal.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/S)	14,4
Ancho (m)	0,2
Altura (m)	0,05
Largo de la zona del resalto (m)	0,3
Altura del muro dissipador de energía (m)	0,05

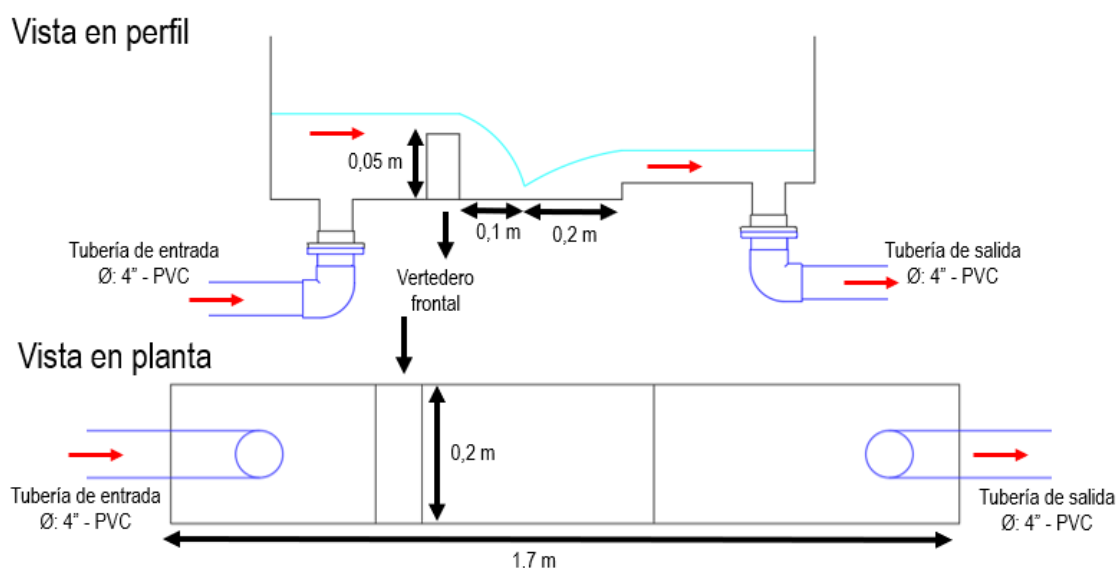


Figura 35. Vertedero frontal.

8.4.5 Unidad de floculación

El proceso de floculación se realizó mediante un floculador en grava utilizando los tanques existen en la PTAP del Hormiguero. El floculador es de flujo ascendente donde el agua entra por una tubería principal de 4 pulgadas y se distribuye en un sistema de tuberías perforadas de 2 pulgadas. Posteriormente, el agua pasa por 0,8 m de material granular (A.S.T.M. No. 5) donde se garantizó un gradiente de mezcla lento de (37 s^{-1}) *Tabla 31*. En la *Figura 36* se presentan el floculador para la PTAP del Hormiguero.

Tabla 31. Floculador en grava.

Parámetro		Valor
Caudal de diseño (L/s)		14,4
Número de floculadores		2
Caudal por la línea de tratamiento (L/s)		7,2
Floculador	Diámetro (m)	1,8
	Altura (m)	2
Tubería de entra	Diámetro (pulg)	4
	Diámetro (pulg)	2
Tuberías perforadas de recolección	Diámetro de orificios (m)	0,008
	Número de orificios	152
Canaletas recolectoras	Largo (m)	2
	Ancho (m)	0,3
	Profundidad (m)	0,3
Material granular	Especificación	A.S.T.M. No. 5
	Altura (m)	0,8
Material de soporte	Diámetro (pulg)	1"
	Altura (m)	0,2
Condiciones de lavado	Caudal (L/s)	12
	Pérdidas de energía (m)	0,3

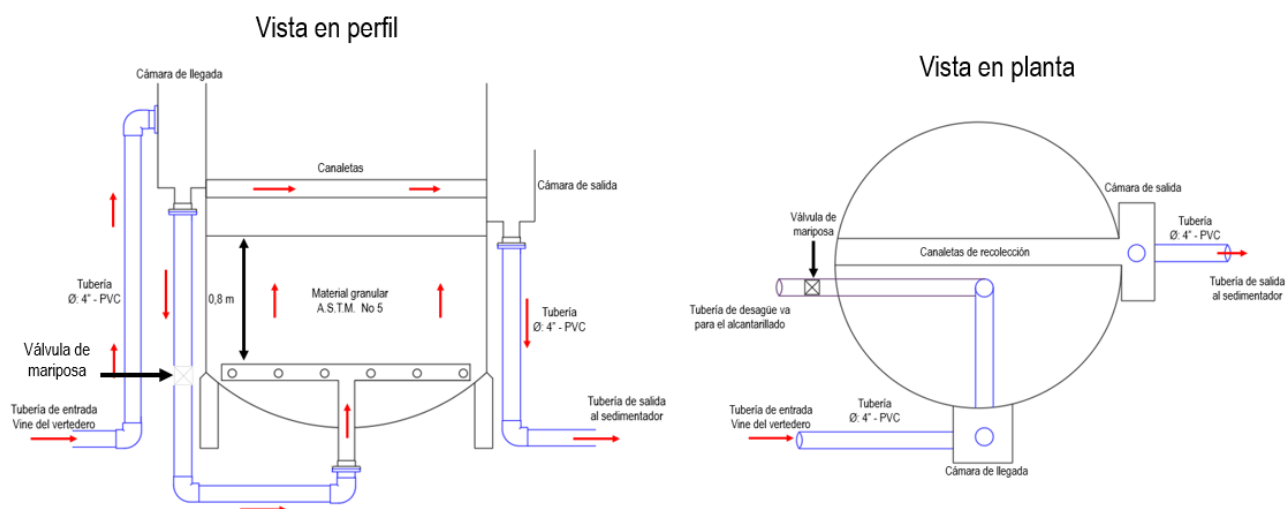


Figura 36. Floculador en grava.

8.4.6 Unidad de sedimentación

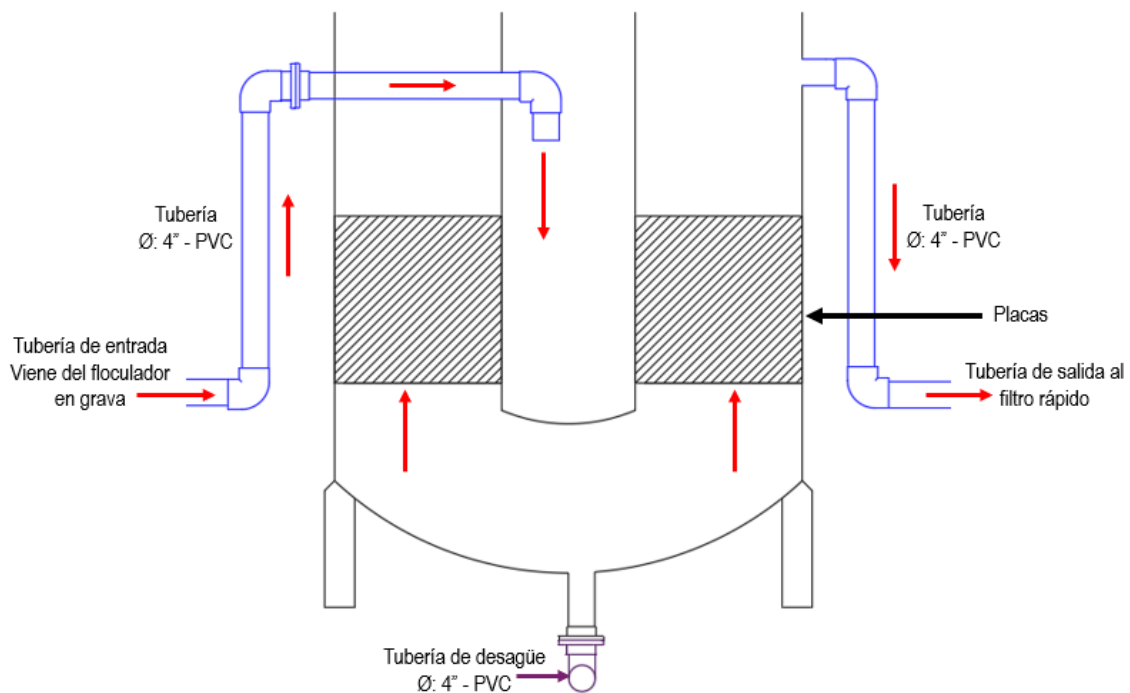
La unidad de sedimentación de alta tasa se dimensionó acorde con el tanque clarificador que actualmente existe en la PTAP del Hormiguero. Se verificó el cumplimiento del tiempo óptimo (15 minutos) y la velocidad de sedimentación crítica (0,03 – 0,04 cm/s). En la *Tabla 32* se presenta el sedimentador y en la *Tabla 33* se muestra los parámetros recomendados que deben tener los módulos de placas para garantizar el proceso de tratamiento.

Tabla 32. Sedimentador.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/s)	14,4
Número de sedimentadores	2
Caudal por la línea de tratamiento (L/s)	7,2
Diámetro (m)	1,8
Área de sedimentación (m ²)	2,5
Velocidad de arrastre (cm/s)	0,29
Carga superficial (m ³ /m ² /d)	250
Velocidad crítica de sedimentación (cm/s)	0,04

Tabla 33. Parámetros de recomendados para los módulos de placas.

Parámetro	Valor
Altura vertical (m)	1
Ancho (m)	1
Longitud de la placa (m)	1,15
Distancia entre placas (m)	0,087

**Figura 37.** Sedimentador de alta tasa.

8.4.7 Unidad de filtración rápida

El sistema de filtración rápida como etapa final de del proceso de tratamiento se presenta en la *Figura 38*. El filtro rápido se dimensiono acorde con el tanque existente en la PTAP el cual tendrá una tasa de filtración de 250 m³/m²/d (ver *Tabla 34*) y un medio filtrante de grava *Tabla 35*. Por último, se rediseño el sistema de recolección laterales teniendo en

cuenta el caudal de lavado, las longitudes de la tubería en función del diámetro del filtro y el número de orificios para realizar un buen proceso de retro lavado *Tabla 36*.

Tabla 34. Filtro en grava.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/s)	14,4
Número de filtros	2
Caudal por la línea de tratamiento (L/s)	7,2
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	250
Área de filtración (m ²)	2,5
Diámetros (m)	1,8
Altura (m)	1,8

Tabla 35. Medio filtrante recomendado.

Tamaño de grava (pulg)	Altura (m)
1/4 “- 1/2”	0,8
1/2” – 3/4”	0.15
3/4” – 1”	0.15

Tabla 36. Recolectores principales, laterales y canaletas.

Parámetro		Valor
Área de filtración (m ²)		2,5
Velocidad de lavado (m/h)		20
Caudal de lavado (L/S)		14
Tubería principal	Diámetro (pulg)	4
	Diámetro (pulg)	2
Tuberías laterales	Diámetro de orificios (m)	0,0095
	Número de orificios	16
	Separación (m)	0,1
	Ancho (m)	0,3
Canaletas recolectoras	Largo (m)	2
	Ancho (m)	0,3
	Profundidad (m)	0,3

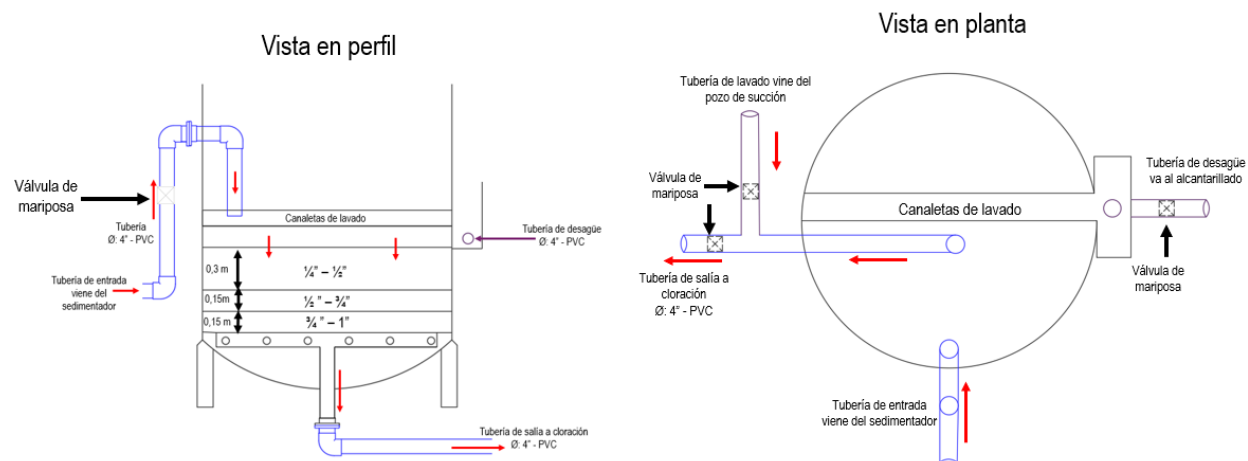


Figura 38. Filtro rápido.

8.4.8 Unidad de cloración

La cámara de contacto de cloro se dimensiono como la unidad de cloración para garantizar una concentración de cloro residual entre 0,3 – 2 mg/L según lo establecido en el Decreto 2115 de 2007. Para lo tanto, se consideró un flujo a pistón para maximizar el contacto entre el cloro residual y el agua, con un tiempo de contacto mínimo de 20 minutos, lo que asegura la reducción de bacterias, virus y quistes a niveles seguros para consumo humano. En la *Tabla 37* se presenta los resultados de la cámara de cloro y en la *Figura 39* se presenta el esquema de esta unidad.

Tabla 37. Diseño de la unidad de cloración.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/S)	14,4
Tiempo de retención hidráulico (min)	20
Volumen (m ³)	17
Nivel de agua (m)	1
Área (m ²)	17
Ancho de canales (m)	1
Largo de canales (m)	2,5
Número de canales	6
Ancho total (m)	6

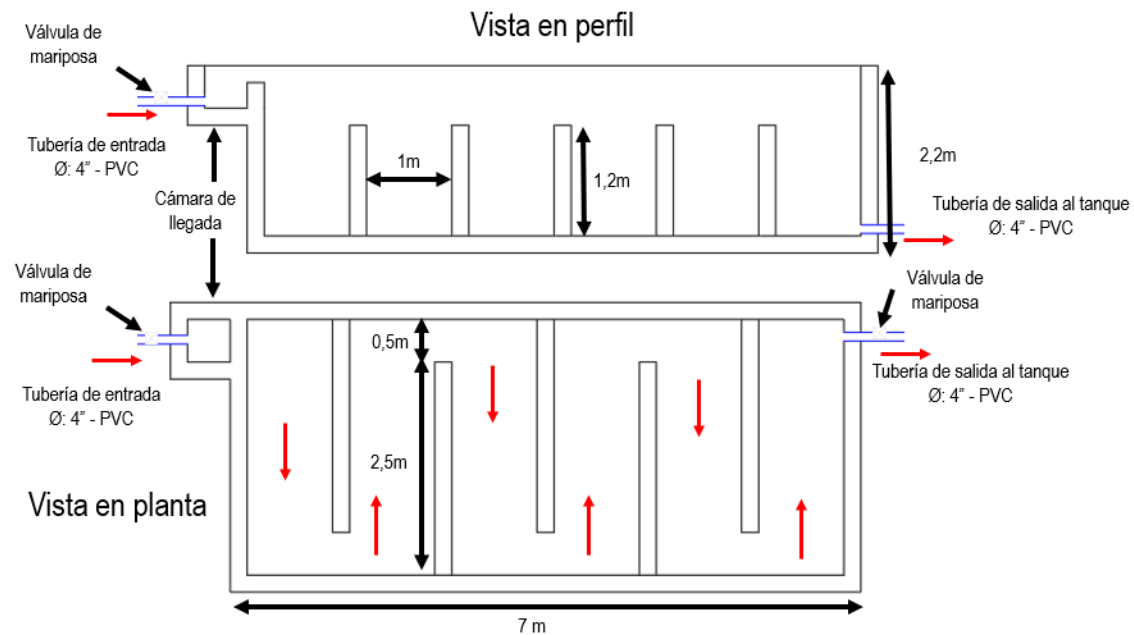


Figura 39. Unidad de cloración.

8.4.9 Pozo de succión

Por último, se calculó un pozo de succión a donde llega el agua después de la cámara de contacto de cloro y posteriormente será bombeada al tanque de almacenamiento elevado. En la *Tabla 38* se presenta los resultados del diseño y en la *Figura 40* el esquema del pozo de succión.

Tabla 38. Diseño del pozo de succión.

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/S)	14,4
Tiempo de llenado (min)	30
Volumen (m ³)	15
Altura útil (m)	2,5
Área (m ²)	6
Ancho (m)	3
Largo (m)	2

Nota: El volumen del pozo tiene incluido el volumen para el lavado de un filtro durante 10 minutos.

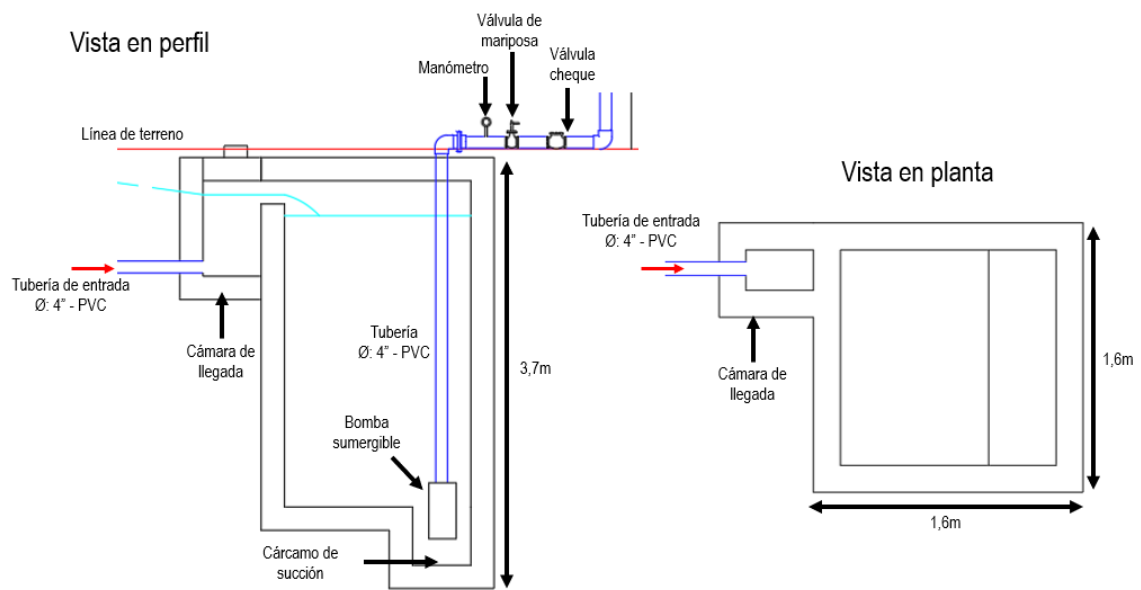


Figura 40. Esquema del pozo de succión.

Finalmente, en la *Figura 41* se presenta una vista en planta de la alternativa de optimización de la PTAP del hormiguero.

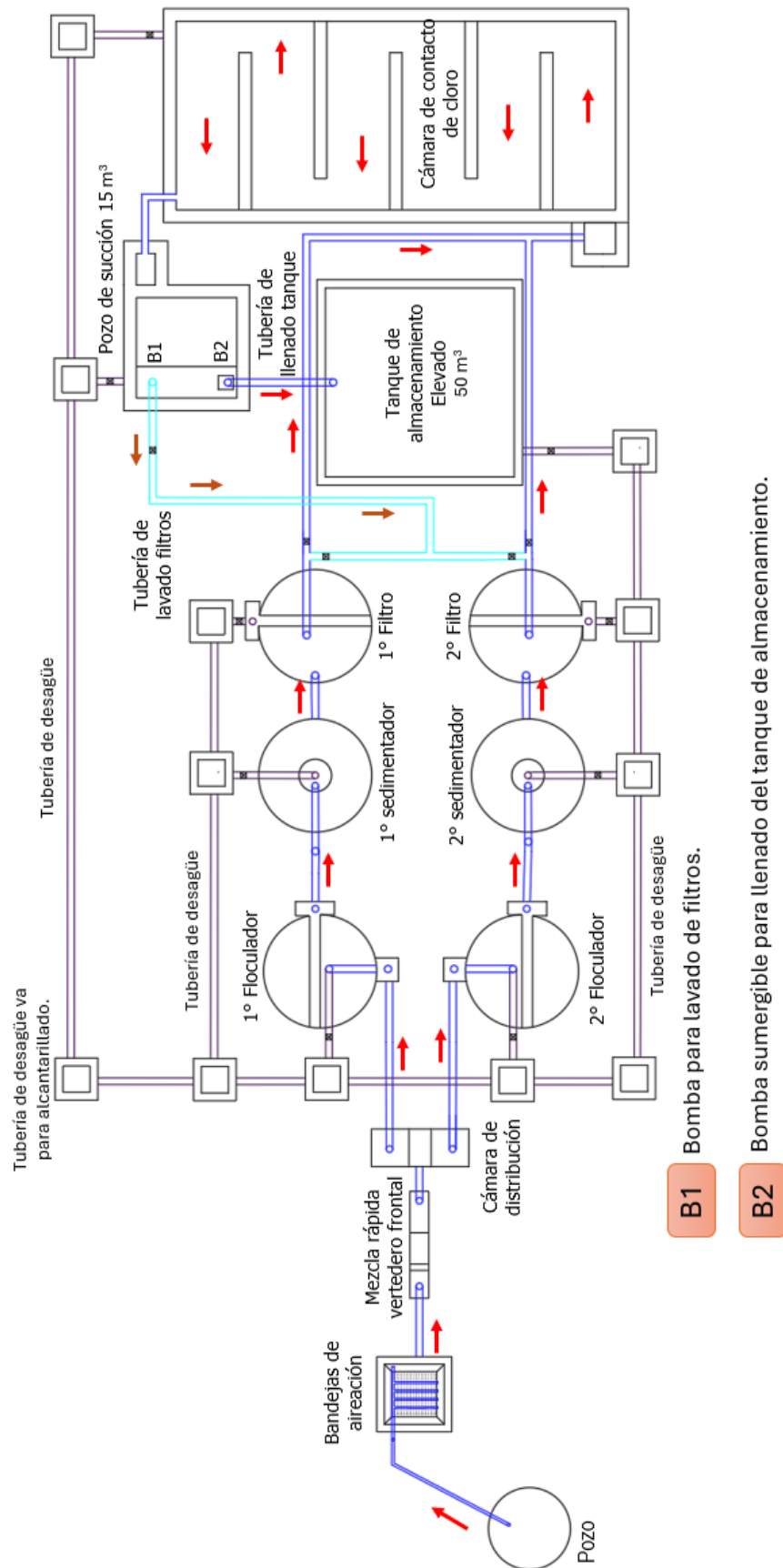


Figura 41. Vista en planta de la alternativa de optimización.

9. Conclusiones

Este trabajo de grado se orientó a proponer una estrategia de optimización del proceso de tratamiento de agua potable para la remoción de hierro y fosfatos en la planta de agua potable del corregimiento del Hormiguero. Las principales conclusiones son las siguientes:

El trabajo de campo permitió evidenciar que la PTAP del Hormiguero presenta deficiencias en los procesos de tratamiento que limitan la remoción de hierro (afluente: 0,5 mg/L; efluente: 0,42 mg/L), fosfatos (afluente: 5,0 mg/L; efluente: 2,0 mg/L) y manganeso (afluente: 0,5 mg/L; efluente: 0,5 mg/L) debido a la incapacidad de las unidades de tratamiento para garantizar tiempos y gradientes óptimos de mezcla rápido y lento, además, la ausencia en el mantenimiento de los filtros de grava y arena debido al desconocimiento de la carrera de filtración y caudal de lavado son los principales problemas identificados para la remoción de los contaminantes en la planta. También se identificó deficiencias en el sistema de bombeo, generando altos costos por consumo de energía mensuales (\$ 12'000.000), sumado a una deficiente aireación por parte de la inyección de aire mediante el compresor existente que también hace incrementar los costos de operación, lo que ha conllevado a una deuda en el recibo de energía hasta marzo del 2024 por más de 770'000.000.

El trabajo de grado permitió proponer tres alternativas de optimización, considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales. A través del método AHP se identificó como más viable la alternativa que incluye bandejas de aireación, coagulación en mezcla rápida, floculación ascendente en grava, sedimentación de alta tasa, filtración rápida y cloración. Este esquema de tratamiento permite aumentar la eficiencia de remoción del hierro, manganeso y fosfatos garantizando el cumplimiento de normatividad vigente haciendo uso de las estructuras existentes de la planta.

Las pruebas de jarras con cloruro férrico y Sulfoc permitieron establecer que ambos coagulantes logran reducir las concentraciones de hierro (afluente: 0,5 mg/L; efluente: 0,1 mg/L), fosfatos (afluente: 2,0 mg/L; efluente: 0,2 mg/L), y manganeso (afluente: 0,5 mg/L; efluente: 0,1 mg/L), por debajo de lo establecido en la Resolución 2115 de 2007. Sin embargo, el cloruro férrico puede garantizar bajos costos de operación (100 \$/m³) en comparación con el Sulfoc (350 \$/m³). Los resultados de la dosificación del coagulante en la PTAP con las condiciones de operación real concluyó que la coagulación química no es suficiente para la optimización de la planta debido a las malas condiciones operacionales como gradientes y tiempos de mezcla, por lo tanto, se requiere una reestructuración del sistema de tratamiento facilitando la operación y mantenimiento cumpliendo con la calidad de agua.

Este trabajo de grado ha sido bastante útil porque logró la interacción con la comunidad, por lo tanto, el desarrollo y posterior implementación puede contribuir a disminuir el costo por metro cubico de agua tratada, además, preservaría la salud de la comunidad del corregimiento del Hormiguero debido a la disminución en la concentración de contaminantes en cumplimiento de la norma de calidad de agua.

10. Recomendaciones

El estudio en la PTAP compacta de flujo a presión del corregimiento del Hormiguero mostró problemas en la operación y mantenimiento, por tal razón se presentan a continuación las siguientes recomendaciones:

1. **Fuente de abastecimiento:** se recomienda realizar una inspección del pozo con grabación en donde se identifique el estado interno de este ya que, según los reportado por el acueducto, el pozo lleva más de 20 años en operación continua sin ningún tipo de mantenimiento. Por lo tanto, la inspección puede ayudar a determinar daños internos, derrumbe en las paredes y estado actual de los filtros.
2. **Sistema de bombeo:** el mayor gasto en la operación y mantenimiento de la PTAP se presenta en el sistema de bombeo un costo mensual de \$12'000.000, además, del mal funcionamiento que presenta debido al trabajo continuo por fuera del punto de operación óptimo. Por lo tanto, se recomienda replantear el sistema de bombeo acorde con la nueva propuesta de este trabajo.
3. **Sistema de aireación:** la inyección de aire con compresor que actualmente se está utilizando en la PTAP no garantiza la concentración de oxígeno disuelto recomendada para la oxidación del hierro y manganeso, además de generar problemas en la operación del sistema. Por lo tanto, es clave implementar un sistema de aireación por bandejas de aireación como se presenta en la *Tabla 21*.
4. **Esquema de tratamiento:** el tratamiento que actualmente se presenta en la PTAP del Hormiguero no garantiza la remoción del hierro, fosfatos y manganeso por debajo de las concentraciones establecidas en el Decreto 2115 del 2007. Por tal razón, se recomienda reestructurar la planta acorde al planteamiento del presente trabajo según la *Figura 41*.

11. Referencia

- Alcaldía de Santiago de Cali. (2023). Informe Cali en cifras. <https://www.cali.gov.co/documentos/1705/documentos-de-cali-en-cifras/>. Barcala, V., Jansen, S., Gerritse, J., Mangold, S., Voegelin, A., & Behrends, T. (2023). *Phosphorus adsorption on iron-coated sand under reducing conditions* (0047-2425).
- Bordoloi, S., Nath, S. K., Gogoi, S., & Dutta, R. K. (2013). Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation-coagulation at optimized pH: Laboratory and field studies. *Journal of hazardous materials*, 260, 618-626.
- Boyle, E., Edmond, J., & Sholkovitz, E. (1977). The mechanism of iron removal in estuaries. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(9), 1313-1324.
- Castillo, Y. (2006). *Evaluación de los sistemas de abasto de agua del corregimiento El Hormiguero* Universidad del Valle]. <https://opac.univalle.edu.co/cgi-olib/>
- Cuenca, Á., & Maya, K. (2012). *Evaluación de sostenibilidad de plantas prefabricadas para potabilización de agua subterránea: caso corregimiento de el Hormiguero* Universidad del Valle]. <https://opac.univalle.edu.co/cgi-olib/>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2012). *Aguas subterráneas en el departament del Valle del Cauca*. Retrieved from https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/reglamentacion_integral_participativa_gestion_aguas_subterraneas_en_el_departamento_del_valle_del_cauca_0.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2017). *Evaluación regional del Valle del Cauca*. Retrieved from https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-10/EVALUACION_REGIONAL_AGUA_Ajustes2018_2.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2025). Reglamentación para la gestión integral del agua subterránea el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. <https://www.cvc.gov.co/documentos/normatividad/regional/acuerdos/consejo-directivo/2025>.
- Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K., y Tchobanoglous, G. (2012). Gravity separation. MWH's water treatment: principles and design (pp. 641- 725).
- Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K., y Tchobanoglous, G. (2012). Coagulation and flocculation. MWH's water treatment: principles and design (pp. 541-639).
- De Sousa, C., Correia, A., & Colmenares, M. C. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de malarología y salud ambiental*, 50(2), 187-196.
- Du, X., Liu, G., Qu, F., Li, K., Shao, S., Li, G., & Liang, H. (2017). Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system: the anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling. *Desalination*, 403, 97-106.
- Durán Morales, J. C. (2016). Remoción del Aluminio, Manganese y Hierro de las aguas del río Auqui, para su potabilización en la planta de tratamiento de agua potable de Bellavista, Huaraz-Ancash julio 2014-junio 2015.
- Díaz, W., Gonzaga, B., & Contreras, N. (2007). Determinación del coagulante que permita la máxima remoción de fosfatos en agua cruda del río otún.
- El-Naggar, H. M. (2010). Development of low-cost technology for the removal of iron and manganese from ground water in Siwa Oasis. *The Journal of the Egyptian Public Health Association*, 85(3-4), 169-188.
- Fajardo Zúñiga, M. J. (2021). *Optimización de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) del corregimiento de Guacacallo y vereda El Tigre del municipio de Pitalito-Huila* Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo ...].
- Frolova, M., Tihomirova, K., Mežule, L., Rubulis, J., Gruškeviča, K., & Juhna, T. (2017). Evaluation of pre-treatment technologies for phosphorous removal from drinking water

- to mitigate membrane biofouling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Fuentes, H. (2013). Análisis experimental de la oxidación de hierro en aguas subterráneas de abastecimiento a través de aireación. [Tesis de preparado, Universidad del Bío-Bío]. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1359>.
- Gariboglio, M. (1993). Corrosión e incrustación microbiológica en sistemas de captación y conducción de agua; aspectos teóricos y aplicados.
- Hurtado Chaves, D. M. (2018). *El monocultivo de la caña de azúcar, un vecino hostil: acumulación por control en el contexto de las fumigaciones en el monocultivo de caña de azúcar, el caso de El Hormiguero* Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/cb9a2e4b-0789-422d-a150-0e79b454bf04>
- Hernández, J. (2019). Evaluación de sistema de aireación para transferencia de oxígeno en aguas subterráneas. [Tesis de pregrado, Universidad del Valle]. <https://hdl.handle.net/10893/17815>.
- IDEAM. (2020). *Estudio nacional del agua*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua>
- IDEAM. (2022). *Oferta de agua en Colombia*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ofertaagua>
- Kan, C.-C., Chen, W.-H., Wan, M.-W., Phatai, P., Wittayakun, J., & Li, K.-F. (2012). The preliminary study of iron and manganese removal from groundwater by NaOCl oxidation and MF filtration. *Sustainable Environment Research*, 22(1), 25-30.
- Khatiri, N., Tyagi, S., & Rawtani, D. (2017). Recent strategies for the removal of iron from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 19, 291-304.
- Lin, J.-L., Huang, C., Pan, J. R., & Wang, Y.-S. (2013). Fouling mitigation of a dead-end microfiltration by mixing-enhanced preoxidation for Fe and Mn removal from groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 419, 87-93.
- Lloor, J. B. C., & Sornoza, W. A. P. (2020). Equipos modulares de acero como potabilizadores de agua en el sector rural. *Dominio de las Ciencias*, 6(2), 866-882.
- Mažeikienė, A., & Šarko, J. (2022). Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using layered filter media. *Sustainability*, 14(17), 10713.
- Montes, A. (2010). Principales fuentes contaminantes de las aguas superficiales del río Moa. *Cub@: Medio ambiente y Desarrollo*, 10(18).
- Mora Arellano, V., & Cedeño, J. L. (2006). Valuación de corrosión e incrustaciones en instalaciones hidráulicas de una planta de potabilización en el estado Bolívar, Venezuela. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 46(1), 67-78.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT). (2017). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A., & Azabache-Aliaga, B. (2023). Efecto de coagulación-floculación en remoción del hierro y manganeso en acuífero. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(1), e464-e464.
- OMS. (2017). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Retrieved from <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- ONU. (2022a). *Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa/PDF/380726spa.pdf.multi.
- ONU. (2022b). *El agua: en el centro de la crisis climática*. Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>
- ONU. (2023). *Agua para consumo humano*. Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

- Osuna, J., Christensen, E., Peplinski, D., & Ziesmann, S. (1988). In-situ removal of iron and manganese from groundwater: numerical model. In *Water Pollution Control in Asia* (pp. 653-658). Elsevier.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018). Manual de optimización del sistema de bombeo. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Manual_sistemas_bombeario.pdf.
- Rivas, J. R. G., Cedeño, A. R. J., Crespo, R. J. B., & Mosquera, R. A. C. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(9), 1384-1407.
- Sánchez, L. (2016). *Upflow gravel filtration for multiple uses*
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9-26.
- Štembal, T., Markić, M., Ribičić, N., Briški, F., & Sipos, L. (2005). Removal of ammonia, iron and manganese from groundwaters of northern Croatia—pilot plant studies. *Process Biochemistry*, 40(1), 327-335.
- Loaiza, A. (2009). Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante doble filtración con flujo a presión caso el Hormiguero-Cali. [Tesis de maestría, Universidad del Valle]. <https://hdl.handle.net/10893/7663>.
- Song, X., Pan, Y., Wu, Q., Cheng, Z., y Ma, W. (2011). Phosphate removal from aqueous solutions by adsorption using ferric sludge. *Desalination*, 280(1-3), 384-390. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411006424>.
- Sánchez, Luis. (2016). Upflow gravel filtration for múltiples usos. [Tesis de doctorado, Universidad Delft].
- Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. Pergamon Journals Ltd. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- United States Environmental Protection Agency. (2004). Drinking Water Health Advisory for Manganese. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-09/documents/support_cc1_manganese_dwreport_0.pdf.
- Volpe, D. (2012). Assessment of iron and manganese sequestration.
- Valencia, J. A. A. (1972). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua (Serie técnica n.º 13). Lima, Perú: CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente).
- Wang, Y., Sikora, S., & Townsend, T. G. (2013). Ferrous iron removal by limestone and crushed concrete in dynamic flow columns. *Journal of environmental management*, 124, 165-171.
- Wu, H., Wang, J., Duan, E., Feng, Y., Wan, Z., Wu, Y., & Lu, Y. (2019). Study on the preparation of granular alum sludge adsorbent for phosphorus removal. *Water Science and Technology*, 79(12), 2378-2386.