

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE DEL MUNICIPIO DE COMBITA BOYACÁ

LYDA FERNANDA SIERRA SIERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

INGENIERÍA CIVIL

TUNJA BOYACÁ

2014

VB Director:

DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE DEL MUNICIPIO DE COMBITA BOYACÁ

LYDA FERNANDA SIERRA SIERRA

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil.

Director:

CARLOS ARIEL DIAZ ACERO

Ingeniero Civil, M.Sc en ingeniería civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

INGENIERÍA CIVIL

TUNJA BOYACÁ

2014

A Dios y a mi madre a quien
le debo todo lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Carlos Ariel Díaz por su gran apoyo en el desarrollo de este proyecto, a la unidad de servicios públicos del municipio de Combita y al señor Jose Faustino Ruiz operario de la planta.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Trabajo de investigación “DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE COMBITA BOYACÁ” presentado por Lyda Fernanda Sierra Sierra, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Santo Tomas para optar el título de ingeniera civil, fue aprobado por:

JURADO N° 1

JURADO N° 2

Director

Tunja, 19 de agosto de 2014

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
1.INTRODUCCION	13
2.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3.JUSTIFICACIÓN	15
4..OBJETIVOS	16
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5.ESTADO DEL ARTE	17
6.METODOLOGÍA.....	19
6.1.MUESTRA AGUA CRUDA	19
6.3. ENSAYOS DE JARRAS	24
7.PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE – PTAP DEL MUNICIPIO DE COMBITA.....	29
7.1.DESCRIPCIÓN DE LOS AFLUENTES	29
7.2. .. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE – PTAP	30
8. RESULTADOS	40
8.1. CALIDAD DEL AGUA TRATADA	40
8.2. ESTADO Y OPERACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA	45
8.2.1. Patologías encontradas.....	45
8.2.2. Dimensiones y parámetros específicos	48
8.2.3. Parámetros de operación	50
8.3. ESTADO DE OPERACIÓN	58
8.3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO.....	58
8.4. ENSAYOS DE JARRAS	59
9. OPTIMIZACIÓN	75

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
GLOSARIO.....	84
BIBLIOGRAFIA	86
ANEXO A: IRCA.....	87
ANEXO B: ENCUESTA REALIZADA AL OPERARIO.....	92
ANEXO C: CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	95
ANEXO D: CAUDAL DE OPERACIÓN	102

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Medición de turbiedad mediante turbidímetro referencia 100T	19
Figura 2. Medición de Color	20
Figura 3. Medición de Hierro	20
Figura 4. Proceso de medición de pH a través del pHmetro	21
Figura 5. Medición de Temperatura, conductividad y SDT a las muestras a través del conductímetro	21
Figura 6. Muestras de los coagulantes y alcalinizantes usados en los ensayos ..	22
Figura 7. Proceso de mezcla rápida en ensayo de jarras	25
Figura 8. Proceso de sedimentación	26
Figura 9. Proceso de filtración de muestra sedimentada	27
Figura 10. Medición de ml de lodo	27
Figura 11. Diagrama de flujo actual de la planta	30
Figura 12. Vista del tanque de homogenización.....	31
Figura 13. Vista bandejas de aireación	32
Figura 14. Vista perfil cámara de coagulación.....	33
Figura 15. Vista perfil vertedero	34
Figura 16. Vista planta tanque de floculación.....	35
Figura 17. Vista planta cámara de sedimentación.....	37
Figura 18. Vista unidades de filtración	38
Figura 19. Vista tanque de almacenamiento	39
Figura 20. Mapa Distribución del nivel de riesgo en los municipios de Boyacá ...	41
Figura 21. Variación valores del IRCA mes a mes para los años 2012 y 2013	43
Figura 22. Variación de turbiedad para las dosis de sulfato de aluminio.....	59
Figura 23. Variación de pH para dosis de sulfato de aluminio.....	60
Figura 24. Variación de la conductividad para dosis de sulfato de aluminio	61
Figura 25. Variación de SDT para dosis de sulfato de aluminio	61

Figura 26. Variación de Hierro para dosis de sulfato de aluminio	62
Figura 27. Variación de turbiedad para dosis de sulfato de aluminio más soda caustica	63
Figura 28. Variación de pH para dosis de sulfato de aluminio mas soda caustica	63
Figura 29.variacion de conductividad para dosis de sulfato de aluminio más soda caustica	64
Figura 30. Variación de turbiedad para dosis de sulfato de aluminio más cal	65
Figura 31. Variación del pH para dosis de sulfato de aluminio más cal	65
Figura 32. Variación de la conductividad para dosis de sulfato de aluminio más cal	66
Figura 33. Variación de hierro para dosis de sulfato de aluminio más cal.....	67
Figura 34. Variación de hierro para dosis de cloruro férrico.....	68
Figura 35. Variación de pH para dosis de cloruro férrico	68
Figura 36. Variación de conductividad para dosis de cloruro férrico	69
Figura 37. Variación del hierro para dosis de cloruro férrico	69
Figura 38. Variación del color para dosis de cloruro férrico.....	70
Figura 39. Variación de turbiedad para dosis de sulfato ferroso	71
Figura 40. Variación de pH para dosis de sulfato ferroso.....	72
Figura 41. Variación de conductividad para dosis de sulfato ferroso	72
Figura 42. Variación de color para dosis de sulfato ferroso	73
Figura 43. Porcentajes de remoción final de turbiedad	¡Error! Marcador no definido.7
Figura 44. Porcentajes de remoción final de hierro	768
Figura 45. Porcentajes de remoción final de color	779
Figura 46. Propuesta de operación de la planta de tratamiento	81
Figura 1A. Proyección de caudales para la población urbana del municipio de Combita.....	101

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Dosis de coagulantes y alcalinizantes usadas en los ensayos.....	23
Tabla 2. Índice de Floculación de Willcomb	26
Tabla 3. Especificaciones tanque de homogenización	31
Tabla 4. Especificaciones bandejas de aireación.....	32
Tabla 5. Especificaciones cámara de coagulación.....	33
Tabla 6. Especificaciones vertedero.....	34
Tabla 7. Especificaciones unidad de floculación	35
Tabla 9. Especificaciones unidades de filtración	37
Tabla 10. Especificaciones tanque de almacenamiento.....	39
Tabla 11. Promedio anual IRCA (2007-2013)	41
Tabla 12. Índice de riesgo de calidad de agua para el consumo humano municipio de Combita (2012).....	42
Tabla 13. Índice de riesgo de calidad de agua para el consumo humano municipio de Combita (2013).....	42
Tabla 14. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (abril 2012)	44
Tabla 15. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (octubre 2012)	44
Tabla 16 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (diciembre 2012)	44
Tabla 17. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (abril 2013)	44
Tabla 18. Patologías de las unidades de operación de la PTAP.....	45
Tabla 19. Verificación de parámetros de la unidad de aireación	48
Tabla 20. Verificación de parámetros de la unidad de floculación.....	49
Tabla 21. Verificación de parámetros de la unidad de sedimentación	49
Tabla 22. Comparación de los resultados de la unidad de floculación con valores recomendados.....	54
Tabla 23. Comparación de los resultados de sedimentación con valores recomendados.....	57

Tabla 24. Datos de parámetros medidos al agua cruda previo al tratamiento.....	76
Tabla 25. Dosificaciones de coagulantes y alcalinizantes con mejores resultados	75
Tabla 26. Costo promedio por kilogramo en el mercado de la soda caustica y cal hidratada	78
Tabla 1A. Censos del municipio de Combita.....	95
Tabla 2A. Nivel de complejidad del sistema	95
Tabla 3A. Métodos de cálculo de proyección de la población	96
Tabla 4A. Proyección de población método aritmético.....	96
Tabla 5A. Proyección de población método geométrico	97
Tabla 6A. Proyección de población método exponencial	97
Tabla 7A. Promedio proyección de población por cada método	98
Tabla 8A. Dotación neta mínima para el municipio	98
Tabla 9A. Porcentaje de pérdidas admisibles	99
Tabla 10A. Coeficiente de consumo máximo diario - k1, según nivel de complejidad del sistema	100
Tabla 11A. Coeficiente de consumo máximo horario, k2, según el Nivel de Complejidad del Sistema.....	100

RESUMEN

Este trabajo de grado contempla la evaluación de las características y el funcionamiento actual de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) del municipio de Combita Boyacá, bajo criterios técnicos y ambientales, generando un diagnóstico de la infraestructura y operación de la Planta. Analizando las condiciones de calidad del agua en los últimos años, reflejado en el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA).

Para su optimización se desarrollaron ensayos de tratabilidad al afluente enfocados principalmente a obtener mejores condiciones en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, para determinar alternativas que optimicen el sistema de potabilización de la Planta de Tratamiento.

Los coagulantes usados en este proyecto fueron: Sulfato de aluminio (usado en la actualidad en el proceso de tratabilidad de la Planta), cloruro férrico y sulfato ferroso, además con el fin de estabilizar el pH se usaron alcalinizantes como soda caustica en escamas y cal hidratada.

Obteniendo unos resultados que la PTAP no es flexible por cuanto no da la posibilidad de alternar la operación con más de una unidad en cada proceso unitario, además por medio de las pruebas de tratabilidad ejecutados se determina Conjuntamente se constató que tanto la cal hidratada como la soda caustica mejoran eficientemente los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

1. INTRODUCCION

El municipio de Combita cuenta con un sistema de acueducto que suministra el servicio principalmente al área urbana del municipio, dicho sistema está compuesto por dos fuentes de abastecimiento superficial y una subterránea, además cuenta con una planta de tratamiento de agua potable desde el año 2007. A lo largo de su operación la planta ha presentado diferentes variaciones en su IRCA el cual a presentado un valor en los últimos 7 años que oscila entre 7.29 y 13.3 exceptuado el año inmediatamente anterior que tuvo un valor de 2.23 , lo que puede evidenciar falencias en los procesos realizados en la planta de tratamiento.

Es por ello que este trabajo realizó un diagnostico de las condiciones y el funcionamiento actual de la Planta del municipio de Combita Boyacá, a través de una comparación de los principales criterios de diseño de las unidades de la Planta con los valores recomendados por la literatura aplicable, aparte de la verificación del IRCA reportado por la secretaria de salud de Boyacá en los años más recientes como lo son 2012 y 2013, con el fin de identificar que parámetros están incumpliendo con lo establecido en la normatividad colombiana vigente (resolución 2115 de 2007y el decreto 1575 de 2007, conjuntamente se presenta la verificación de estado actual de las unidades mediante las patologías encontradas. Para la comprobación de operación se procedió a una entrevista al operario de la planta.

Asimismo, se realizaron ensayos de tratabilidad al afluente con coagulantes como sulfato de aluminio, cloruro férrico y sulfato ferroso a diferentes concentraciones, acompañado de soda caustica o cal. Lo anterior permitió determinar las dosis que desarrollaron un mejor proceso de coagulación, floculación, sedimentación y filtración al final del proceso fue la dosis de 40 mg/L de sulfato de aluminio acompañada de 15 mg/L de cal hidratada, esta dosis arrojó una remoción del 94.2% de turbiedad, con un pH de 6.68, conductividad 64.7 μ s. Solidos Disueltos totales 38.9 mg/L y un valor de 0 mg/L de hierro.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El agua entregada por la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cómbita a sus habitantes, debe sufrir un tratamiento que garantice su inocuidad y cumpla la normatividad vigente que se rige por el decreto 1575/2007 y la resolución 2115/2007, donde se establecen las normas técnicas de calidad del agua potable. Teniendo en cuenta lo anterior, la PTAP ha venido presentando durante los años 2007 al 2012 un Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano fuera del rango permitido por la norma colombiana aplicable, clasificando el agua del municipio como no apta para consumo humano (Instituto Nacional de Salud, 2012) (Secretaria de Salud, 2012-2013) , lo que permite inferir problemas en el sistema de potabilización de la Planta de tratamiento, los cuales están disminuyendo la calidad en el efluente.

Cabe resaltar que el agua es un importante transmisor de enfermedades cuando no cuenta con un tratamiento adecuado, En países en vías de desarrollo, cuatro quintos de las enfermedades son transmitidas por el agua, siendo la diarrea la causa principal de muerte infantil. (Lenntech, 2014)

Con el fin de determinar los problemas que están afectando los procesos unitarios de la PTAP y la eficiencia en la remoción de parámetros como turbiedad, color, hierro y pH que alteran la calidad del agua tratada, se da lugar a la presente investigación.

3. JUSTIFICACIÓN

El agua es esencial para la vida y todos deben disponer de un abastecimiento satisfactorio, además el acceso al agua potable debe proporcionar beneficios tangibles para la salud, por lo tanto se requiere garantizar que el agua sea lo más libre de contaminantes posible.

Toda planta de tratamiento de agua potable debe cumplir con unos requisitos mínimos de funcionamiento que permitan garantizar cantidad, cobertura, continuidad y particularmente calidad de agua apta para el consumo humano. Para lograrlo es necesario ajustarse a la normatividad que actualmente regula estos aspectos, que para Colombia es el Reglamento técnico de sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, la resolución 2115 y el decreto 1575 de 2007.

De tal forma que según informes (2007 – 2012) de los responsables del control y vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano, han clasificado el agua tratada del municipio de Combita como agua no apta para consumo humano, dado que el IRCA reportado para dichos años presenta valores superiores al 5%.

Adicionalmente Combita cuenta con antecedentes de emergencia sanitaria en el año 2010 debido a graves alteraciones en las características del agua tratada, ya que personas ajenas a la operación de la planta generaron la ruptura de la tubería de entrada de agua al tanque de almacenamiento y disolvieron en dicho tanque el cloro con el que normalmente se potabiliza el agua, provocando contaminación de la misma y generando el desabastecimiento del preciado líquido para el municipio (El Tiempo, 2010).

Por lo tanto es necesario analizar la planta de tratamiento, evaluando el estado de la infraestructura, operación, mantenimiento y calidad del agua, desarrollando ensayos de jarras para optimizar la PTAP del municipio en sus procesos unitarios teniendo como base los parámetros de turbiedad, color, hierro y pH. De esta forma mejorar los niveles de salubridad y calidad de vida de la población Combitense.

4. .OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Optimizar la PTAP del municipio de Combita en sus procesos unitarios con base en los parámetros de turbiedad, color, hierro y pH.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones de calidad del agua tratada que suministra la Planta de potabilización del municipio de Combita, de acuerdo a los registros de los IRCA y los análisis físicos, químicos y microbiológicos que presenta la Secretaria de salud departamental o la Unidad de Servicios Públicos municipal.
- Realizar un diagnóstico de la infraestructura y operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable del municipio de Combita.
- Realizar ensayos de jarras al agua cruda enfocados en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.
- Establecer la dosificación y el tipo de coagulante analizando los resultados obtenidos en los ensayos de jarras.

5. ESTADO DEL ARTE

El municipio de Combita cuenta con una planta de tratamiento ubicada en la vereda Concepción en el predio denominado el Mortiño, el cual tiene un área de 14.497 m², la planta se empezó a construir en el año 2003, se hizo una optimización en el año 2006 y se terminó en el año 2009 con la construcción del laboratorio. (SERFING LTDA., 2010)

En el año 2008 se realizó un diagnóstico de la planta de potabilización del municipio de Combita, el cual precisó incumplimiento en el dimensionamiento de las unidades de sedimentación y filtración. Cabe resaltar que dichos parámetros fueron comparados con los valores establecidos en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000.

Asimismo, se determinó que el agua cruda presentaba entre otros los siguientes parámetros: turbiedad de 2.49 UNT, color aparente 8 UPC, Coliformes Totales 11 UFC/100cm³, pH de 6,26, cloruros de 6.16 mg/L - Cl, Oxígeno Disuelto de 7.1 mg/L y color aceptable, lo cual concluyó que el agua del afluente es REGULAR.

En cuanto al estado de la estructura se encontró oxidación en las unidades, acumulación de lodos en la unidad de sedimentación y fisuración en el tanque de homogenización y el de almacenamiento, finalmente este diagnóstico arrojó como resultados que la planta cuenta con buenos parámetros de diseño, pero el estado de la estructura es regular y no se realiza una correcta operación, debido a la ausencia de un manual de operación y un laboratorio. (Gomez & Salcedo, 2008)

En el año 2008 se llevó a cabo la evaluación de las plantas de tratamiento de agua potable de los municipios de Moniquirá, Nobsa, Tibasosa, Monguí y Mongua, enfocada a la toma de muestras al afluente y efluente de las plantas, realizando aforos y finalmente verificando la operación de cada uno de los procesos llevados a cabo en las plantas, finalmente esta investigación arrojó como resultados que las PTAP del municipio de Mongua presento un IRCA del 85% y 65% clasificando el agua como no apta para el consumo humano, con un nivel de riesgo inviable sanitariamente, La PTAP del municipio de Monguí presenta un agua no apta para el consumo humano dado que su IRCA fue de 42.1%.

La Planta de Moniquirá presento un riesgo medio con un IRCA del 19%, la PTAP de Nobsa presentó incumplimiento en el parámetro de Cloro residual con un valor de 3 mg/L de Cl₂, obteniendo un IRCA del 16.8% clasificando el agua tratada de riesgo medio. Finalmente la PTAP del municipio de Nobsa presentó incumplimiento en los parámetros de cloro residual y pH, obteniendo un IRCA del 18.5% clasificando el agua tratada con un riesgo medio para la salud. (Mozo & Ruiz, 2009)

Para el año 2011 se realizó un diagnóstico de las dos plantas de tratamiento de agua potable del municipio de Tuta Boyacá, el cual estaba enfocado a realizar ensayos de tratabilidad a los afluentes de dichas plantas, con el fin de identificar propuestas de tratamiento que optimizaran el proceso. Este diagnóstico encontró fallas en la continuidad del servicio en el municipio debido a que una de las plantas estudiadas no se encontraba en operación, en cuanto a la calidad del agua se encontró el tratamiento realizado es suficiente para entregar a la población una calidad del agua apta para el consumo humano según el decreto 1575 y la resolución 2115 de 2007.

Además, la prueba de tratabilidad realizada al agua de la fuente captada para las dos PTAP permitió concluir que el coagulante que presentaba mejores resultados era el sulfato de aluminio, con una dosis de 30 mg/L, con el cual se lograba una excelente remoción de color y turbiedad, aclarando que es necesaria la aplicación de cal como estabilizante de pH.

Finalmente, como propuesta de solución a la continuidad del servicio se planteó el uso de solo una planta para abastecer el servicio, aumentado su presión hidrostática a través del uso de una estación de bombeo, no obstante se especificó que económicamente es más viable la puesta en operación de las dos plantas ya que reduciría costos. (Monroy Puerto & Jimenez Chaparro, 2011)

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Nobsa recibió una evaluación técnica de su planta física, la cual determino que contaba con un sistema de potabilización aceptable para el agua a tratar, esto con base en la caracterización del agua cruda y tratada comparada con la normatividad vigente. Además, encontró deterioro prematuro de la PTAP debido a los químicos y elementos corrosivos presentes en el agua captada.

Asimismo no se encontró ningún tipo de seguridad industrial para los operadores de la planta. Como tampoco se encontraron micromedidores en los usuarios, lo que permite un uso irracional del servicio. (Nuñez & Gonzalez, 2006)

En el año 2012 se realizaron ensayos con el fin de determinar la dosis optima de coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la planta del tratamiento de Villa Santana, dichos ensayos arrojaron que el uso del coagulante disminuye el pH en todas las muestras, lo que determinaba en muchas de las muestras incumplimiento de este parámetro teniendo en cuenta los valores establecidos por la normatividad vigente, por lo cual se hizo necesario el uso de cal con el fin de ajustarlo.

En conclusión se encontró que el sulfato de aluminio granulado tipo B es un coagulante efectivo para el tratamiento de aguas para consumo humano dado que se presentaron buenos porcentajes de remoción de la turbiedad y color en las muestras de agua cruda analizada. (Castrillon & Giraldo, 2012)

6. METODOLOGÍA

Se realizó una recopilación de la información disponible correspondiente a los IRCA y registros de los análisis físicos, químicos y microbiológicos facilitados por la secretaria de salud de Boyacá (Anexo A), cotejando su cumplimiento con la normatividad colombiana vigente.

Posteriormente se realizaron visitas a la PTAP del municipio, para ejecutar el diagnóstico de la Planta, verificando el estado de las diferentes unidades de tratamiento, así como su dimensionamiento con el fin de compararlo con los criterios de diseño recomendados por la literatura aplicable.

Igualmente se confrontó la operación y mantenimiento general del sistema de potabilización a través de una encuesta al operador de la Planta (Anexo B). Obteniendo entre otros el caudal promedio de operación para luego ser contrastado con el caudal de diseño calculado por el autor.

Luego, se desarrollaron en el laboratorio de la PTAP de Combita los ensayos de jarras al agua cruda, como se describe a continuación.

6.1. MUESTRA AGUA CRUDA

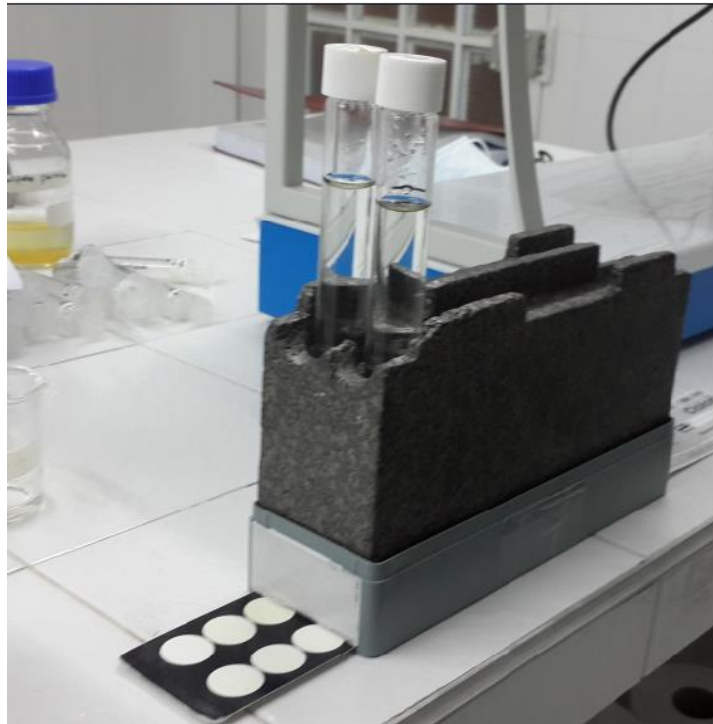
Los ensayos de tratabilidad y la medición de los parámetros presentados en este trabajo fueron realizados teniendo en cuenta lo establecido en los métodos Estándar para el Examen del Agua y Aguas Residuales. Inicialmente se tomó una muestra del agua cruda procedente del tanque de homogenización de la planta, a la cual se le procedió a medir los siguientes parámetros: turbiedad (figura 1), color (figura 2), hierro (figura 3), pH (figura 4) y temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales (SDT) (figura 5).

Figura 1. Medición de turbiedad mediante turbidímetro referencia 100T



Fuente: Autor, 2014

Figura 2. Medición de Color



Fuente: Autor, 2014

Figura 3. Medición de Hierro



Fuente: Autor, 2014

Figura 4. Proceso de medición de pH a través del pHmetro



Fuente: Autor, 2014

Figura 5. Medición de Temperatura, conductividad y SDT a las muestras a través del conductivimetro

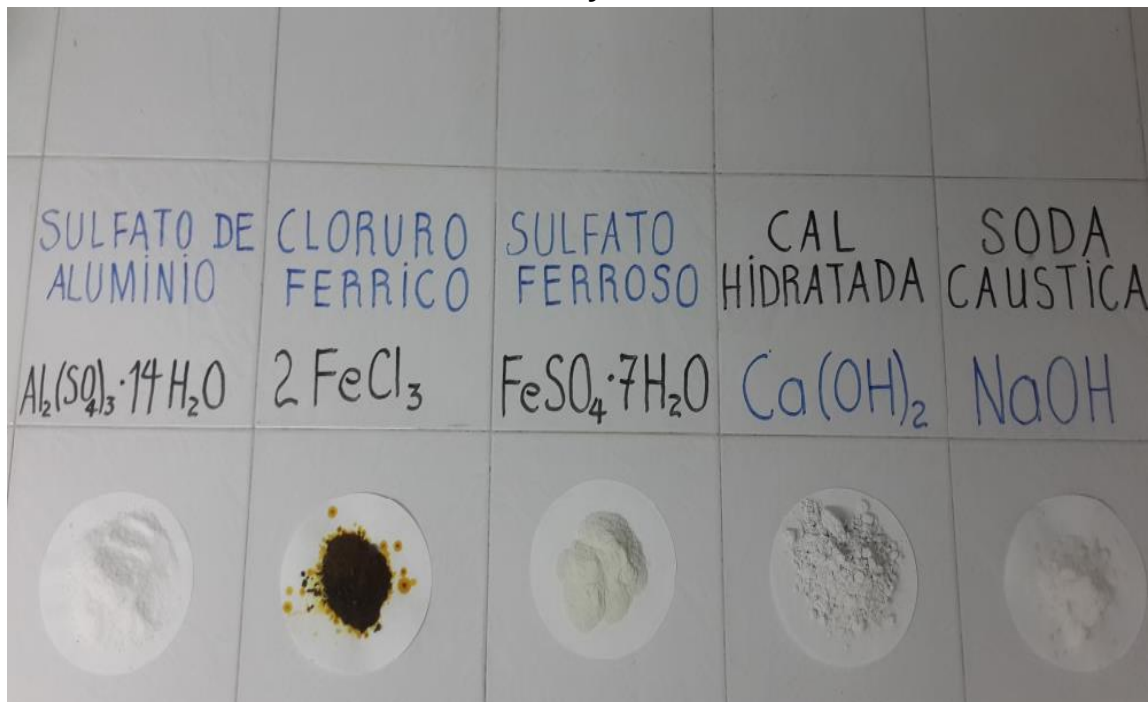


Fuente: Autor, 2014

6.2. PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE COAGULANTE

Se preparó la solución a una concentración del 1% (10gr/L), es decir que cada mL contiene 10 mg de coagulante, esto para cada uno de los coagulantes y alcalinizantes (Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, Sulfato Ferroso, Soda Caustica y Cal) teniendo en cuenta que son los más usados en sistemas de potabilización. En la figura 6 se aprecian los coagulantes y alcalinizantes usados en los ensayos

Figura 6. Muestras de los coagulantes y alcalinizantes usados en los ensayos



Fuente: Autor, 2014

Inicialmente se ejecutaron las pruebas con los tres coagulantes, sulfato de aluminio, cloruro férrico y sulfato ferroso, con las dosis que se encuentran mencionadas en los ensayos 1, 4 y 7 de la Tabla 1. Luego, se seleccionaron para cada coagulante las dosis que presentaron mejor comportamiento, con el fin de realizar nuevos ensayos de tratabilidad para esas dosis pero ya acompañadas de un alcalinizante en caso de requerir estabilizar el pH. Estas últimas dosis se encuentran reflejadas en los ensayos 2, 3, 5, 6, 8 y 9 de la Tabla 1.

Tabla 1. Dosis de coagulantes y alcalinizantes usadas en los ensayos

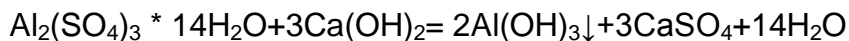
Ensayo	Coagulante	Jarra			
		1	2	3	4
1	Sulfato de aluminio (mg/L)	20	30	40	50
2	Sulfato de aluminio +	30	30	40	40
	Soda caustica (mg/L)	12	16	16	20
3	Sulfato de aluminio +	30	30	40	40
	Cal (mg/L)	10	15	15	20
4	Cloruro Ferrico (mg/L)	10	20	30	40
5	Cloruro Ferrico +	5	5	10	10
	Soda caustica (mg/L)	4	6	7	9
6	Cloruro Ferrico +	5	5	10	10
	Cal (mg/L)	4	6	7	9
7	Sulfato Ferroso (mg/L)	20	30	40	50
8	Sulfato Ferroso+	30	30	40	40
	Soda caustica (mg/L)	17	20	23	26
9	Sulfato Ferroso +	30	30	40	40
	Cal (mg/L)	16	20	20	24

Fuente. Autor

Las dosis de alcalinizantes mencionadas en la tabla anterior fueron obtenidas de la siguiente manera:

- Sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$

Al añadir cal hidratada $[Ca(OH)_2]$ tiene lugar a la siguiente reacción:

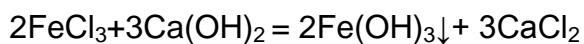


De acuerdo a la ecuación anterior, 600g de sulfato de aluminio requieren 222 g de cal hidratada, luego por cada mg/L de sulfato de aluminio, la dosis de cal hidratada es 0.37 mg/L.

Al agregar soda caustica $[NaOH]$, sabemos que su equivalente gramo es 40 g/Eg y el de la cal hidratada es 37 g/Eg, por lo cual se puede decir que 1g de cal hidratada equivale a 1.08g de soda caustica. De tal forma que por cada mg/L de sulfato de aluminio la dosis de soda caustica es 0.4 mg/L

- Cloruro férrico $[FeCl_3]$

Al adicionar cal hidratada se presenta la siguiente reacción:

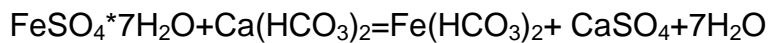


De acuerdo a la ecuación por cada mg/L de cloruro férrico la dosis de cal hidratada es 0.68 mg/L.

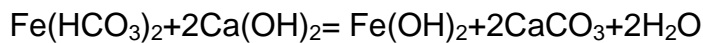
Al usar soda caustica, por cada mg/L de cloruro férrico la dosis de soda caustica es 0.73 mg/L.

- Sulfato ferroso [FeSO₄*7H₂O]

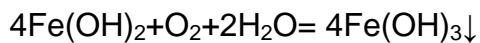
Este reacciona con la alcalinidad de la siguiente manera:



Al agregar cal hidratada sucede la siguiente reacción:



Finalmente, mediante el oxígeno disuelto del agua:



De acuerdo a estas ecuaciones, por cada mg/L de sulfato ferroso la dosis de cal hidratada es 0.53 mg/L y aplicando soda caustica la dosis es 0.57 mg/L.

6.3. ENSAYOS DE JARRAS

Posteriormente se procedió al ensayo con cuatro (4) jarras de 1000 mL, en las cuales se aplicó para cada ensayo la dosis de coagulante establecido (Tabla 9). Para la simulación de mezcla rápida se manejó una velocidad de rotación 270 RPM equivalente a un gradiente de velocidad de 704.8 s⁻¹ en un tiempo de 1 minuto, teniendo como ecuación de cálculo la siguiente:

$$G = \sqrt{\frac{Cd * A * v^3}{2 * \mu * V}}$$

G: Gradiente de velocidad, s⁻¹

Cd: Coeficiente de arrastre de las paletas (para este caso fue de 1,18)

A: Área transversal de las paletas, m²

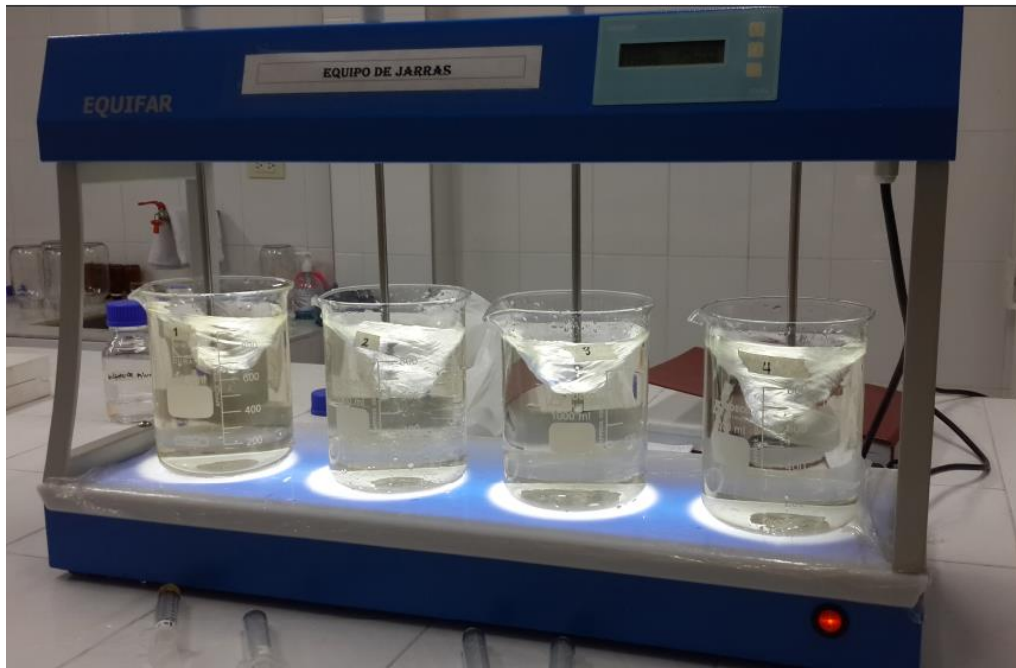
v: Velocidad relativa de las paletas, m/s

μ : Viscosidad cinemática, m^2/s

V: Volumen, m^3

En la figura 7 se observa el proceso típico de coagulación desarrollado en la prueba de jarras. Para floculación se tomó una velocidad de 40 RPM equivalente a un gradiente de velocidad de $41 s^{-1}$ en un tiempo de 25 minutos, dado que es un tiempo de retención acorde al recomendado por la literatura.

Figura 7. Proceso de mezcla rápida en ensayo de jarras



Fuente: Autor, 2014

Terminado el tiempo de floculación se llevó a cabo el proceso de sedimentación de 30 minutos. La figura 8 presenta el proceso típico de sedimentación.

Una vez finalizado este proceso se midieron los parámetros de turbiedad, color, hierro, pH, conductividad y SDT en cada caso. Además se clasificó el floc luego de la sedimentación teniendo como referencia la tabla 2.

Figura 8. Proceso de sedimentación



Fuente: Autor, 2014

Tabla 2. Índice de Floculación de Willcomb

Número del índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno. Floc que se deposita facil pero no completamente
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina

Fuente: (Arboleda Valencia, 2000)

Luego, se llevó a cabo la filtración de cada jarra sedimentada a través de discos de filtración, como se aprecia en la figura 9, para medir nuevamente los parámetros anteriormente mencionados.

Figura 9. Proceso de filtración de muestra sedimentada



Fuente. Autor

Como último paso en el ensayo se midió la cantidad de mL de lodo generado por cada jarra, en la figura 10 se observa el proceso.

Figura 10. Medición de ml de lodo



Fuente: Autor, 2014

Toda la información de los datos obtenidos en los diferentes ensayos se encuentra en el Anexo E.

Finalmente, se analizó toda la información disponible determinando el estado de la infraestructura y evaluando la operación de la Planta, para establecer recomendaciones que mitiguen las falencias encontradas y optimicen la PTAP.

7. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE – PTAP DEL MUNICIPIO DE COMBITA

7.1. DESCRIPCIÓN DE LOS AFLUENTES

Actualmente la PTAP se abastece únicamente de los afluentes el Santuario y Los Tanques, adicionalmente cuenta con una fuente alterna que corresponde a un pozo profundo

- La quebrada el Santuario, es un afloramiento de aguas subterráneas, el tipo de captación es de toma de rejilla, cuenta con un desarenador alimentado por una tubería de 4 pulgadas de diámetro en PVC a 0.32 m de la captación. La línea de aducción funciona a gravedad y se encuentra enterrada en todos los tramos de la red, es en tubería PVC de 3 pulgadas de diámetro, con una longitud total de 4058 metros hasta un tanque de almacenamiento (tanque el Santuario).

A partir del tanque de almacenamiento el Santuario el agua es conducida por una segunda línea de aducción de 1564,51 metros en una tubería de 3 pulgadas y luego se reduce el diámetro de la tubería a 2 pulgadas en una longitud de 202 metros hasta la planta de tratamiento.

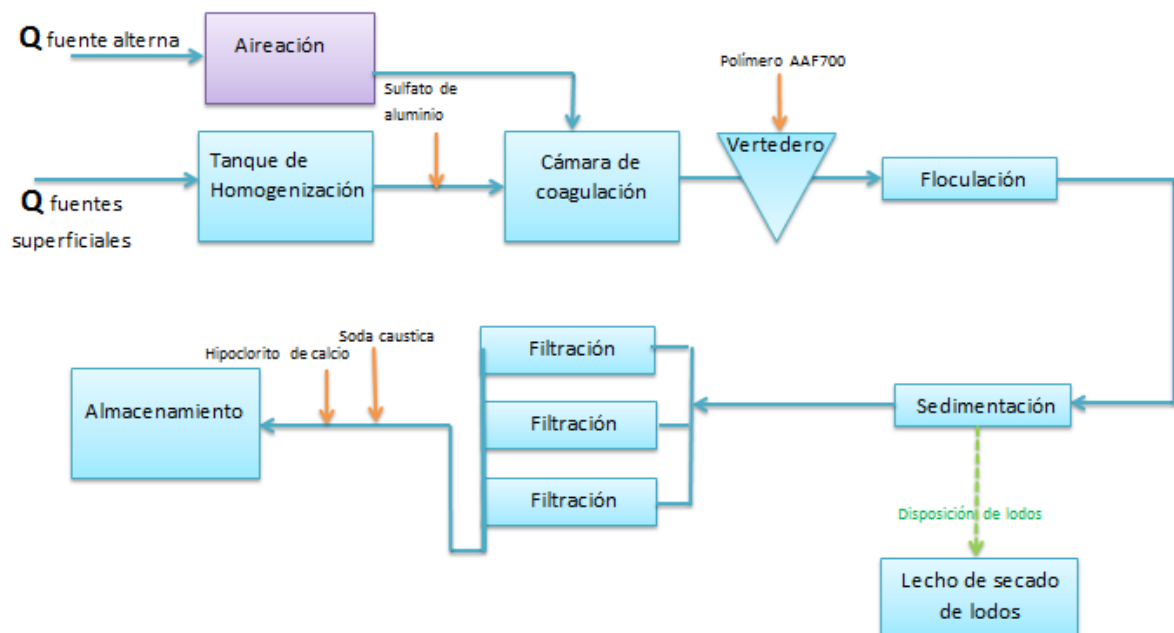
- La cañada Los Tanques, es una fuente de agua subsuperficial. El tipo de captación es galería de filtración y metros a bajo cuenta con una estructura de captación que corresponde a una caja de concreto reforzado ubicada en un manantial, una vez se unen los dos caudales captados en la caja de unificación, el agua es conducida por la línea de aducción del sector Los Tanques en tubería PVC de 3 pulgadas de diámetro, en una longitud de 900 metros a partir de donde se reduce a una tubería PVC de 2 pulgadas de diámetro, en una longitud de 186 metros hasta la planta de tratamiento de agua potable.

- Fuente alterna. Es una fuente de agua subterránea que corresponde a un pozo profundo de la vereda San Isidro, el cual es de tipo acuífero. La extracción del agua se hace por medio de una bomba sumergible ubicada a 69 metros de profundidad, la conducción del agua captada por el pozo profundo se hace por una línea de 3 pulgadas de diámetro en PVC en una longitud de 540,6 metros hasta la planta de tratamiento de agua potable.

7.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE – PTAP

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Combita cuenta con los siguientes procesos de operación: tanque de homogenización, aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, cloración y almacenamiento, como se observa en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de flujo actual de la planta



Fuente: Autor

- **TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN**

El sistema inicia en la unificación de las líneas el Santuario y los Tanques en una unidad denominada cámara de mezcla y homogenización en donde el agua pasa a la primera unidad de tratamiento que es la cámara de coagulación, a través de una tubería de 2 pulgadas de diámetro. El tanque de homogenización posee también una tubería de 3 pulgadas en PVC sanitario que permite el rebose de los excesos de agua que entra a la planta.

En la figura 12 se ilustra la cámara de homogenización y la tabla 3 especifica las dimensiones y materiales.

Tabla 3. Especificaciones tanque de homogenización

Características	Cámara de homogenización
Largo útil (m)	0,95
Ancho útil (m)	0,85
Profundidad (m)	1,20
Espesor de muros (m)	0,13
Volumen (m ³)	0,96
Material	Mampostería
Tubería de ingreso	PVC de 2 pulgadas (dos líneas)

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 12. Vista del tanque de homogenización



Fuente: Autor, 2014

- **AIREACIÓN**

La unidad de aireación actualmente no está en servicio, opera sólo en casos excepcionales cuando se utiliza el agua de la fuente de abastecimiento alterna que corresponde al pozo profundo. Esta unidad consta de 4 bandejas en fibra de vidrio, con fondos perforados de 5 mm por donde se intercambia el agua pasando de bandeja a bandeja con flujo vertical descendente, como se observa en la figura 13. Las cuales contienen carbón coque. En la base de esta unidad existe una última bandeja que se encarga de conducir el agua mediante una tubería de 4

pulgadas a la parte inferior del tanque de coagulación. En la tabla 4 se encuentran las especificaciones.

Tabla 4. Especificaciones bandejas de aireación

Características	Bandejas de aireación
Largo útil (m)	1,5
Ancho útil (m)	0,85
Profundidad (m)	0,30
Altura del lecho (m)	0,13
Numero de bandejas	5 (separadas 0,25 m cada una)
Material de las bandejas	Fibra de vidrio (PFR)
Tubería de salida	PVC de 4 pulgadas

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 13. Vista bandejas de aireación



Fuente: Autor, 2014

- **COAGULACIÓN**

Este proceso se realiza mediante la adición de sulfato de aluminio tipo A como coagulante químico, en una tubería de 2 pulgadas. Es decir, proveniente del tanque de homogenización.

Paso seguido el agua ingresa a un tanque que en la planta de tratamiento de agua potable denominan como cámara de coagulación que se ilustra en la figura 14, en la tabla 5 se encuentran las especificaciones de dicha cámara.

Tabla 5. Especificaciones cámara de coagulación

Características	Cámara de coagulación
Largo útil (m)	3,00
Ancho útil (m)	3,15
Profundidad (m)	3,30
Espesor de muros (m)	0,13
Volumen (m ³)	31,2
Material	Mampostería
Tubería de ingreso	PVC 1 de 4 pulgadas

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 14. Vista perfil cámara de coagulación



Fuente: Autor, 2014

De la cámara de coagulación, el agua es conducida por una tubería de 4 pulgadas en PVC que hace una recolección uniforme hacia un vertedero triangular en donde se realiza el control del caudal y la adición constante de un polímero llamado AAF 700 que es utilizado como floculante para luego ingresar a la unidad de floculación.

Las figuras 15 ilustran el vertedero de perfil, además en la tabla 6 se encuentran las especificaciones del vertedero.

Tabla 6. Especificaciones vertedero

Características	Vertedero
Largo útil (m)	0,95
Ancho útil (m)	0,85
Profundidad (m)	1,20
Espesor de muros (m)	0,13
Volumen (m ³)	0,96
Material	fibra de vidrio
Tubería de ingreso	PVC de 4 pulgadas
Tubería de salida	PVC de 4 pulgadas

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 15. Vista perfil vertedero



Fuente: Autor, 2014

- **FLOCULACIÓN**

Se trata de un floculador hidráulico de flujo vertical, la estructura está dividida en cuatro cámaras por medio de tres pantallas de concreto, una de ellas colgante, a través de las cuales el agua se desplaza haciendo un recorrido ascendente y descendente.

Sus especificaciones se encuentran en el tabla 7 y la figura 16 ilustra una vista en planta de la unidad.

Tabla 7. Especificaciones unidad de floculación

Características	Cámara de floculación
Largo total (m)	4,50
Ancho total (m)	2,50
Profundidad (m)	2,44
Material	Concreto reforzado
Dimensiones de las tres primeras cámaras	
Ancho útil (m)	2,30
Largo útil (m)	0,84
Profundidad (m)	2.44
Dimensiones de la última cámara	
Largo útil (m)	2,30
Ancho útil (m)	0,99
Profundidad (m)	2.44
Tubería de salida	3 líneas de tubería PVC De 6 pulgadas

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 16. Vista planta tanque de floculación



Fuente: Autor, 2014

- **SEDIMENTACIÓN**

La entrada del agua al sedimentador se hace por tres líneas de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro, ubicadas en la parte inferior del sedimentador e ingresa de forma ascendente al sedimentador de alta tasa, construido en polietileno e internamente presenta una lámina tipo colmena a 60°.

La salida del efluente se hace uniformemente por medio de tres líneas de tubería de PVC de 2 pulgadas de diámetro perforadas en su parte superior, ubicadas en la parte superior del sedimentador de forma equidistante como se observa en la figura 17, para luego ser conducida a la cámara de agua sedimentada y posteriormente es succionada por bombas hacia las unidades de filtración. Las especificaciones del sedimentador se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8 especificaciones cámara de sedimentación

Características	Cámara de sedimentación
Largo útil (m)	2,00
Ancho útil (m)	2,00
Profundidad (m)	2,40
Material	Fibra de vidrio
Módulos de sedimentación	Plásticos polietileno en forma de colmena
Inclinación del modulo	60°
Drenaje de los lodos	2 pulgadas
Tubería de entrada	PVC 6 pulgadas
Tubería de salida	PVC 2 pulgadas
Salida de agua hacia los filtros	Por bombeo
Descripción de las bombas	Voltaje 220/440 VAC potencia 3 HP, RPM 3450, Marca WEG

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 17. Vista planta cámara de sedimentación



Fuente: Autor, 2014

- **FILTRACIÓN**

La planta cuenta con 3 unidades de filtración en acero, las cuales trabajan presurizadas, cada una trata un tercio (1/3) del caudal total, manejan un flujo descendente el cual pasa por tres estratos los cuales se especifican en la tabla 9. Además poseen un equipo de válvula multifor, que permite controlar la eficiencia a la que está trabajando el filtro.

Seguida a la filtración, se aplica soda caustica en escamas con el fin de ajustar el pH a los requerimientos de la norma. La figura 18 ilustra las unidades de filtración.

Tabla 9. Especificaciones unidades de filtración

Tipo de filtro	Presurizado, multiestrato
Diámetro	90 cm
Alto	1 m
Número de unidades	3 un
Material de construcción	Coll Roll
Recubrimiento	Pintura epóxica
Diámetro tubería drenaje	2 pulgadas
Válvula de control de ingreso	tres vías
Presión	50 PSI
Caudal	50GPM
Modelo	3
Marca	ASTRAL POOL

Lecho filtrante	Arena, antracita, soporte en gravilla
Conformación promedio del lecho 15 cm de gravilla media N° 6-8 10 cm de gravilla fina N° 8-14 10 cm de arena gruesa N° 14-20 30 cm de arena fina N° 20-30 15 cm de antracita	
Sistema recolector de agua tratada	Tubería PVC ranurada

Fuente: Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 18. Vista unidades de filtración



Fuente: Autor, 2014

- **DESINFECCIÓN**

Para realizar este proceso, es necesario el uso de 2 bombas eléctricas que conducen el caudal hacia el tanque de almacenamiento en el cual se realiza la cloración, donde se aplica 333 g/d, es decir para el caudal de operación una dosis de cloro de 1,21 mg/L. El tanque de almacenamiento en la figura 19 de dimensiones 7.8 x 7.8 x 4.5 m cuenta con un piezómetro para medir el volumen que este alberga. En la tabla 10 se observan las especificaciones del tanque de almacenamiento.

Tabla 10. Especificaciones tanque de almacenamiento

Características	Tanque de almacenamiento
Largo útil (m)	7,80
Ancho útil (m)	7,80
Profundidad (m)	4,5
Espesor de muros (m)	0,4
Volumen (m ³)	273,78
Material	Mampostería
Tubería de ingreso	PVC de 4 pulgadas

Fuente: Autor y Unidad de Servicios Públicos de Combita

Figura 19. Vista tanque de almacenamiento



Fuente: Autor, 2014

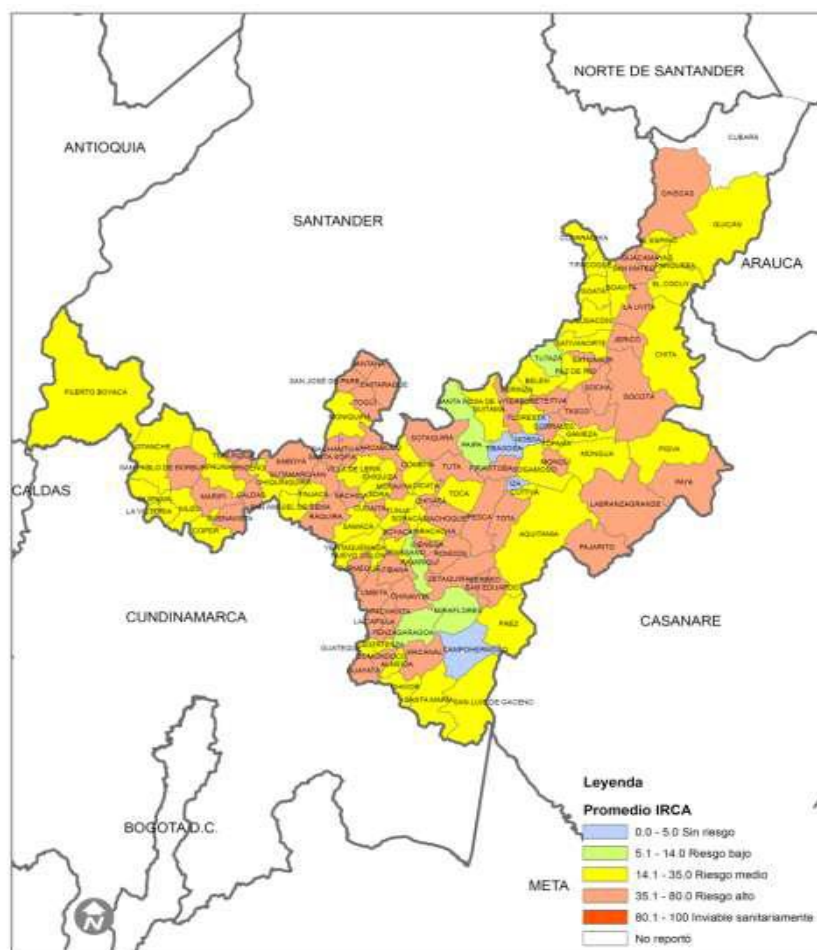
8. RESULTADOS

8.1. CALIDAD DEL AGUA TRATADA

Inicialmente fue necesario consultar toda la información disponible sobre la calidad del agua tratada en el municipio de Combita, a través de las entidades responsables del control y vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano (Anexo A).

En la figura 20 se ilustra la distribución del nivel de riesgo en los municipios de Boyacá

Figura 20. Mapa Distribución del nivel de riesgo en los municipios de Boyacá



Fuente: (Instituto Nacional de Salud, 2012)

En la siguiente tabla se observa un consolidado del Índice de Calidad del Agua para el consumo humano del municipio de Combita en los últimos 7 años.

Tabla 11. Promedio anual IRCA (2007-2013)

PROMEDIO ANUAL IRCA (2007-2013)						
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
9,9	13,9	13,3	8,2	11,3	7,29	2,23

Fuente: (Instituto Nacional de Salud, 2012) y (Secretaria de Salud, 2012-2013)

Como es apreciable, el municipio de Combita siempre presentó un agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento, dado que su IRCA estuvo en el rango de 7.29 a 13, excepto en el año 2013 para el cual no presentó riesgo.

De este modo se entraron a verificar los IRCA mensuales para los años 2012 y 2013, como se indica en las tablas 12 y 13 respectivamente.

Tabla 12. Índice de riesgo de calidad de agua para el consumo humano municipio de Combita (2012)

MES AÑO 2012	N° DE MUESTRAS DE AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO ANALIZADAS (SIVICAP)	IRCA % (SIVICAP)	NIVEL DE RIESGO (SIVICAP)
enero	-	-	-
Febrero	-	-	-
Marzo	2	11,45	riesgo bajo
Abril	1	42,1	riesgo alto
Mayo	1	1,7	sin riesgo
Junio	1	0	sin riesgo
Julio	-	-	-
Agosto	1	0	sin riesgo
septiembre	1	0	sin riesgo
octubre	1	18,6	riesgo medio
noviembre	2	0	sin riesgo
diciembre	1	19,1	riesgo medio

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

Tabla 13. Índice de riesgo de calidad de agua para el consumo humano municipio de Combita (2013)

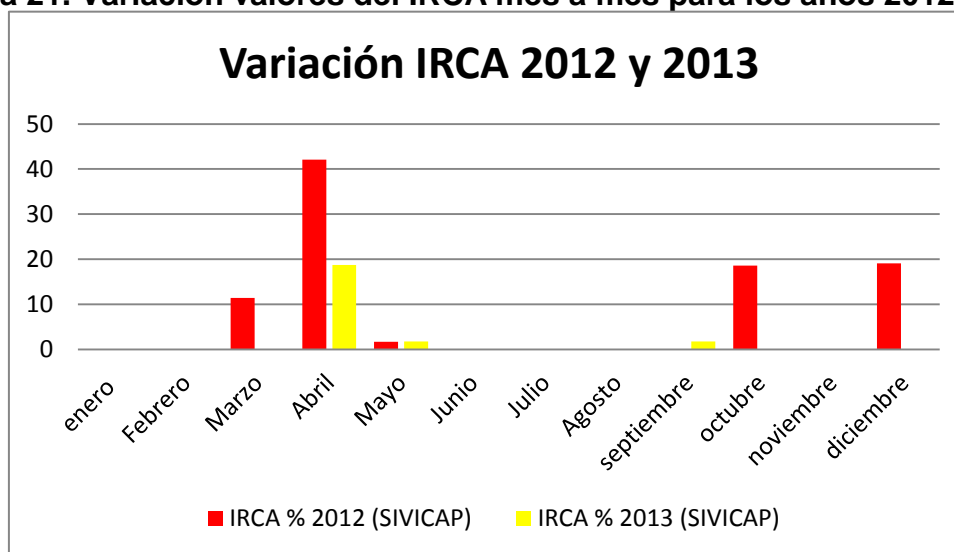
MES AÑO 2013	N° DE MUESTRAS DE AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO ANALIZADAS (SIVICAP)	IRCA % (SIVICAP)	NIVEL DE RIESGO (SIVICAP)
enero	0	-	-
Febrero	0	-	-
Marzo	0	-	-
Abril	1	18,75	riesgo medio

Mayo	1	1,79	sin riesgo
junio	1	0	sin riesgo
Julio	1	0	sin riesgo
agosto	0	-	-
septiembre	1	1,79	sin riesgo
octubre	2	0	sin riesgo
noviembre	1	0	sin riesgo
diciembre	2	0	sin riesgo

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

En la figura 21 se grafican los valores de IRCA para los años 2012 y 2013 mencionados anteriormente, en esta figura es posible observar que el más crítico para los 2 años fue el mes de abril lo que podría deberse a precipitaciones en dicha época, factor que provocaría el incremento de turbiedad en el afluente.

Figura 21. Variación valores del IRCA mes a mes para los años 2012 y 2013



Fuente: Autor

Adicionalmente se exponen los meses más críticos correspondientes al mayor riesgo que presentó el IRCA para los años 2012 y 2013, con los correspondientes parámetros que no cumplieron con los valores aceptables por la Resolución 2115 de 2007 (tablas 14,15 ,16 y 17).

Tabla 14. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (abril 2012)

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	VALOR ACEPTABLE
Color Aparente	17,2	UPC	15
Turbiedad	5,10	UNT	2
pH	5,17	unidades de pH	6,5 - 9
Cloro Residual Libre	8,31	mg de Cl ₂ /L	0,3 - 2

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

Tabla 15. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (octubre 2012)

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	VALOR ACEPTABLE
Turbiedad	4,27	UNT	<= 2

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

Tabla 16 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (diciembre 2012)

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	VALOR ACEPTABLE
Turbiedad	5,34	UNT	<= 2

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

Tabla 17. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del municipio de Combita (abril 2013)

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	VALOR ACEPTABLE
Turbiedad	3,05	UNT	<= 2

Fuente: Informe de análisis de calidad del agua para consumo humano, laboratorio de salud pública de Boyacá

En virtud a lo anterior se puede evidenciar una remoción ineficiente y reiterativa en la turbiedad del agua tratada, que asociado con un valor de pH ácido se puede relacionar con problemas de operación y particularmente de dosificación en la planta.

8.2. ESTADO Y OPERACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

8.2.1. Patologías encontradas

A continuación se observan las patologías encontradas en las unidades de los procesos de la PTAP en las visitas realizadas (tabla 18).

Tabla 18. Patologías de las unidades de operación de la PTAP

UNIDAD	DESCRIPCION
	La cámara de homogenización presenta filtración del agua, lo que deteriora la estructura, como se observa en la figura.



La unidad de mezcla rápida evidencia deterioro con presencia de moho, dado que a la altura de la falla se encuentra una placa interna en la estructura, es posible concluir que la generación juntas frías en la estructura, ha permitido la filtración del agua. Con lo cual se ve afectado el proceso de tratamiento.



La unidad de floculación evidencia presencia de floc en las paredes de la estructura lo que puede generar corrosión en la misma. Adicionalmente se observan fisuraciones y desprendimiento en algunas zonas de la capa que recubre la estructura

	<p>En la unidad de sedimentación se encontró obstrucción en las tres tuberías que conducen el agua sedimentada, debido a que se encuentran sumergidas en el agua. En el modulo de sedimentación se apreció acumulación de lodos y taponamiento. Todo lo anterior resultado de la falta de mantenimiento, que afecta altamente la eficiencia en la remoción de los sólidos.</p>
	<p>El estado de fisuración en las paredes del tanque de almacenamiento, son producto del envejecimiento del concreto por acción del agua almacenada, de agentes externos y falta de mantenimiento. Dicha fisuración provoca la filtración de agua y la aparición de moho en la estructura, lo que conlleva a la pérdida de caudal y contaminación del agua tratada con material orgánico.</p>

Fuente: Autor

Finalmente cabe destacar que las unidades de filtración se encontraron en aparente buen estado, ya que no fue posible la verificación de sus condiciones internas, dado que los filtros son en acero y totalmente cerrados.

8.2.2. Dimensiones y parámetros específicos

Aireación

Es importante resaltar como lo indica el diagrama de la PTAP (figura 11) que el agua que pasa por unidad de aireación no efectúa el proceso de coagulación ya que no entra en contacto con el coagulante, pues su aplicación se realiza en la tubería que conecta el tanque de homogenización y la cámara de coagulación, teniendo esta última conexión directa con la unidad de aireación.

De acuerdo a los parámetros verificados en la tabla 19, se observa que el espaciamiento entre bandejas y el espesor del lecho de coque, no cumplen los valores recomendados por ninguno de los autores citados a continuación. Lo que no permite generar la suficiente aireación y una adecuada oxidación de hierro y manganeso.

Tabla 19. Verificación de parámetros de la unidad de aireación.

AIREADOR DE BANDEJA MULTIPLE			
Criterio: RAS 2000			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Numero de bandejas	3-5	5	CUMPLE
Espaciamiento entre bandejas(m)	0,3-0,75	0,25	NO CUMPLE
Espesor del lecho de coque	0,15-0,3	0,13	NO CUMPLE
Criterio: Asce-Awwa-CSSE			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Numero de bandejas	3-9	5	CUMPLE
Espaciamiento entre bandejas (m)	0,3-0,75	0,25	NO CUMPLE
Criterio: Isofopal-Awwa			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Numero de bandejas	3-5	5	CUMPLE
Espaciamiento entre bandejas (m)	0,3-0,75	0,25	NO CUMPLE
Espesor del lecho de coque	0,20-0,3	0,13	NO CUMPLE

FUENTE: Autor

Floculación

Teniendo en cuenta el valor recomendado por el RAS 2000 como se observa en la tabla 20, se encuentra que la profundidad del floculador está en el rango permitido. No obstante es de mencionar que la PTAP únicamente tiene un floculador lo que causaría suspensión en la operación en el caso de labores de mantenimiento o fallas en la estructura.

Tabla 20. Verificación de parámetros de la unidad de floculación.

FLOCULADOR FLUJO VERTICAL			
Criterio: RAS 2000			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Profundidad (m)	2-5	2,44	CUMPLE

FUENTE: Autor

Sedimentación

Se encontró que las dimensiones del sedimentador no cumplen con las mínimas requeridas por la literatura consultada como se observa en la tabla 21, además sólo se cuenta con un sedimentador lo que no garantizaría la continuidad del servicio.

Tabla 21. Verificación de parámetros de la unidad de sedimentación.

SEDIMENTADOR TASA ALTA			
Criterio: RAS 2000			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Profundidad (m)	4-5,5	2,4	NO CUMPLE
Inclinación de placas	55°-60°	60°	CUMPLE
Número de unidades	> 2	1	NO CUMPLE
Criterio: Asce-awwa-csse			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Profundidad (m)	> 3	2,4	NO CUMPLE
Largo(m)	< 75	3,2	CUMPLE
Criterio: Cepis			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado

Profundidad (m)	3-4	2,4	NO CUMPLE
Ancho útil (m)	<12	2	CUMPLE
Largo útil (m)	<48	3,2	CUMPLE
Criterio: Tchobanoglous			
Parámetro de diseño	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
Ancho útil (m)	3,5-10	2	NO CUMPLE
Largo útil (m)	15-40	3,2	NO CUMPLE

FUENTE: Autor

Filtración

La PTAP cuenta con tres unidades de filtración cada una trata un tercio del caudal total, sin embargo los tres filtros se encuentran interconectados y alimentados por la misma tubería, lo que ocasiona que en el caso de labores de mantenimiento se tenga que suspender el servicio cerrando el paso a través de la única tubería que los alimenta y por ende los tres filtros saldrían de operación.

En cuanto a los parámetros de dimensionamiento no fue posible hallar criterios de diseño para filtros a presión como los de la PTAP de Combita, ya que la literatura encontrada se limita únicamente a filtros convencionales.

8.2.3. Parámetros de operación

Para la verificación de operación de la planta se tomó como caudal el que opera en la actualidad, que es de 3.18 L/s (Anexo D).

Tanque de homogenización

$$\textit{Tiempo retencion: } \frac{\textit{Volumen (m}^3\textit{)}}{\textit{Q operación}} \quad (1)$$

- Volumen (M^3): largo útil (M) X Ancho útil (m)x Profundidad (m)
- Q operación: caudal de operación

$$\textit{Volumen (m}^3\textit{): } 0.95\textit{m} * 0.85 * 1.2\textit{m: } 0.96\textit{m}^3 \quad (2)$$

$$\text{Tiempo retencion: } \frac{0.96\text{m}^3}{0.00318\text{m}^3/\text{s}} : 304.7\text{s}$$

$$\text{Tiempo retencion: } 5.07 \text{ min}$$

Coagulación

Teniendo en cuenta que el coagulante es aplicado en la tubería que conduce del tanque de homogenización a la cámara de coagulación, se verifica si hay turbulencia en dicha tubería.

$$\text{Diámetro: } 2'' = 0,0508 \text{ m}$$

$$\text{Viscosidad: } 1.14\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s} \text{ (Para una temperatura de } 15^\circ\text{C)}$$

$$\text{Velocidad (m/s): } \frac{Q}{A} \quad (3)$$

$$\text{Área (m}^2\text{): } \frac{\pi * D^2}{4} : \frac{\pi * 0.0508^2}{4} \quad (4)$$

$$\text{Área: } 0.00202 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad (m/s): } \frac{0.00318\text{m}^3/\text{s}}{0.00202\text{m}^2}$$

$$\text{Velocidad: } 1.57 \text{ m/s}$$

Reynolds

$$Re: \frac{V * D}{\nu} \quad (5)$$

$$Re: \frac{1.57 \text{ m/s} * 0.0508 \text{ m}}{1.14\text{E} - 6 \text{ m}^2/\text{s}}$$

Re: 70658.50

Régimen: Turbulento

Aun cuando en los resultados obtenidos se encuentra turbulencia en el punto de aplicación del coagulante, no es posible garantizar que la turbulencia sea constante dado que en épocas de sequía el caudal de operación se reduciría.

Floculación

La planta presenta un floculador hidráulico de flujo vertical:

- Velocidad promedio de flujo

$$Q: AxV \quad (6)$$

$$V: \frac{Q}{A} = \frac{0.00318 \text{ m}^3/\text{s}}{0.84\text{m} \times 2.3 \text{ m}} = 0.00165 \text{ m/s}$$

- Tiempo de retención:

Longitud de flujo: N° de canales x profundidad útil de cada canal

$$\text{tiempo de retención: } \frac{\text{longitud de flujo}}{\text{velocidad promedio de flujo}} \quad (7)$$

$$L: 4 \times 2.34\text{m}: 9.36\text{m}$$

$$T: \frac{9.36 \text{ m}}{0.00165 \text{ m/s}}: 5673 \text{ s} : 95 \text{ min}$$

- Pérdida de energía

$$R: \frac{A}{P} \quad (8)$$

$$R: \frac{0.84\text{m} \times 2.3\text{m}}{2(0.84 + 2.3)\text{m}}: 0.31 \text{ m}$$

$$hf: \frac{(n \times v)^2 \times L}{R^{4/3}}: \frac{(0.013 \times 0.00165 \text{ m/s})^2 \times 9.36 \text{ m}}{0.31^{4/3}}$$

$$hf: 2.1 \times 10^{-8} \text{ m}$$

- Velocidad V_2 para orificios de 0.1 m de altura

$$V_2: \frac{Q}{A_2} \quad (9)$$

$$V_2: \frac{0.00318 \text{ m}^3/\text{s}}{2.3 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}}: 0.0138 \text{ m/s}$$

$$h: \frac{NV_1^2 + (N - 1) \times V_2^2}{2g} \quad (10)$$

$$h: \frac{4 \times (0.00165 \text{ m/s})^2 + (3) \times (0.0138 \text{ m/s})^2}{2g}$$

$$h: 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$H_T: hf + h \quad (11)$$

$$H_T: 2.1 \times 10^{-8} \text{ m} + 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

- Gradiente de velocidad

$$G: \sqrt{\frac{\gamma \times H}{\mu \times t}} \quad (12)$$

$$G: \sqrt{\frac{9800 \times 3 \times 10^{-5}}{1.14 \times 10^{-3} \times 5673}}: 0.21 \text{ s}^{-1}$$

- Numero de Camp

$$Gt: 0.21s^{-1} * 5673 s: 1210$$

En la tabla 22 se presenta la comparación de parámetros recomendados por la literatura consultada y los resultados obtenidos anteriormente.

Tabla 22. Comparación de los resultados de la unidad de floculación con valores recomendados

FLOCULADOR FLUJO VERTICAL			
Criterio: Smethurst			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Gradiente de velocidad (s^{-1})	20-100	0.21	NO CUMPLE
Tiempo (min)	10 - 60	95	NO CUMPLE
Gt	$2 \times 10^4 - 1.5 \times 10^5$	1210	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.15 – 0.5	0.00165	NO CUMPLE
Ht (m)	0.15 – 0.6	3×10^{-5}	NO CUMPLE
Criterio: Arboleda			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Gradiente de velocidad (s^{-1})	10-100	0.21	NO CUMPLE
Tiempo (min)	15 - 20	95	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.10 – 0.60	0.00165	NO CUMPLE
Criterio: Insfopal			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Tiempo (min)	15 - 60	95	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.15 – 0.45	0.00165	NO CUMPLE
Criterio: Harddenbergh y Rodie			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Tiempo (min)	20 - 50	95	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.15 – 0.45	0.00165	NO CUMPLE
Criterio: Harddenbergh y Rodie			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Tiempo (min)	10 - 90	95	NO CUMPLE

Velocidad (m/s)	0.10 – 0.90	0.00165	NO CUMPLE
Ht (m)	0.30 – 0.90	3×10^{-5}	NO CUMPLE
Criterio: Awwa			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Gradiente de velocidad (s^{-1})	5-100	0.21	NO CUMPLE
Tiempo (min)	10 - 60	95	NO CUMPLE
Gt	$3 \times 10^4 - 1.5 \times 10^5$	1210	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.09 – 0.30	0.00165	NO CUMPLE
Criterio: Cepis			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Gradiente de velocidad (s^{-1})	10-100	0.21	NO CUMPLE
Tiempo (min)	10 - 60	95	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.10 – 0.60	0.00165	NO CUMPLE
Criterio: RAS 2000			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Gradiente de velocidad (s^{-1})	20-70	0.21	NO CUMPLE
Tiempo (min)	20 - 30	95	NO CUMPLE
Velocidad (m/s)	0.20 – 0.60	0.00165	NO CUMPLE

Fuente: Autor

Como se puede observar ninguno de los parámetros cumple con los valores recomendados, lo que se debe principalmente a un sobredimensionamiento del área de los canales de floculación, dado que cuenta con una velocidad promedio de flujo muy baja y un tiempo de retención muy largo que “tiende a aumentar la rotura del floc y producir características pobres de sedimentación” (Romero Rojas, Purificación del Agua, 2000).

Sedimentación

La PTAP presenta un sedimentador de flujo ascendente.

Velocidad media de flujo de sedimentación:

$$V_o: \frac{Q}{A \times \text{Sen}\theta} \quad (13)$$

$$0.00318 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_o: \frac{0.00318 \text{ m}^3/\text{s}}{(2 \text{ m} \times 2 \text{ m}) * \text{Sen } 60} : 9.18 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{s} : 0.094 \text{ cm}/\text{s}$$

- Carga superficial para el área cubierta por los módulos

$$CS: \frac{Q}{A} \quad (14)$$

$$CS: \frac{274.75 \text{ m}^3/\text{d}}{2 \text{ m} \times 2 \text{ m}} : 68.7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$$

- Numero de Reynolds

$$N_{RE}: \frac{V_o * d}{\nu} \quad (15)$$

$$N_{RE}: \frac{9.18 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{s} \times 0.051 \text{ m}}{1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}} : 41$$

- Tiempo de retención en los módulos

$$T: \frac{L}{V_o} \quad (16)$$

$$T: \frac{2 \text{ m}}{9.18 \times \frac{10^{-4} \text{ m}}{\text{s}}} : 2179 \text{ s} : 36 \text{ min}$$

- Tiempo de retención en el tanque de sedimentación

$$t: \frac{2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2.40 \text{ m}}{0.00318 \text{ m}^3/\text{s}} : 3019 \text{ s} : 50 \text{ min}$$

La tabla 23 ilustra la verificación de parámetros recomendados por la literatura consultada y los resultados obtenidos anteriormente. Para determinar que parámetros están cumpliendo con los valores recomendados.

Tabla 23. Comparación de los resultados de sedimentación con valores recomendados

SEDIMENTADOR TASA ALTA			
Criterio: Cepis			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
CS(m ³ /m ² xd)	60-240	68.7	CUMPLE
Criterio: Perez			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
CS(m ³ /m ² xd)	100-300	68.7	NO CUMPLE
Tiempo (min)	< 15	36	NO CUMPLE
N _{RE}	150-500	41	NO CUMPLE
Criterio: Montgomery			
Parámetro	Valor recomendado	Valor calculado	Resultado
Tiempo (min)	15-25	36	NO CUMPLE
Vo (cm/s)	< 1	0.09	CUMPLE
N _{RE}	< 200	41	CUMPLE
Criterio: Arboleda			
Parámetro	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
CS(m ³ /m ² xd)	120-300	68.7	NO CUMPLE
N _{RE}	< 250	41	CUMPLE
Criterio: Culp			
Parámetro	Valor recomendado	Valor medido	Resultado
CS(m ³ /m ² xd)	180-300	68.7	NO CUMPLE

Fuente: Autor

Como se muestra en la tabla de criterios de diseño, los parámetros que no cumplen con los valores recomendados por los autores, son carga superficial y tiempo de retención en los módulos. Lo que implicaría reducir el área cubierta por los módulos para generar una mayor velocidad y un menor tiempo de retención.

8.3. ESTADO DE OPERACIÓN

Para verificar la operación de la planta se realizó una encuesta al operario (Anexo B). En la cual se consultó sobre la operación de las unidades y su mantenimiento, además de la dosificación de los insumos aplicados en el proceso, así como el procedimiento para calcular dichas dosis.

Teniendo en cuenta la información suministrada por el operario, se determinó que para los ensayos de jarras con los que se establece las dosificaciones aplicadas en la planta, se presenta tanto para la mezcla rápida como lenta un mismo valor de velocidad de rotación de 50 RPM lo que equivale a un gradiente de velocidad de 57.22 s^{-1} , es decir que no se están obteniendo los gradientes recomendados por la literatura para lograr los procesos diferenciados y adecuados de coagulación y floculación, adicionalmente el tiempo de sedimentación en cada ensayo es de 5 minutos, tiempo que no es suficiente para que se logre una buena sedimentación de las partículas coloidales formadas.

Los 5,47 Kg de sulfato de aluminio aplicados diariamente en la Planta, que corresponden a una dosificación de 20mg/L, es muy superior al rango de dosificación usado por el operador en el ensayo de jarras que se encuentra entre 2 y 8 mg/L. Para soda caustica se están aplicando en la planta dosificaciones inferiores a las utilizadas en la prueba de jarras como se pudo constatar en la encuesta. Todo lo anterior evidencia que las dosificaciones de los insumos no se están realizando apropiadamente y soportadas sobre criterios técnicos sino sobre criterios empíricos del operador.

Por otra parte si bien se dice que se hace mantenimiento continuo a las unidades (cámara de coagulación, floculación y sedimentación), es de aclarar que teniendo en cuenta las condiciones en que fueron encontradas durante las visitas se puede determinar que el mantenimiento no es suficiente o adecuado.

8.3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

El caudal de diseño calculado para el año 2014: 2.85 L/s (Anexo C).

Caudal de operación de la planta: 3.18 L/s (Anexo D).

La variación del caudal de diseño con respecto al caudal de operación de la PTAP, se debe a que la planta suministra el servicio de acueducto no sólo al área urbana sino también a una de las veredas del municipio y dicha población rural no se encuentra proyectada en el caudal de diseño calculado, dado que no se conoce con precisión información censal rural reportada por el DANE.

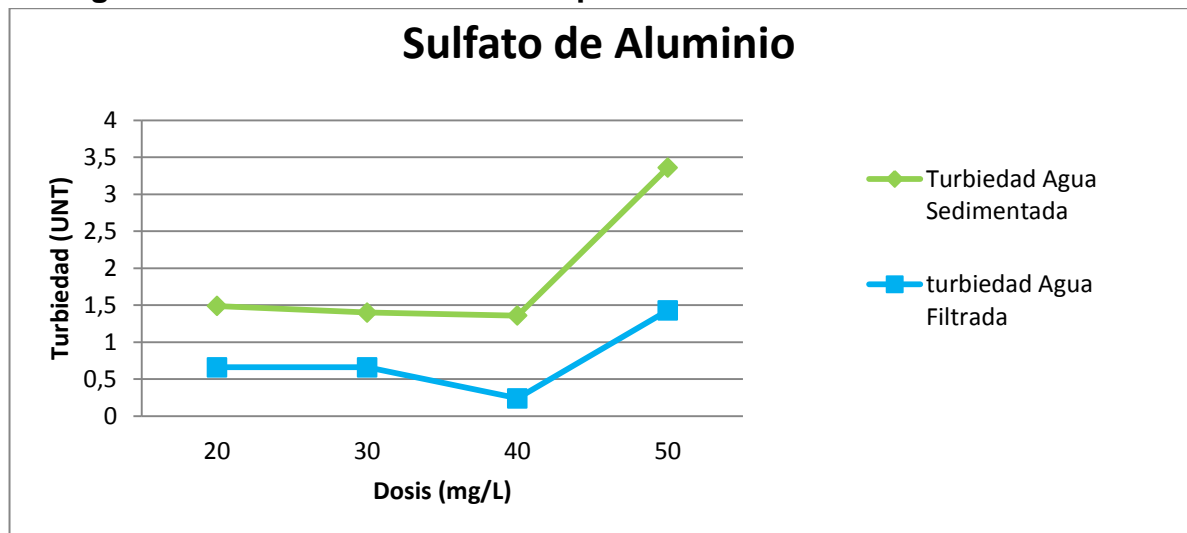
Se puede decir que la planta paulatinamente irá operando en condiciones superiores a las que posiblemente fue diseñada, más aun si se diseñó exclusivamente para atender usuarios del área urbana. Lo que se puede traducir en una reducción de la eficiencia en los procesos de tratamiento de la PTAP.

8.4. ENSAYOS DE JARRAS

- **Sulfato de aluminio**

La figura 22 refleja el comportamiento en el ensayo de jarras del parámetro de turbiedad para las dosificaciones de 20, 30, 40 y 50 mg/L de sulfato de aluminio (Tabla 1E). Se puede observar que para las 3 primeras dosis del coagulante, el valor de la turbiedad no supera el máximo aceptable de 2 UNT establecidas por la normatividad vigente, conjuntamente se observó que la cuarta dosis presentó un valor superior a las anteriores y en el caso del agua sedimentada fue mayor que el fijado por la normatividad.

Figura 22. Variación de turbiedad para las dosis de sulfato de aluminio

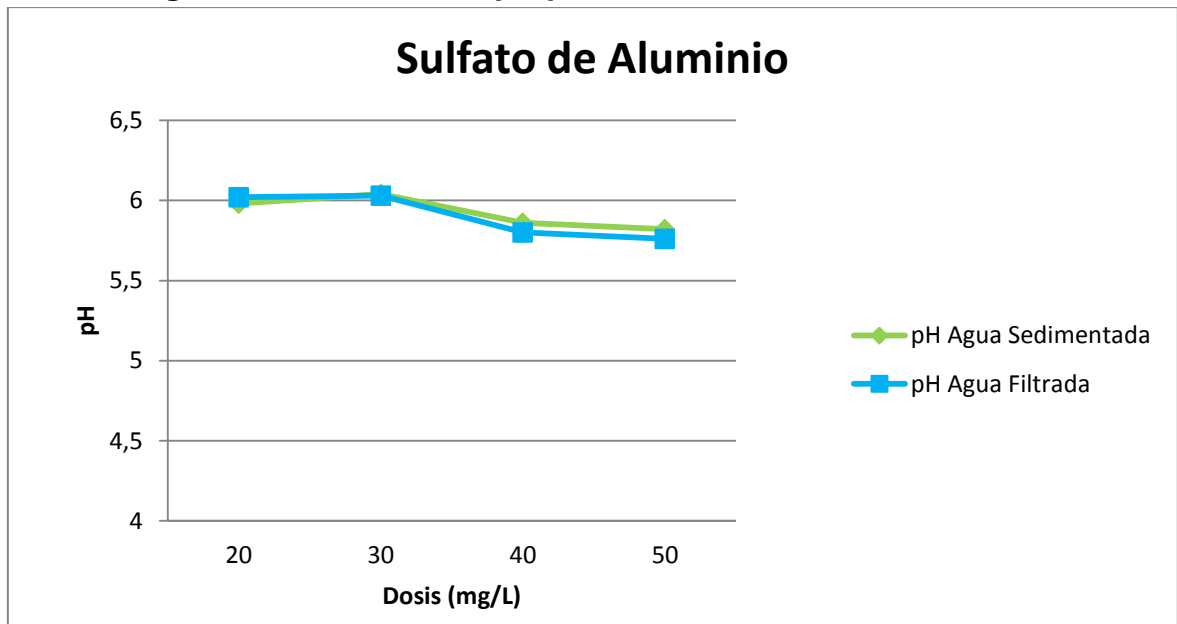


Fuente: Autor, 2014

De acuerdo a lo anterior se observa que a partir de una dosis de 40 mg/L se puede generar sobredosificación representada en un aumento desproporcionado de la turbiedad. Igualmente cabe destacar que el proceso de filtración es indispensable para obtener una remoción adecuada.

Los resultados de pH se incluyen en la Figura 23. Donde se observa que los valores de pH se encuentran entre 6,04 y 5,76 para el agua sedimentada y filtrada.

Figura 23. Variación de pH para dosis de sulfato de aluminio

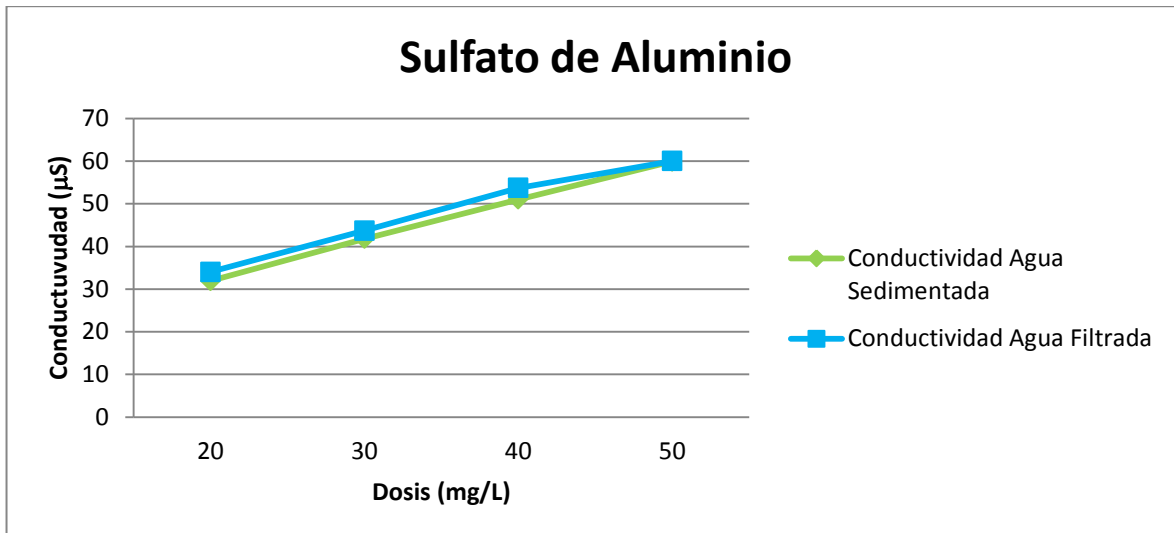


Fuente: Autor, 2014

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se encontró que ninguna de las dosis cumplió con el pH mínimo de 6,5 determinado por la norma. Además, se observó disminución del pH con respecto a la muestra de agua cruda inicial ya que contaba con un pH de 7,21. Este comportamiento se puede soportar debido a que el sulfato de aluminio disminuye la alcalinidad del agua y por consiguiente aumenta su acidez.

El comportamiento del parámetro de conductividad en la figura 24, presenta un aumento a través del incremento de la dosificación, lo que determina que el uso del sulfato de aluminio aumenta la cantidad de sustancias disueltas. Cabe resaltar que los valores obtenidos para las dosis analizadas cumplen con el valor establecido en la normatividad, de 1000 $\mu\text{S/cm}$

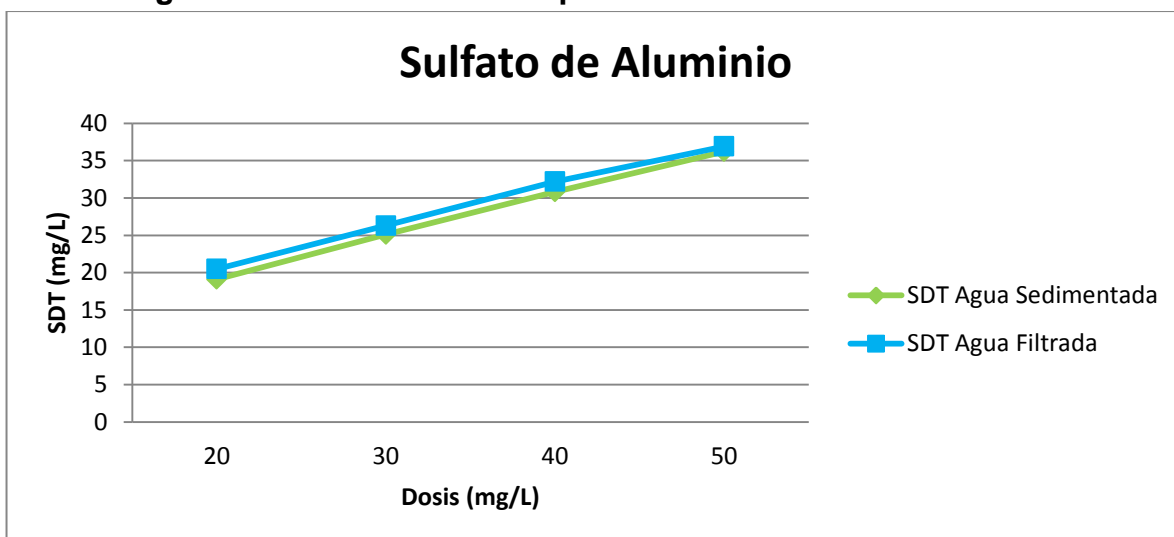
Figura 24. Variación de la conductividad para dosis de sulfato de aluminio



Fuente: Autor, 2014

En la figura 25 se observó incremento de la concentración de solidos disueltos totales para las dosis aplicadas, este incremento fue para el agua sedimentada como para el agua filtrada. A través de la medición de este parámetro fue posible corroborar la literatura que afirma que la cantidad de SDT está entre el 50% y el 80% de la conductividad en el agua estudiada. (Romero Rojas, Purificación del Agua, 2000)

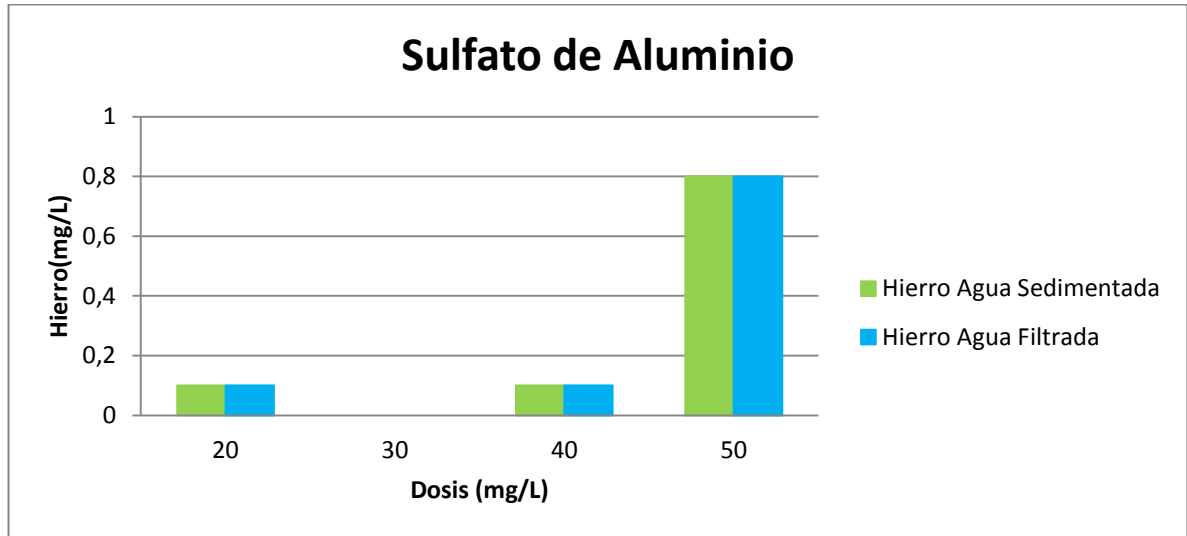
Figura 25. Variación de SDT para dosis de sulfato de aluminio



Fuente: Autor, 2014

Los resultados de hierro en la figura 26, presentan un comportamiento en las tres primeras dosis entre 0 y 0,1 para el agua sedimentada como para el agua filtrada, la cuarta dosis presento un incremento que podría estar relacionado con el aumento de la turbiedad observado para la misma dosis en la Figura 24.

Figura 26. Variación de Hierro para dosis de sulfato de aluminio



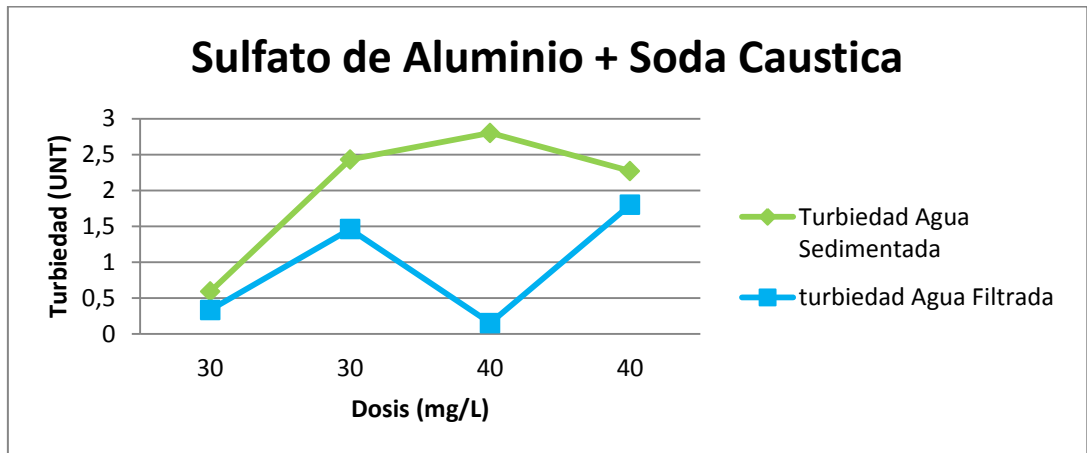
Fuente: Autor

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se descartó la cuarta dosis dado su incremento en el parámetro de turbiedad, hierro y color, finalmente de las tres dosis restantes se seleccionaron la dos y tres, es decir 30 y 40 mg/L, ya que arrojaron los valores más bajos de turbiedad.

- **Sulfato de aluminio más soda caustica**

Para el ensayo de sulfato de aluminio con soda caustica se tomaron en cuentas las dosis de sulfato que presentaron un mejor comportamiento en el ensayo anterior, En la figura 27 se aprecia la variación de turbiedad de dichas dosis acompañadas de soda cáustica a concentraciones de 12, 16, 16 y 20 mg/L respectivamente. (Anexo E, tabla 2E)

Figura 27. Variación de turbiedad para dosis de sulfato de aluminio más soda caustica

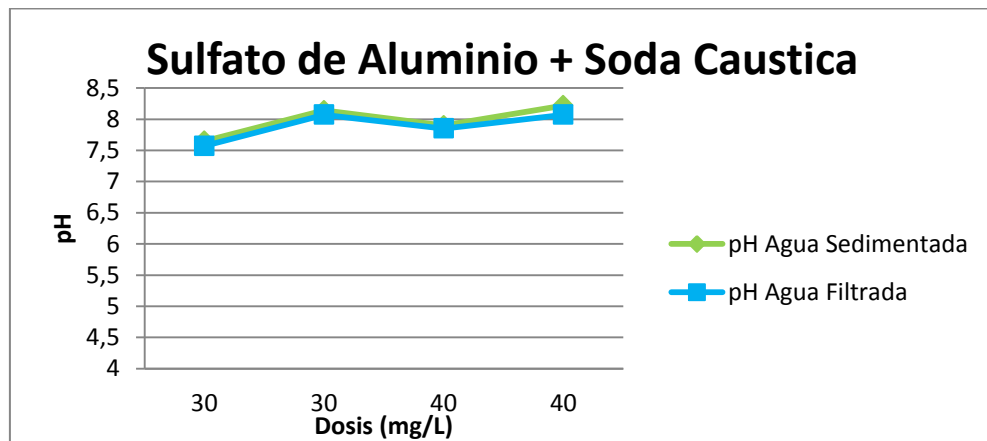


Fuente: Autor, 2014

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observó que existe una tendencia a incrementar la turbiedad en el agua sedimentada respecto al ensayo de las dosis de sulfato de aluminio sin soda caustica, en cuanto a los valores del agua filtrada se observa que las cuatro dosis presentan valores inferiores al máximo establecido por la norma.

Los valores de pH presentados en la figura 28 muestran aumento del pH respecto al obtenido con sulfato de aluminio. Por lo que se confirma que las dosis de soda cáustica aportan alcalinidad al agua.

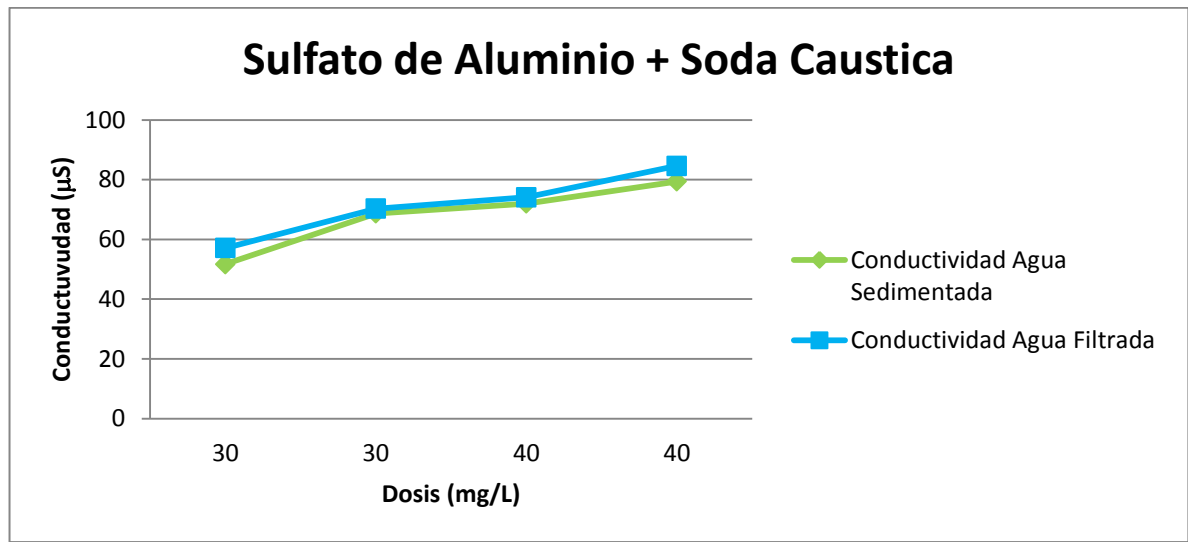
Figura 28. Variación de pH para dosis de sulfato de aluminio mas soda caustica



Fuente: Autor

El parámetro de conductividad presentado en la figura 29 muestra incremento de la conductividad en comparación al ensayo con únicamente sulfato de aluminio. Por consiguiente el uso de soda caustica provoca un incremento de la cantidad de sustancias disueltas principalmente de sales en solución.

Figura 29. variación de conductividad para dosis de sulfato de aluminio más soda caustica



Fuente: Autor

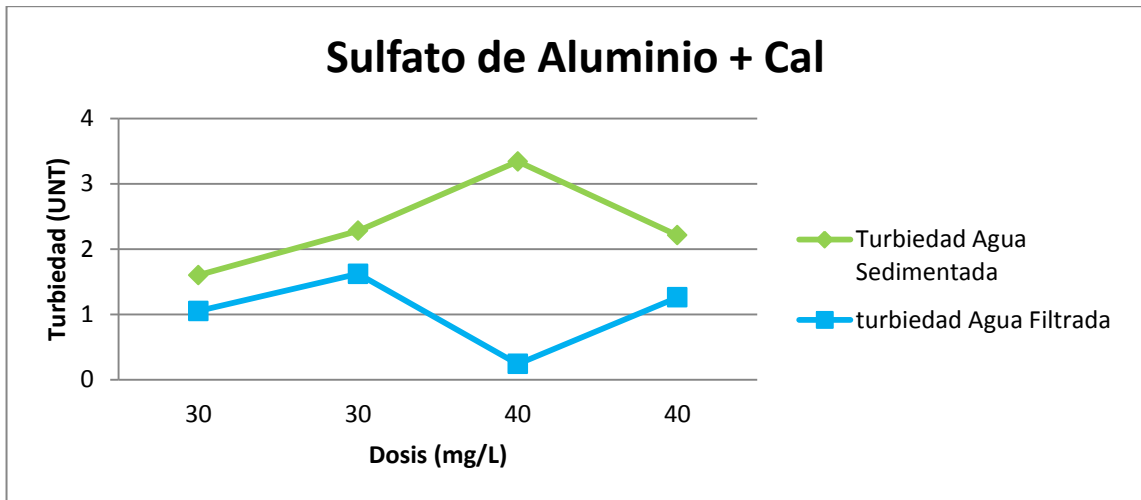
Los resultados de hierro y color para todas las dosis presentaron valores de cero (0), siendo inferior al establecido por la normatividad vigente, de 0.3 mg/L y 15 UPC respectivamente.

Finalmente la jarra que mejor comportamiento mostró fue la jarra uno con una dosis de 30 mg/L de sulfato de aluminio y 12 mg/L de soda caustica. Destacando que para el agua filtrada toda las dosis cumplieron con los parámetros evaluados.

- **Sulfato de aluminio más cal**

Para este ensayo se tuvo en cuenta las dosis de mejores resultados con el sulfato de aluminio, acompañadas de dosis de cal de 10, 15, 15 y 20 mg/L. Los valores de turbiedad expresados en la figura 30, son superiores al máximo establecido por la norma en cuanto a turbiedad compete, exceptuando la primera dosis.

Figura 30. Variación de turbiedad para dosis de sulfato de aluminio más cal

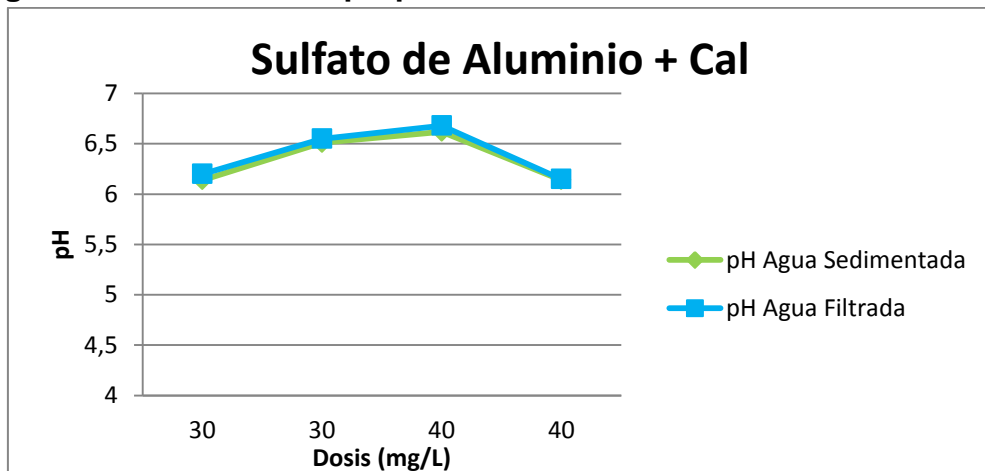


Fuente: Autor

Igualmente se observa disminución del parámetro de turbiedad en el agua filtrada para todas las dosis, logrando cumplir con el máximo de 2 UNT permitido. Teniendo en cuenta los valores de turbiedad encontrados en el ensayo de sulfato de aluminio más soda caustica es posible concluir que los dos alcalinizantes generan valores similares de turbiedad.

Los valores de pH en la figura 31 reflejan un comportamiento similar para el agua sedimentada como para el agua filtrada, además teniendo en cuenta que el valor mínimo de pH que rige la norma es de 6.5 se evidencia que la segunda y tercera muestra son las únicas que cumplen dicho parámetro.

Figura 31. Variación del pH para dosis de sulfato de aluminio más cal

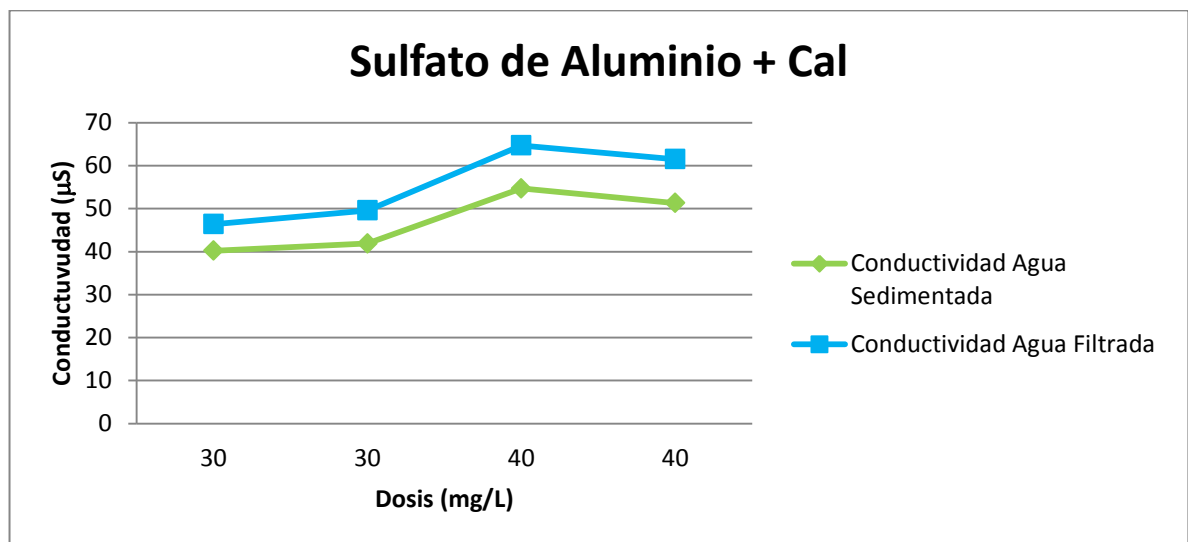


Fuente. Autor

Respecto a los valores de pH del ensayo de sulfato de aluminio más soda caustica, se observa que la soda caustica aumenta en mayor proporción el pH en las muestras que la cal.

La conductancia en el ensayo, mostrada en la figura 32 refleja un comportamiento similar al ensayo realizado únicamente con sulfato de aluminio para el agua sedimentada, es decir el uso de cal no genero incremento de conductividad en las muestras.

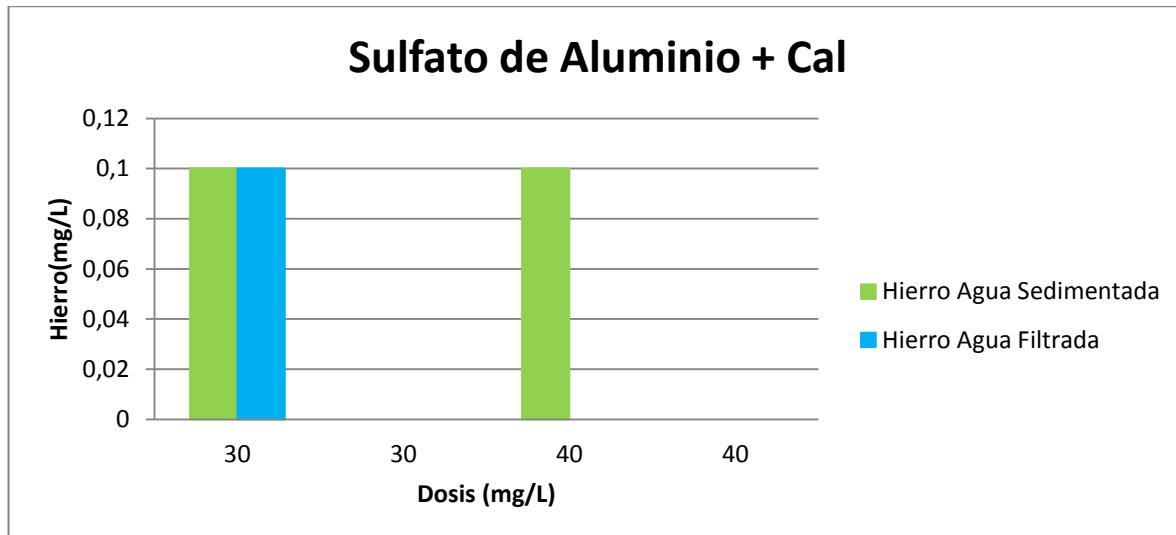
Figura 32. Variación de la conductividad para dosis de sulfato de aluminio más cal



Fuente: Autor

En la Figura 33 se encuentran los valores de hierro de las muestras, los cuales no superan el valor de 0.1 mg/L, por consiguiente todas las dosis presentan un valor aceptable con respecto al valor máximo permitido de 0.3 mg/L.

Figura 33. Variación de hierro para dosis de sulfato de aluminio más cal



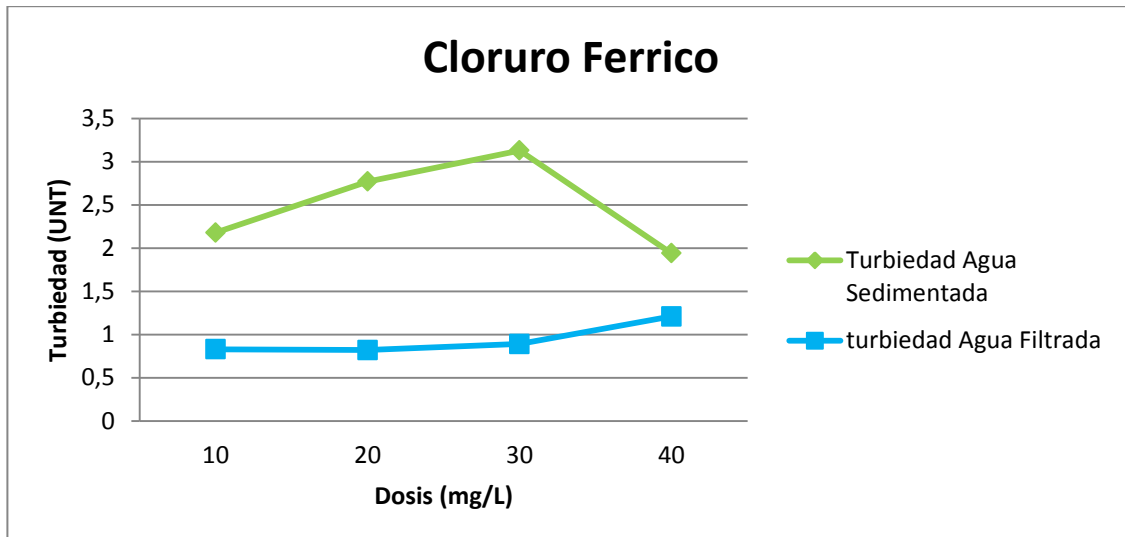
Fuente: Autor

El valor del color aparente y verdadero para las cuatro muestras fue de cero (0). De acuerdo con los resultados, se determinó que la dosis con resultados más óptimos es la tercera con 40mg/L de sulfato de aluminio y 15 mg/L de cal dado que fue la que presentó un pH más alto y mayor remoción de turbiedad.

- **Cloruro férrico**

Para este ensayo inicialmente se tomaron dosis de 10, 20, 30 y 40 mg/L de cloruro férrico, de las cuales, se obtuvieron los valores de turbiedad de la figura 34, logrando una alta remoción de este parámetro mediante la filtración de las muestras.

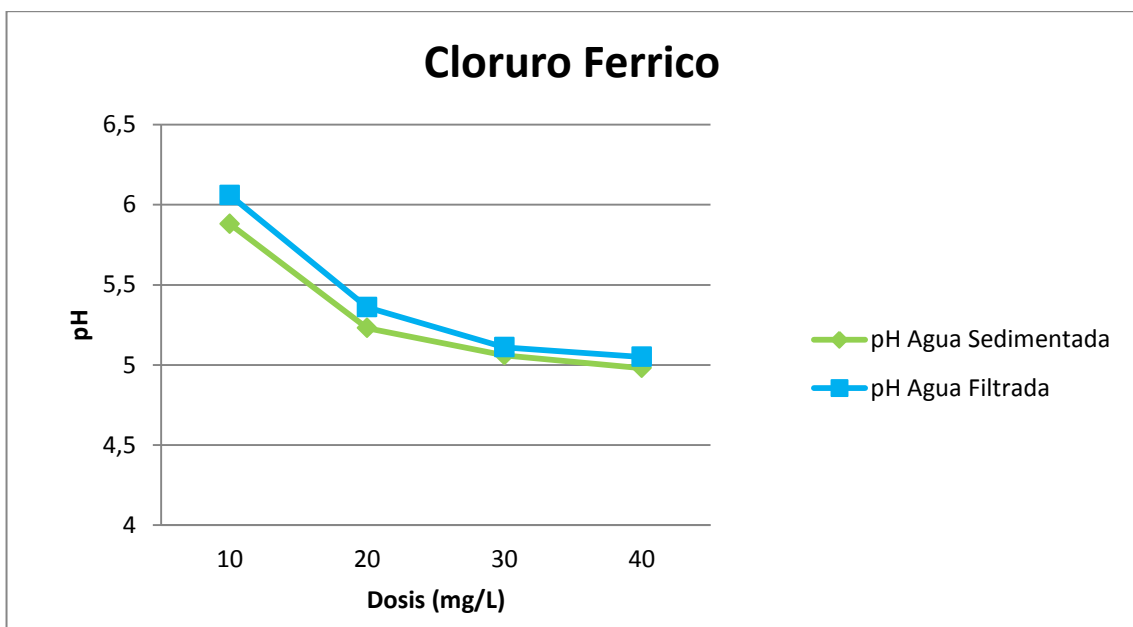
Figura 34. Variación de hierro para dosis de cloruro férrico



Fuente: Autor

De la figura 35 se apreció que hay una tendencia acidificante a medida que se aumentaba la dosis de cloruro férrico. Sin embargo es mayor el pH para el agua filtrada debido al contacto del agua con el filtro.

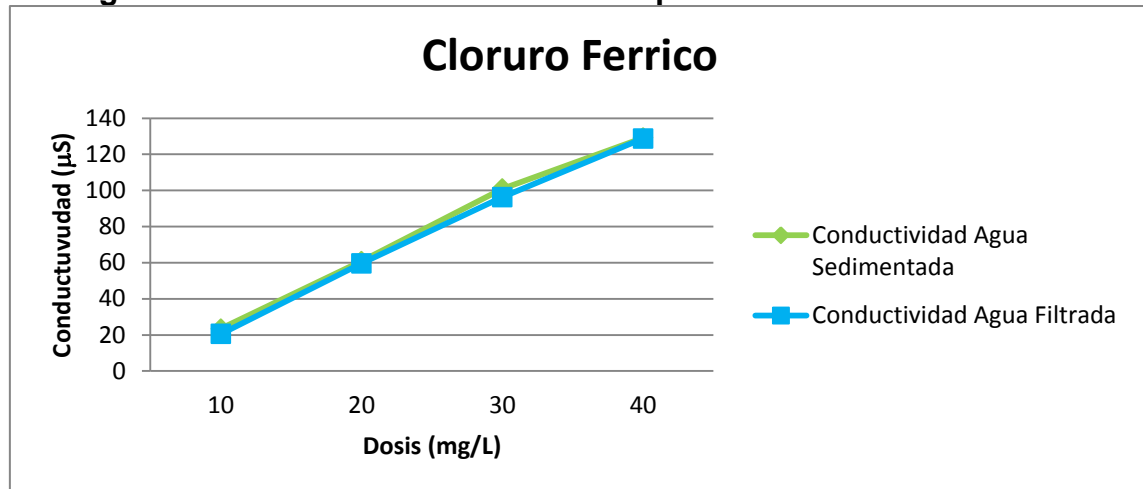
Figura 35. Variación de pH para dosis de cloruro férrico



Fuente: Autor

La conductividad en la figura 36 refleja un crecimiento directamente proporcional de los valores obtenidos a medida que se aumentaban las dosis de cloruro férrico. Dicho aumento se presentó tanto en el agua sedimentada como en el agua filtrada. Lo que confirma la presencia de SDT en el agua a causa principalmente de sales ionizadas.

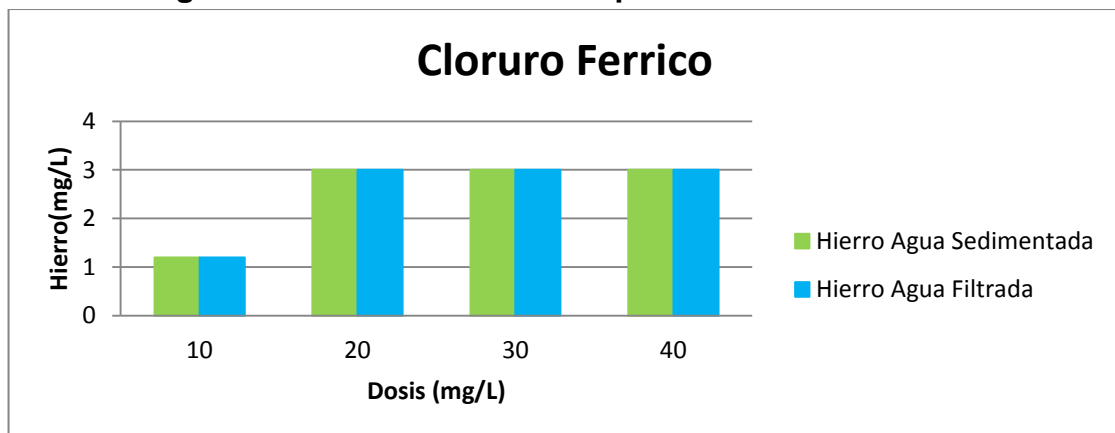
Figura 36. Variación de conductividad para dosis de cloruro férrico



Fuente: Autor

La variación del hierro en la Figura 37 indica un alto incremento del parámetro respecto al valor del agua cruda que es de 0.3 mg/L, esto debido a que el coagulante está compuesto por hierro lo que hace que sea mayor su concentración.

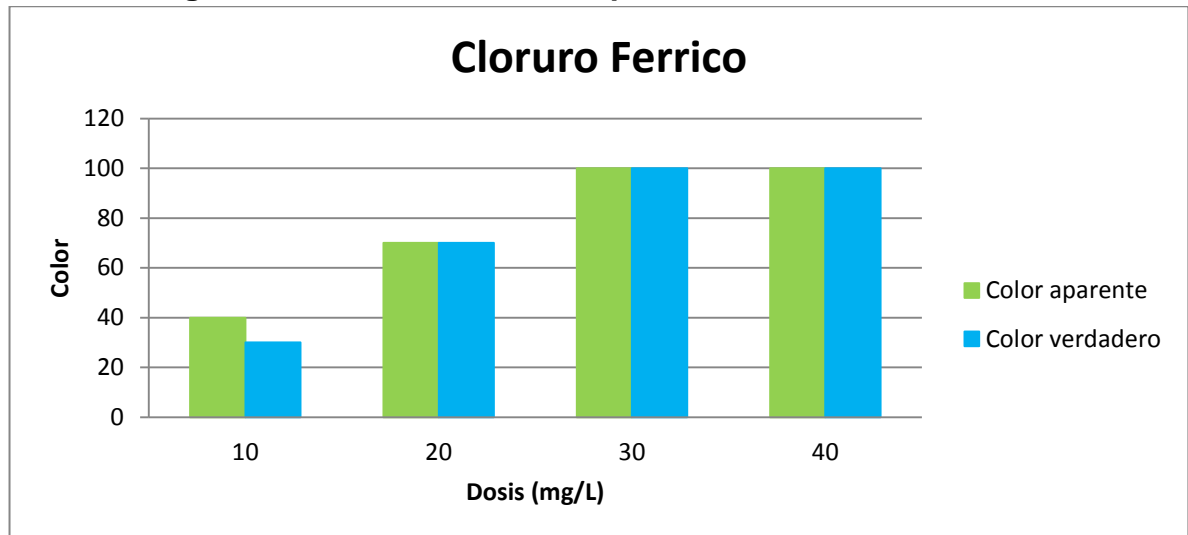
Figura 37. Variación del hierro para dosis de cloruro férrico



Fuente: Autor

En la Figura 38 se presenta el comportamiento del color en las cuatro muestras analizadas, se destaca que ninguna muestra sedimentada ni filtrada refleja un valor aceptable por la norma.

Figura 38. Variación del color para dosis de cloruro férrico



Fuente: Autor

Se encuentra que el valor del color se incrementa al aumentar las dosis de coagulante, este parámetro estaría altamente relacionado con el incremento del hierro en las muestras.

- **Cloruro férrico más soda caustica**

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se redujo las dosis de cloruro férrico a 5, 5,10 y 10 mg/L acompañadas de dosis de soda cáustica de 4, 6, 7 y 9 mg/L respectivamente. De este ensayo se observó (Anexo D. Tabla 5):

No se obtuvo reducciones en la turbiedad en comparación al ensayo con únicamente cloruro férrico.

En cuanto al pH, se encontró que el uso de soda caustica si aumenta el pH considerablemente alrededor de 3 unidades.

La conductividad aumenta con las dosis de soda caustica, esta tendencia se observa tanto en el agua sedimentada como en el agua filtrada, lo que presume la formación de sales.

Los resultados observados en el parámetro de hierro, el cual fue el mismo para el agua sedimentada y filtrada, reflejaron un aumento respecto al ensayo con cloruro

férrico, lo que demuestra que la soda caustica no redujo las concentraciones de hierro.

Se presentaron altos valores de color, por lo que se dice que la soda caustica no ayudo a remover color lo que confirma el comportamiento presentado con la turbiedad.

- **Cloruro férrico más cal**

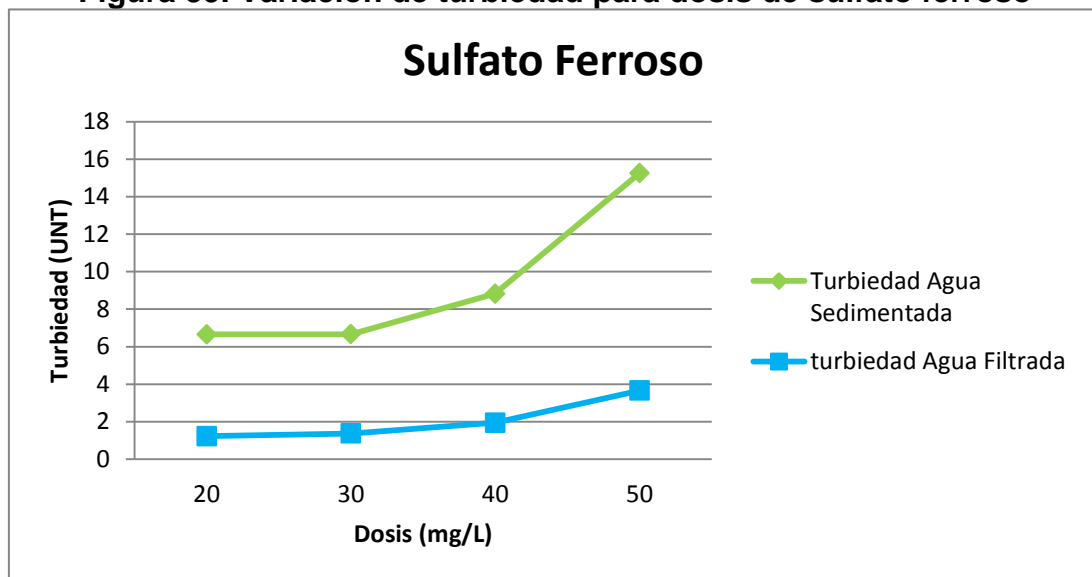
Para el ensayo de cloruro férrico con cal se tomaron dosis de 5, 5,10 y 10 mg/L de cloruro férrico acompañadas de dosis de 4, 6, 7, 9 mg/L de cal respectivamente. En virtud a este ensayo se apreció que los parámetros medidos no variaron significativamente al adicionar cal al cloruro férrico la tabla 6 del Anexo E.

- **Sulfato ferroso**

Para este coagulante se dosificaron inicialmente 20, 30, 40 y 50 mg/L de sulfato ferroso para cada jarra. Se determinaron los datos de turbiedad que se encuentran en la Figura 39.

Los valores de turbiedad se incrementan considerablemente en comparación con los otros coagulantes, lo que corrobora que el sulfato ferroso por lo general funciona pero con la adición de cal, como lo indica la literatura.

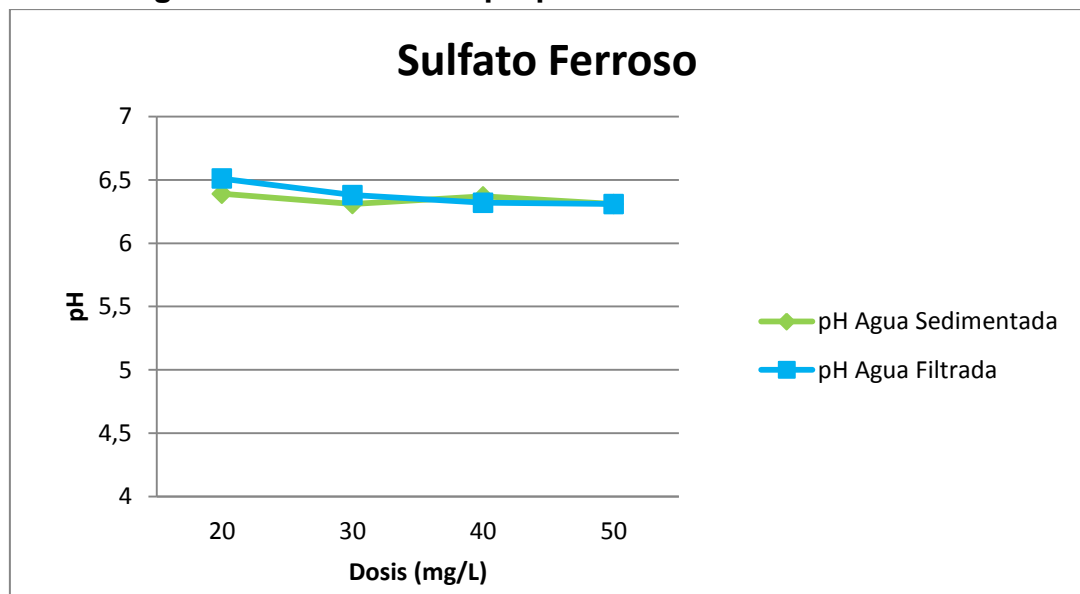
Figura 39. Variación de turbiedad para dosis de sulfato ferroso



Fuente: Autor

En la Figura 40 aparecen los valores de pH tomados a las muestras de agua sedimentada y filtrada, donde se encuentra que ninguno de los valores cumple con el rango de 6,5 a 9 fijados por la norma.

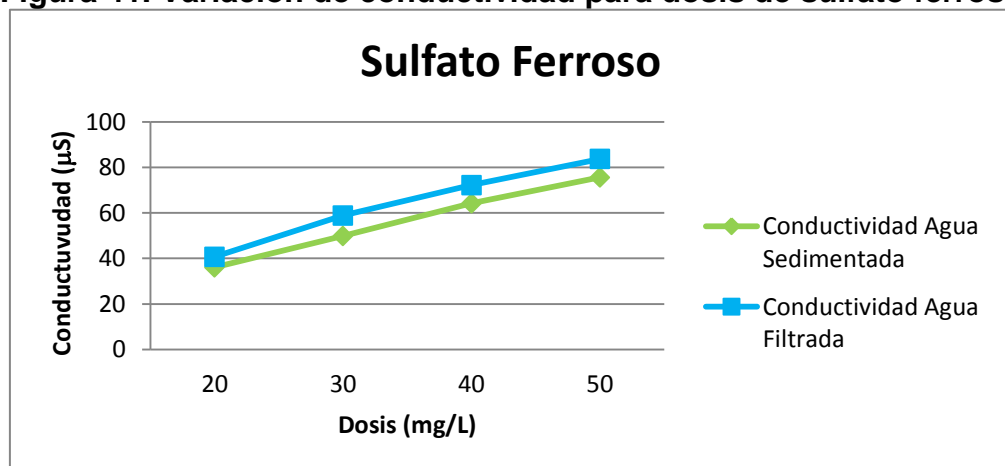
Figura 40. Variación de pH para dosis de sulfato ferroso



Fuente: Autor

En la Figura 41 se representa la variación de la conductividad para las dosificaciones aplicadas, mostrando incremento al aumentar las dosis de sulfato ferroso.

Figura 41. Variación de conductividad para dosis de sulfato ferroso

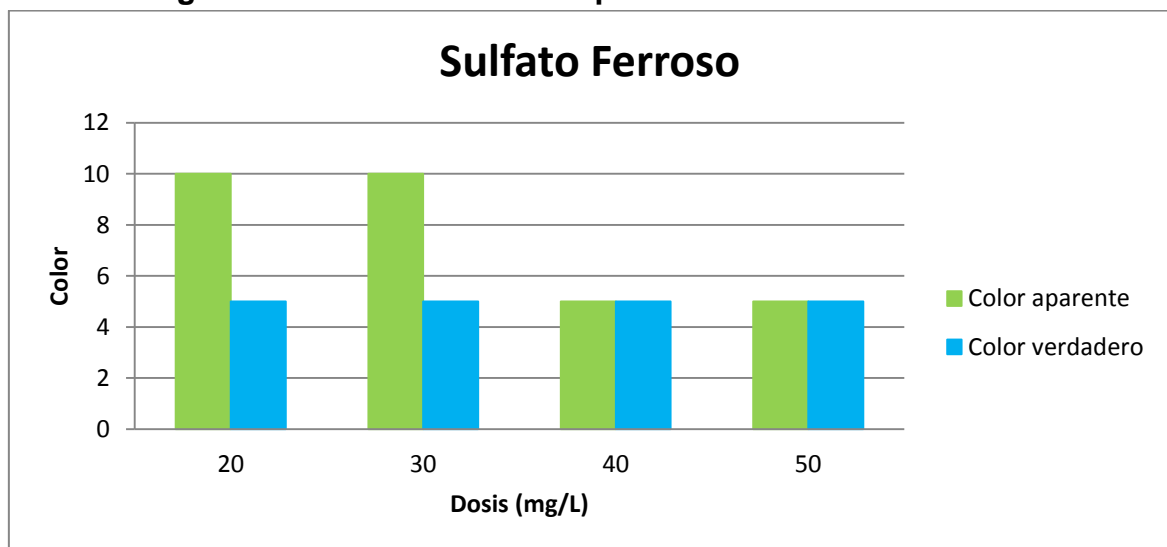


Fuente: Autor

En cuanto al comportamiento del parámetro de hierro, presentó una continuidad en los valores obtenidos, siendo además el mismo valor para el agua sedimentada como para el agua filtrada.(Tabla 7E Anexo E).

La figura 42 indica que el sulfato ferroso exhibe una tendencia a incrementar el color con relación al agua cruda, sin embargo no es tan representativo como el cloruro férrico para el color.

Figura 42. Variación de color para dosis de sulfato ferroso



Fuente: Autor

- **Sulfato ferroso más soda caustica**

En esta prueba de jarras se tuvo en cuenta para sulfato ferroso dosis de 30, 30, 40, 40 mg/L y dosis de 17, 20, 23 y 26 mg/L de soda caustica.

En este ensayo queda en evidencia la incompatibilidad del sulfato ferroso con la soda caustica, arrojando valores muy altos de color y turbiedad particularmente, lo que confirmo la inviabilidad de esta combinación (Tabla 8E Anexo E).

- **Sulfato ferroso más cal**

Para este ensayo se usaron dosis de sulfato ferroso iguales a las usadas en el ensayo anterior, acompañadas de dosis de cal de 16, 20, 20 y 24 mg/L respectivamente.

De este ensayo se observó (Anexo E. Tabla 9):

- Se evidencio que el sulfato ferroso más cal, logra buenas reducciones en la turbiedad en comparación a los anteriores ensayos con sulfato ferroso.
- En cuanto al pH, se encuentra en valores estables dentro del rango que exige la norma, al igual que sucedió para los ensayos realizados con tanto con soda caustica como sin ningún alcalinizante.
- La conductividad y el hierro presentaron una tendencia de incremento con relación a su medición en el agua cruda, pero no registraron mayores variaciones una vez se filtró el agua.
- Se presentaron altos valores de color en el agua sedimentada, los cuales fueron removidos mediante el proceso de filtración en un 100% para todas las muestras, este comportamiento se dio lugar debido a la buena formación de un floc que no pudo ser sedimentado en su totalidad, pero si ser removido en la filtración .

9. OPTIMIZACIÓN

- **SELECCIÓN DE COAGULANTE Y ALCALINIZANTE OPTIMO**

En la tabla 24 se observan los datos iniciales medidos al agua cruda a tratar y la tabla 25 representa un consolidado de los mejores resultados a lo largo de los ensayos para las dosificaciones de cada coagulante y alcalinizante, conjuntamente a los diferentes parámetros medidos en el laboratorio.

Tabla 24. Datos de parámetros medidos al agua cruda previo al tratamiento

Temperatura	15° C
Turbiedad	4.2 UNT
Color	5 UPC
pH	7.21
Conductividad	11,6 μ S/cm
Hierro	0,3 mg/L
SDT	6,62 mg/L

Fuente: Autor

Tabla 25. Dosificaciones de coagulantes y alcalinizantes con mejores resultados

coagulante + alcalinizante	Dosis (mg/L)	Agua Sedimentada							Agua Filtrada								
		Turbiedad	Color	pH	Conductividad	Hierro	SDT	Lodo	Turbiedad	% Remoción turbiedad	Color	% Remoción color	pH	Conductividad	Hierro	% Remoción hierro	SDT
A Sulfato de aluminio + Soda caustica (mg/L)	30 12	0.59	0	7.65	51.7	0	31	0.2	0.33	92.14	0	100	7.57	57.1	0	100	34.2
B Sulfato de aluminio + Cal (mg/L)	40 15	3.34	0	6.62	54.7	0.1	32.8	0.1	0.24	94.29	0	100	6.68	64.7	0	100	36.9
C Cloruro Férrico + Soda caustica (mg/L)	5 4	2.23	30	7.96	28.3	2	17	0.1	1.43	65.95	20	-300	8.06	33.4	2	-566.666667	20
D Cloruro Férrico + Cal (mg/L)	5 6	2.02	30	6.98	44.6	2	26.6	0.1	1.18	71.90	10	-100	7.1	21.3	1.2	-300	12.9
E Sulfato Ferroso+ Soda caustica (mg/L)	40 23	6.08	100	8.09	93.4	3	56	2.4	3.49	16.90	70	-1300	8.45	97.8	3	-900	58.7
F Sulfato Ferroso + Cal (mg/L)	30 16	1.16	40	6.68	53.5	3	32.1	6	0.21	95.00	0	100	6.76	56.4	3	-900	35.1

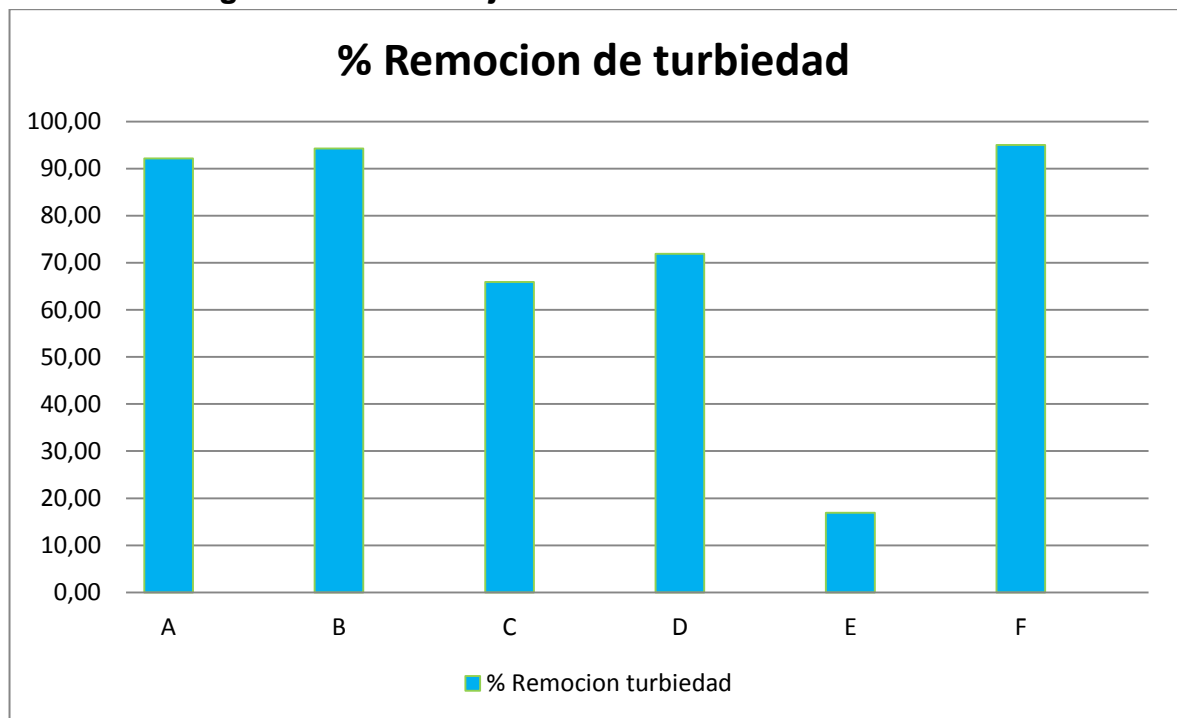
Fuente: Autor

Como se puede observar todas las dosis arrojaron un valor de pH aceptable de acuerdo a la normatividad (6,5 – 9).

En cuanto a la generación de lodo en el proceso, se observa que las dosis compuestas por sulfato ferroso (E y F) producen gran cantidad de mL de lodo lo que haría necesario un mayor mantenimiento en las unidades, en especial del sedimentador y los filtros.

Sin embargo ya que la turbiedad para esta PTAP es uno de los parámetros con incumplimiento de la normatividad para agua potable y por consiguiente elevando los valores del IRCA de los últimos años, es importante identificar el porcentaje de remoción de dicho parámetro para cada una de las dosis de coagulante y alcalinizante mencionadas en la tabla 24. La figura 43 ilustra dichas remociones.

Figura 43. Porcentajes de remoción final de turbiedad

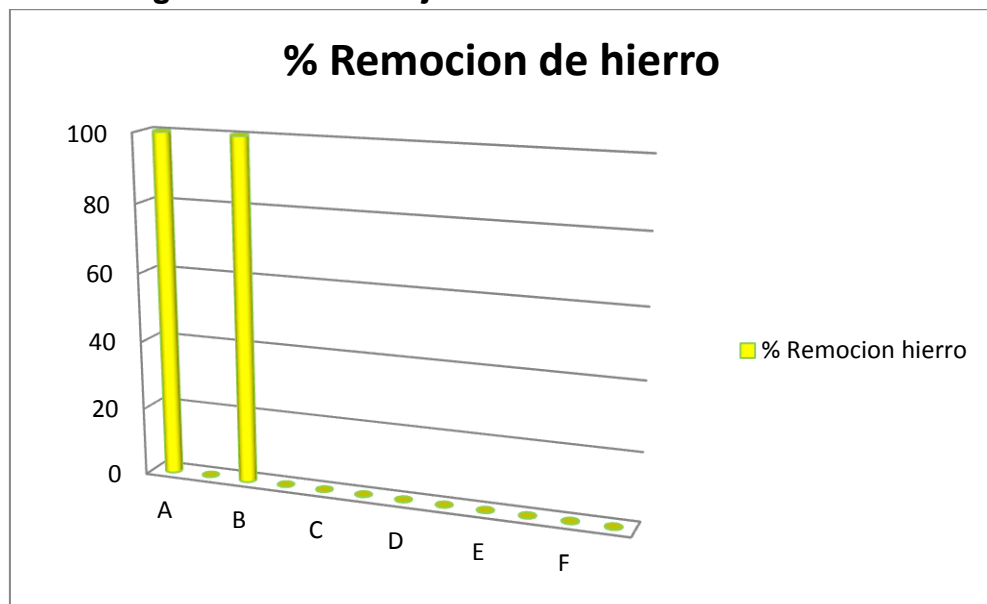


Fuente: Autor

Como se observa en la figura 44, la dosis E, que corresponde a sulfato ferroso más soda caustica la cual no logró remoción alguna de turbiedad, descartando así dicha dosis. En cuanto a las dosis de sulfato de aluminio más soda caustica (A) y sulfato ferroso más cal (F) presentan grandes remociones de turbiedad con valores del 85.95% y 72.38% respectivamente.

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 24 y lo establecido en la resolución 2115/2007 que establece un valor máximo de Hierro de 0.3 mg/L, es posible identificar que las únicas dosis que cumplen con este parámetro son las de sulfato de aluminio con soda caustica o con cal hidratada (A y B), como se ilustra en la figura 44.

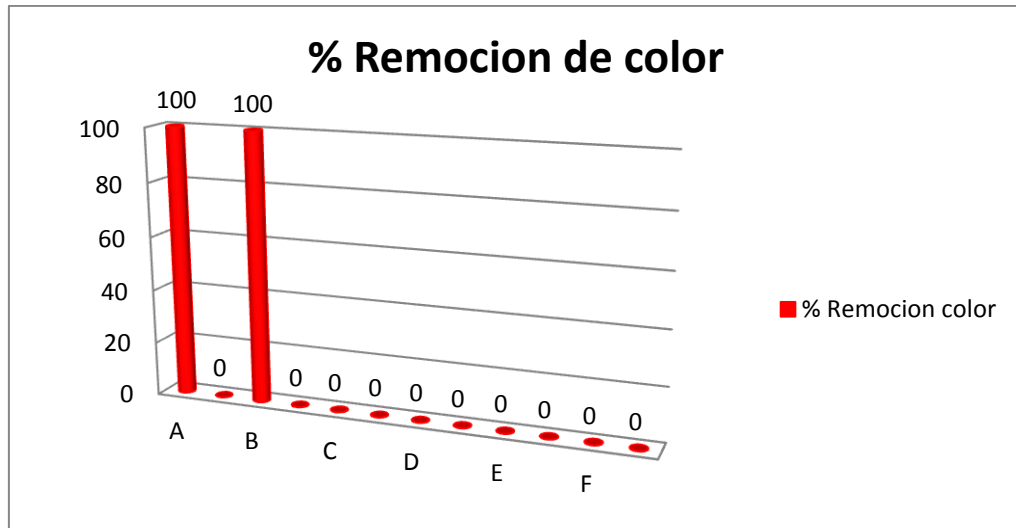
Figura 44. Porcentajes de remoción final de hierro



Fuente: Autor

En cuanto al parámetro de color las dosis que cumplen con el valor establecido son las de sulfato de aluminio con soda caustica o con cal hidratada (A y B), las otras dosificaciones presentaron valores muy altos de color, dado que el valor máximo permitido es de 15 UPC. La figura 45 presenta los porcentajes de remoción de este parámetro.

Figura 45. Porcentajes de remoción final de color



Fuente: Autor

Finalmente es posible identificar que el coagulante que **MEJOR SE COMPORTA** es el sulfato de aluminio. En cuanto a los alcalinizantes usados, tanto la soda caustica como la cal hidratada presentaron un buen desempeño con el coagulante mencionado.

Sin embargo es importante resaltar que el valor en el mercado de la soda caustica es casi tres veces **SUPERIOR AL** valor de la cal hidratada, como se aprecia en la tabla 26. Adicionalmente, hay que destacar que el uso de cal hidratada representa menores riesgos para la salud de quien lo manipula, contrario a lo que sucede en la actualidad con la soda caustica.

En virtud a lo anterior la dosis óptima a aplicar para el proceso de tratamiento del agua estudiada es 40 mg/L de sulfato de aluminio y 15 mg/L de cal hidratada.

Tabla 26. Costo promedio por kilogramo en el mercado de la soda caustica y cal hidratada

ALCALINIZANTE	Costo/Kg
soda caustica	\$ 2,800.00
cal hidratada	\$ 1,000.00

Fuente: Autor

Por otra parte se pudo observar que las dosis óptimas arrojadas en el presente estudio evitarían la dosificación del polímero que se aplica en la actualidad en la PTAP.

Las cantidades que se tendrían que usar bajo las características del agua analizadas en este trabajo y el caudal que opera son alrededor de 11 kg/d de sulfato de aluminio y 4.1 kg/d de cal hidratada.

- **OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Se hace necesario la construcción de otra unidad de floculación y sedimentación, para GARANTIZAR CONTINUIDAD en la prestación del servicio cuando estas SE ENCUENTREN en mantenimiento O FUERA DE SERVICIO. En cuanto a las unidades de filtración es inevitable que operen en paralelo y no en serie como se realiza en la actualidad.

Por otra parte es aconsejable la aplicación del alcalinizante y coagulante en el vertedero de la planta, donde en la actualidad se aplica el polímero, esto para generar la turbulencia REQUERIDA EN la coagulación o mezcla rápida y por ende la distribución uniforme y homogénea en el agua. Igualmente para garantizar que el coagulante también se aplique al agua que proviene de LA fuente alterna (pozo profundo).

Con lo anterior, la unidad que en la actualidad se conoce como cámara de coagulación se convertiría en un tanque de homogenización para el caudal proveniente de las tres fuentes.

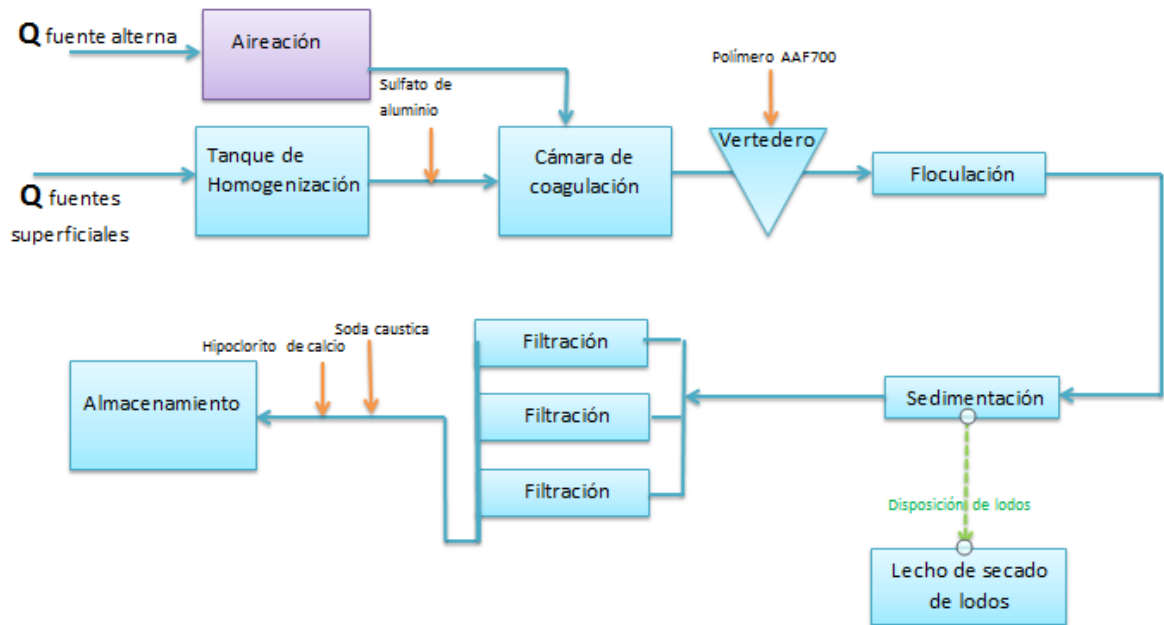
En cuanto al mantenimiento se recomienda que sea al menos 4 veces al año, ya que al ser realizado 2 veces al año dicho mantenimiento no es suficiente, como se observa en las figuras (tabla 18) de LA PTAP.

Mejorar los ensayos de jarras realizados en el laboratorio por el operario para determinar las dosis a usar, porque como se pudo apreciar dicho procedimiento no se realiza de una forma técnica adecuada a pesar de contar con un operario certificado. Pues la mejor forma de obtener altas remociones y de controlar la operación de la planta es mediante un buen desarrollo de los ensayos de tratabilidad.

- **PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO**

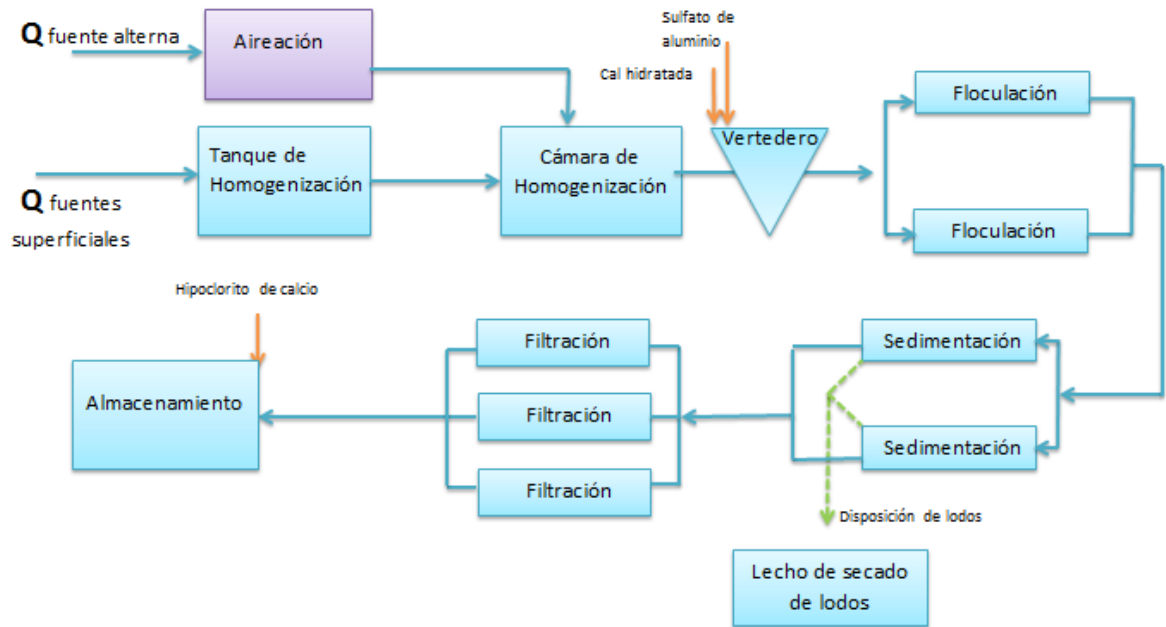
En la figura 11 se observa el diagrama de flujo actual de la planta, mientras la figura 46 presenta la propuesta de optimización de la planta

Figura 11. Diagrama de flujo actual de la planta



Fuente: Autor

Figura 46. Propuesta de operación de la planta de tratamiento



Fuente: Autor

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el presente estudio se observó que el parámetro más crítico a tratar en la PTAP es la turbulencia del agua, relacionada particularmente con la presencia de material suspendido, asociado a una inadecuada dosificación de insumos químicos en la planta.
- En cuanto al proceso de floculación y sedimentación se puede decir que no son los más adecuados, debido al sobredimensionamiento tanto de los canales de floculación como de los módulos de sedimentación respectivamente, e igualmente por la ausencia como mínimo de otra unidad para cada uno de estos procesos que garanticen la continuidad en la prestación del servicio ante posibles fallas o labores de mantenimiento.
- Es aconsejable que las tres unidades de filtración tengan un funcionamiento totalmente independiente para no causar la suspensión en la operación en caso de requerir dejar alguna fuera de servicio. Al ser filtros compactos se presenta la desventaja de que el operador queda incapacitado para observar su operación lo que impide evidenciar la eficiencia del proceso de filtración.
- El deterioro actual de varias de las estructuras da como resultado la falta de mantenimiento que afecta notablemente la eficiencia en la remoción de contaminantes.
- La unidad de aireación no tiene una conexión adecuada que posibilite la aplicación de coagulante al agua una vez pasa por esta unidad. Adicionalmente, en la actual cámara de coagulación no se está generando mezcla rápida, por lo que no se está cumpliendo con su primordial función. Por lo que se considera pertinente que la cámara de coagulación pase a ser en realidad un tanque de homogenización donde se produzca la llegada del agua procedente de las tres fuentes de abastecimiento con que cuenta la PTAP. De tal forma que se aproveche la turbulencia del actual vertedero, para allí realizar la dosificación del coagulante y el alcalinizante necesario.
- Se concluye que la PTAP no es flexible por cuanto no da la posibilidad de alternar la operación con más de una unidad en cada proceso unitario.

- De acuerdo a los ensayos de jarras realizados se concluye que el coagulante que mejores resultados arrojó en la remoción y estabilización de las características del agua evaluadas fue el sulfato de aluminio. Asimismo se comprobó que tanto la cal hidratada como la soda caustica mejoran satisfactoriamente los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

- Finalmente se puede decir que acorde a los resultados obtenidos, se presentan dos alternativas viables de dosificación, por una parte el sulfato de aluminio con una dosis de 30 mg/L acompañado de soda caustica en una dosificación de 12 mg/L; y por otro lado está el sulfato de aluminio con una dosis de 40 mg/L con cal hidratada en una dosificación de 15 mg/L.

- Se recomienda usar como dosificación optima la de 40 mg/L de sulfato de aluminio y 15 mg/L de cal hidratada, dado que en el mercado promedio, la cal presenta un costo económico inferior a la soda caustica (cal: \$1000/kg, soda cáustica: \$2800/kg) y adicionalmente la cal representa menos riesgos adversos para la salud en cuanto a su manipulación. Es decir que para el caudal actual de operación se requieren alrededor de 11 kg/d de este coagulante y 4,1 kg/d del alcalinizante mencionado.

GLOSARIO

Aducción Componente a través del cual se transporta agua cruda, ya sea a flujo libre o a presión.

Aeración Proceso en el que se produce un contacto entre el aire y el agua con el objetivo de oxigenarla o de excluir gases o sustancias volátiles.

Agua potable Agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el Decreto 475 de 1998, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud.

Aireador Dispositivo o equipo que permite transferir aire al agua.

Alcalinidad Capacidad del agua para neutralizar los ácidos. Esta capacidad se origina en el contenido de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), hidróxidos (OH^-) y ocasionalmente boratos, silicatos y fosfatos. La alcalinidad se expresa en miligramos por litro de equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3).

Análisis básicos Es el procedimiento que se efectúa para determinar turbiedad, color aparente, pH, cloro residual libre o residual de desinfectante usado, coliformes totales y Escherichia coli.

Análisis físico-químico del agua Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

Análisis microbiológico del agua Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

Caudal de diseño Caudal estimado con el cual se diseñan los equipos, dispositivos y estructuras de un sistema determinado.

Cloración Aplicación de cloro al agua, generalmente para desinfectar o para oxidar compuestos indeseables.

Coagulación Aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes.

Coagulantes Sustancias químicas que inducen el aglutinamiento de las partículas muy finas, ocasionando la formación de partículas más grandes y pesadas.

Color aparente Es el color que presenta el agua en el momento de su recolección sin haber pasado por un filtro de 0.45 micras.

Concentración Denominase concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene.

Dosificación Acción mediante la cual se suministra una sustancia química al agua.

Dosis óptima Concentración que produce la mayor eficiencia de reacción en un proceso químico.

Filtración Proceso mediante el cual se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso.

Filtración rápida Proceso de filtración a alta velocidad.

Fuente de abastecimiento de agua Depósito o curso de agua superficial o subterráneo, natural o artificial, utilizado en un sistema de suministro de agua.

Lecho de filtración Medio constituido por material granular poroso por el que se hace percolar un flujo.

Lodo Contenido de sólidos en suspensión o disolución que contiene el agua y que se remueve durante los procesos de tratamiento.

Mezcla lenta Agitación suave del agua con los coagulantes, con el fin de favorecer la formación de los flóculos.

Mezcla rápida Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.

Planta de potabilización Conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable.

Potencial de hidrógeno (pH) Expresión de la intensidad de la condición básica o ácida de un líquido.

Prueba de jarras Ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en la planta.

Sedimentación Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes.

Tratamiento o Potabilización Es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla apta para el consumo humano.

Turbiedad Propiedad óptica del agua basada en la medida de luz reflejada por las partículas en suspensión.

Valor aceptable Es el establecido para la concentración de un componente o sustancia, que garantiza que el agua para consumo humano no representa riesgos conocidos a la salud.

BIBLIOGRAFIA

- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá D.C. .
- Castrillon, D., & Giraldo, M. d. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa santana*. Pereira.
- El Tiempo. (25 de enero de 2010). Autoridades buscan al responsable de agregar altas cantidades de cloro al acueducto en Cóbbita. *Diario El Tiempo*.
- Gomez, J., & Salcedo, E. (2008). *Diagnostico de cinco plantas de tratamiento de agua potable del departamento de Boyacá*. Tunja.
- Instituto Nacional de Salud. (2012). *Estado de vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano en Colombia 2007-2011*. Bogotá D.C.
- Lenntech. (2014). *water treatment solutions*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/biblioteca/enfermedades/enfermedades-transmitidas-por-el-agua.htm>
- MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO. (2000). *RAS - 2000*.
- Monroy Puerto, J. R., & Jimenez Chaparro, E. J. (2011). *Diagnostico de las dos plantas de tratamiento de agua potable del municipio de Tuta Boyacá*. Tunja.
- Mozo, W., & Ruiz, J. (2009). *Evaluación plantas de tratamiento de agua potable municipios de Monquirá, Nobsa, Tibasosa, Monguí y Mongua*. Tunja.
- Núñez, A., & Gonzalez, P. (2006). *Evaluación técnica para la optimización hidráulica y física de la planta de tratamiento de agua potable del sector Ucuenga del municipio de Nobsa Boyacá*. Sogamoso.
- Romero Rojas, J. A. (2000). *Purificación del Agua*. Bogotá D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Romero Rojas, J. A. (2005). *Calidad del agua*. Bogotá D.C. : Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Secretaría de Salud. (2012-2013). *Índice de Riesgo de Calidad del Agua*.
- Secretaría de Salud. (2012-2013). *Índice de Riesgo de Calidad del Agua*.

SERFING LTDA. (2010). *Plan Maestro del Acueducto MUNICIPIO DE CÓMBITA*.

ANEXO A: IRCA



INFORME DE ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO
LABORATORIO DE SALUD PÚBLICA DE BOYACA
 Teléfono: 7 420115 Fax: 7 420115 Dirección: CALLE 23 NO. 12 - 74

Código de Laboratorio: 0633 AG-12		Muestra N° 25	
Solicitante: ESE CENTRO DE SALUD DE COMBITA		Telefono: 7310017	Fax:
Dirección solicitante:		Municipio: COMBITA	Departamento: BOYACA
Email solicitante:		Página WEB solicitante:	
Persona prestadora: UNIDAD DE SERVICIOS PÚBLICOS DEL MUNICIPIO DE COMBITA		NIT: 900073492-8	
Lugar del Pto. de toma: COLEGIO INTEGRADO NACIONALIZADO DE		Descripción Pto. Toma: GRUPO DIRECTO DE RED	
Dirección lugar: CALLE 3		GPS: Latitud 5° 38' 9" Norte	Longitud 73° 19' 19" Oeste
Departamento: BOYACA	Municipio: COMBITA	Población: COMBITA	Fuente: NACIMIENTOS: EL MANFARÍO Y LOS TANGUEZOS
Pto. toma concertada: SI	Cod. P.T. concertada: 0303	Pto. toma intradomiciliario: NO	Contramuestra pp: SI
Fecha de Toma: 10/04/2012 9:55		Fecha de Recepción Laboratorio: 10/04/2012 10:55	Fecha Análisis Laboratorio: 10/04/2012
Muestra tomada por: SONIA PATRICIA VARGAS		Desinfectante: HIPOCLORITO DE CALCIO	Coagulante: SULFATO DE ALUMINIO
Análisis Solicitados: Fisicoquímico y Microbiológico		Resultados para: Vigilancia	
		Tipo de muestra: Tratada	

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETRO	Método	Resultado	Unidades	Valores Aceptables	Diagnóstico
Color Aparente	Espectrofotométrico	17.2	UPC	≤ 15	No aceptable
Turbiedad	Nefelométrico	5.10	UNT	≤ 5	No aceptable
pH	Potenciométrico	5.17	Unidades de pH	≥ 6.5 y ≤ 9	No aceptable
Cloro Residual Libre	Colorimétrico de la DPD	8.31	mg de Cl ₂ /L	≥ 0.3 y ≤ 2	No aceptable
Alcalinidad Total	Potenciométrico	1.7	mg de CaCO ₃ /L	≤ 200	Aceptable
Calcio	Volumétrico EDTA	5.4	mg de Ca/L	≤ 50	Aceptable
Fosfatos	Colorimétrico del cloruro estáreo	0.11	mg de PO ₄ -P/L	≤ 0.5	Aceptable
Manganeso			mg de Mn/L	≤ 0.1	
Molibdeno			mg de Mo/L	≤ 0.07	
Magnesio	Calculo	1.1	mg de Mg/L	≤ 35	Aceptable
Zinc			mg de Zn/L	≤ 3	
Dureza Total	Volumétrico EDTA	17.9	mg de CaCO ₃ /L	≤ 300	Aceptable
Sulfatos	Nefelométrico	25.8	mg de SO ₄ ²⁻ /L	≤ 250	Aceptable
Hierro total	Espectrofotométrico	0.12	mg de Fe/L	≤ 0.3	Aceptable
Cloruros	Argentométrico	12.1	mg de Cl ⁻ /L	≤ 250	Aceptable
Nitratos			mg de NO ₃ ⁻ /L	≤ 10	
Nitritos	Espectrofotométrico	0.032	mg de NO ₂ ⁻ /L	≤ 0.1	Aceptable
Aluminio			mg de Al ³⁺ /L	≤ 0.2	
Fluoruros			mg de F ⁻ /L	≤ 1	
COT			mg de COD/L	≤ 5	
Coliformes totales	Sustrato definido	0	UFC/100 cm ³	* = 0	Aceptable
E.coli	Sustrato definido	0	UFC/100 cm ³	* = 0	Aceptable

* Cuando se utilice la técnica de encima sustrato y el resultado es " < 1 microorganismo / 100cm³" o cuando se utilice la técnica Presencia-Ausencia y el resultado es "ausencia en 100cm³" se le asigna el valor de 0 "cero". Si es > 1 o hay presencia el valor es > 0


OTROS PARÁMETROS	Olor: Aceptable
(Según Res. 2115 de 2007):	
OBSERVACIONES: Datos reportados en Acta pH: 5.5 y Cloro: > 3.5.	
NOTA: Según los parámetros analizados la muestra de agua se clasifica en el nivel de riesgo: Alto. Presenta valores para Color, Turbiedad, pH, Cloro Residual que la apartan de los valores aceptables desde el punto de vista Fisicoquímico según la resolución 2115 del 2007 del MPS / MAVDT	
Índice de Riesgo de la Calidad del Agua IRCA	
Parámetros Analizados: 15	IRCA BÁSICO: 42.1 %
	IRCA ESPECIAL: 42.1 %
	Nivel de riesgo: Alto
IRCA Básico: Según Cuadro 6 Art. 13 Res. 2115 de 2007 IRCA Especial: Según Parágrafo Art. 13 Res. 2115	

Coordinador del Laboratorio

Analista - Fisicoquímico

Analista - Microbiológico

Notificación: Copia Archivo
 Impresión Reporte: 10/04/2012

	FORMATO	VERSIÓN: 0
INFORME DE LA CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO DE INTERES PARTICULAR		FECHA:

Código de Laboratorio: 2896 AG-12

INFORMACION: TOMA DE MUESTRA					
Solicitante:	ESE Centro de salud de Combita		Teléfono:	7310017	
Persona Prestadora:	Unidad de Servicios Públicos del Municipio de Combita				
Lugar punto de toma:	Lote de Ana Elvia Díaz		Descripción del punto:	Grifo tanque lavadero	
Dirección lugar:	Vereda La Concepción, parte alta.		Fuente:	Nacimiento El Santuario y Los tanques	
Departamento:	Boyacá		Municipio:	Combita	
Muestra tomada por:	Sonia Patricia Vargas		Punto concertado:	Si Código: 0001	
Fecha de toma:	08/10/2012	Hora:	09:10 a.m.	Fecha recepción Laboratorio:	08/10/2012 Hora: 11.18 am
Fecha de Análisis:	08/10/2012		Análisis Solicitado:	Fisicoquímico y Microbiológico	
Tipo de Muestra:	Tratada	Coagulante:	Sulfato Aluminio	Desinfectante:	Hipoclorito de Calcio

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS					
PARAMETRO	Método	Resultado	Unidades	Valores Aceptables	Diagnóstico
Color aparente	Espectrofotométrico	4,9	UPC	≤ 15	ACEPTABLE
Turbiedad	Nefelométrico	4,27	UTN	≤ 2	NO ACEPTABLE
pH	Potenciométrico	7,13	Unidades de pH	≥ 6,5 y ≤ 9,0	ACEPTABLE
Cloro residual libre	Colorimétrico de la DPD	1,20	mg de Cl ₂ /L	≥ 0,3 y ≤ 2,0	ACEPTABLE
Alcalinidad total	(-)		mg de CaCO ₃ /L	≤ 200	
Calcio	(-)		mg de Ca/L	≤ 60	
Fosfatos	(-)		mg de PO ₄ /L	≤ 0,5	
Magnesio	(-)		mg de Mg/L	≤ 36	
Dureza total	(-)		mg de CaCO ₃ /L	≤ 300	
Sulfatos	(-)		mg de SO ₄ /L	≤ 250	
Hierro total	(-)		mg de Fe/L	≤ 0,3	
Cloruros	(-)		mg de Cl ⁻ /L	≤ 250	
Nitritos	Espectrofotométrico	0,026	mg de NO ₂ ⁻ /L	≤ 0,1	ACEPTABLE
Aluminio	(-)		mg de Al ³⁺ /L	≤ 0,2	
Fluoruros	(-)		mg de F ⁻ /L	≤ 1	
COT	(-)		mg de COT/L	≤ 5	
Coliformes totales	Sustrato Definido	0	NMP/100 cm ³	= 0	ACEPTABLE
E. coli	Sustrato Definido	0	NMP/100 cm ³	= 0	ACEPTABLE

OPINIÓN DEL TÉCNICO: (Según Res. 2115 de 2007) **Olor: Aceptable**

OBSERVACIONES: Datos en Acta pH: 6.5. El dato de cloro corresponde al dato del campo reportado por el técnico.

NOTA: Según los parámetros analizados la muestra de agua se clasifica en el nivel de riesgo: **RIESGO MEDIO**
 Presenta valores para **Turbiedad**
 que lo apartan de los valores aceptables desde el punto de vista Fisicoquímico, según la resolución 2115 de 2007 del MPS/MAVDT.

Índice de Riesgo de la Calidad de Agua (IRCA):			
Parámetros analizados:	7	IRCA (%):	18,6
		Nivel de Riesgo:	RIESGO MEDIO





Laboratorio Departamental de Salud Pública de Boyacá- Calle 23 No. 12 - 74, Tunja Boyacá Telefax 7420115



FORMATO

VERSIÓN: 0

CÓDIGO: SS-G43-F01

INFORME DE LA CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO DE INTERES PARTICULAR

FECHA:

Código de Laboratorio: 4055 AG-12

INFORMACION: TOMA DE MUESTRA

Solicitante:	ESE Centro de Salud	Teléfono:	7310017
Persona Prestadora:	Unidad de Servicios Públicos del Municipio de Cóbbita		
Lugar punto de toma:	Lote de Ana Elvia Diaz	Descripción del punto:	Grifo directo de red
Dirección lugar:	Vereda La Concepción, parte alta.	Fuente:	Nacimiento El Santuario y Los Tanques
Departamento:	Boyacá	Municipio:	Cóbbita
Muestra tomada por:	Sonia Vargas Forero	Punto concertado:	Si Código: 0001
Fecha de toma:	04/12/2012	Hora:	08:55 a.m.
Fecha de recepción Laboratorio:	04/12/2012	Hora:	09:55 a.m.
Fecha de Análisis:	04/12/2012	Análisis Solicitado:	Fisicoquímico y Microbiológico
Tipo de Muestra:	Tratada	Coagulante:	Sulfato aluminio
Desinfectante:	Hipoclorito de Calcio		

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

PARAMETRO	Método	Resultado	Unidades	Valores Aceptables	Diagnóstico
Color aparente	Espectrofotométrico	14,1	UPC	≤ 15	ACEPTABLE
Turbiedad	Nefelométrico	5,34	UTN	≤ 2	NO ACEPTABLE
pH	Potenciométrico	7,5	Unidades de pH	≥ 6,5 y ≤ 9,0	ACEPTABLE
Cloro residual libre	Colorimétrico de la DPD	1,50	mg de Cl ₂ /L	≥ 0,3 y ≤ 2,0	ACEPTABLE
Alcalinidad total	Potenciométrico	8,2	mg de CaCO ₃ /L	≤ 200	ACEPTABLE
Calcio	(-)		mg de Ca/L	≤ 60	
Fosfatos	(-)		mg de PO ₄ /L	≤ 0,5	
Magnesio	(-)		mg de Mg/L	≤ 36	
Dureza total	(-)		mg de CaCO ₃ /L	≤ 300	
Sulfatos	(-)		mg de SO ₄ /L	≤ 250	
Hierro total	(-)		mg de Fe/L	≤ 0,3	
Cloruros	(-)		mg de Cl ⁻ /L	≤ 250	
Nitritos	(-)		mg de NO ₂ ⁻ /L	≤ 0,1	
Aluminio	(-)		mg de Al ³⁺ /L	≤ 0,2	
Fluoruros	(-)		mg de F ⁻ /L	≤ 1	
COT	(-)		mg de COT/L	≤ 5	
Coliformes totales	Sustrato Definido	0	NMP/100 cm ³	= 0	ACEPTABLE
E. coli	Sustrato Definido	0	NMP/100 cm ³	= 0	ACEPTABLE

OTROS PARAMETROS:
(Según Res. 2115 de 2007)

Olor: Aceptable

OBSERVACIONES: El dato de pH y cloro corresponde al dato del campo reportado por el técnico.

NOTA: Según los parámetros analizados la muestra de agua se clasifica en el nivel de riesgo: RIESGO MEDIO

Presenta valores para Turbiedad que lo apartan de los valores aceptables desde el punto de vista Fisicoquímico, según la resolución 2115 de 2007 del MPS/MAVDT.

Índice de Riesgo de la Calidad de Agua (IRCA):

Parámetros analizados:	7	IRCA (%):	19,1	Nivel de riesgo:	RIESGO MEDIO
------------------------	---	-----------	------	------------------	--------------

Lider del Laboratorio

Analista Fisicoquímico

Analista Microbiológico

Laboratorio Departamental de Salud Pública de Boyacá- Calle 23 No. 12 - 74, Tunja Boyacá. Telefax: 7420115

Nota: En los espacios de la columna del Método que tienen el símbolo (-), No se analizaron los parámetros correspondientes



FORMATO	VERSIÓN: 0
	CÓDIGO: SS-G43-F02
INFORME DE ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO	FECHA: 19/Feb/2013

IT:	Nombre: - UNIDAD DE SERVICIOS PUBLICOS DEL MUNICIPIO DE COMBITA
-----	---

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Muestra No: 66	Código laboratorio: 0561 AG-13	Contramuestra pp: No
Fecha de toma: 09/04/2013	Fecha de recepción laboratorio: 09/04/2013	Fecha análisis laboratorio: 09/04/2013
Muestra tomada por: DIANA MIREYA GONZÁLEZ MORENO	Desinfectante: HIPOCLORITO DE CALCIO	Coagulante: SULFATO DE ALUMINIO
Análisis Solicitados: Fisicoquímico, Microbiológico	Resultados para: Vigilancia	Tipo de muestra: Tratada

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

Código: 146	Nombre: LABORATORIO DE SALUD PUBLICA DE BOYACA	Teléfono: 7 420115
Fax: 7 420115	Dirección: CALLE 23 NO. 12 - 74	Email:
Página WEB:		

INFORMACIÓN SOLICITANTE

Nombre: ESE CENTRO DE SALUD DE COMBITA	Departamento: Boyacá	Municipio: Combita
Dirección: CARRERA 5 No 1-80	Teléfono: 7310017	Fax: 50
Email: saludcombita@hotmail.es	Página WEB: 50	

INFORMACIÓN DEL PUNTO DE TOMA

Departamento: Boyacá	Municipio: Combita	Población: 0,00	Clase: Cabecera Municipal
Lugar: JUNTO A LA PARED DE ALCALDIA MUNICIPAL,	Descripción: -GRIFO DIRECTO DE RED. CODIGO: 0002		Código punto: 2
Dirección: CARRERA 6 ESQUINA DE COLISEO	GPS: 5 37 58 Norte 73 19 20 Oeste		Fuente: -NACIMIENTO EL SANTUARIO Y LOS TANQUES
Concertado: Si	Intradomiciliar: No		

ANÁLISIS FISIQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Característica	Método	Resultado	Unidades	Valores Aceptables	Diagnostico
Cloro residual libre	Colorimétrico de la DPD	1,00	mg Cl ₂ /L	>=0,3000<= 2,0000	Aceptable
Cloruros	Argentométrico	5,70	mg Cl - /L	>=0,0000<= 250,0000	Aceptable
Coliformes totales	Sustrato definido	0,00	UFC/100 cm3	>=0,0000<= 0,0000	Aceptable
Color aparente	Espectrofotométrico	1,80	UPC	>=0,0000<= 15,0000	Aceptable
E.coli	Sustrato definido	0,00	UFC/100 cm3	>=0,0000<= 0,0000	Aceptable
Hierro total	Espectrofotométrico	0,05	mg Fe/L	>=0,0000<= 0,3000	Aceptable
ph	Potenciométrico	6,50	Unidades de PH	>=6,5000<= 9,0000	Aceptable
Turbiedad	Nefelométrico	3,05	UNT	>=0,0000<= 2,0000	No Aceptable

* Cuando se utilice la técnica de análisis sustrato y el resultado es "<1 microorganismo / 100cm3" o cuando se utilice la técnica Presencia-Ausencia y el resultado es "ausencia en 100cm3" se le asigna el valor de 0 "cero". Si se >1 o hay presencia el valor es >0

ANÁLISIS ESPECIALES

ND: No Data

Las unidades de reporte para la Característica de Coliformes Totales y E. coli es NMP/100 cm³

Página 1 de 2

ANEXO B: ENCUESTA REALIZADA AL OPERARIO

 <p>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA T U N J A <i>Experiencia y Calidad</i></p>		Proyecto: Diagnóstico y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Combita Boyacá
NOMBRE	Jose Faustino Ruiz Garcia	
TIEMPO EN EL CARGO	7 años	
FECHA	14/01/2014	

- ¿Qué procesos maneja la planta?

Rta: Coagulación, floculación, sedimentación, filtración, y desinfección

- ¿Qué químicos usa en cada proceso?

Rta: en coagulación sulfato de aluminio, en floculación polímero AAF700, luego de filtración se aplica soda caustica e hipoclorito de calcio antes de ser almacenada.

- Usa elementos de protección personal? ¿cuáles?

Rta: Botas, casco, guantes, delantal y bata

- ¿Cómo determina la dosificación de químicos en la planta?

Rta: por los ensayos de jarras

- ¿Qué dosis maneja en los ensayos de jarras de sulfato de aluminio y soda caustica?

Rta: para el sulfato de aluminio y la soda caustica se aplican de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 de cada uno en cada jarra.

- ¿Qué concentración usa para preparar las dosificaciones?

Rta: Solucion del 1%

- ¿Qué parámetros mide en los ensayos?

Rta: turbiedad, color, hierro y pH

- ¿Qué tiempo y a cuantas revoluciones realiza la mezcla rápida en el ensayo?

Rta: tiempo: 2 minutos a 50 RPM

- ¿Qué tiempo y a cuantas revoluciones realiza la mezcla lenta en el ensayo?

Rta: un tiempo de 5 minutos a 50 RPM

- ¿Qué tiempo de sedimentación maneja en el ensayo?

Rta: 5 minutos

- ¿Realiza filtración al agua sedimentada y que parámetros mide al agua filtrada?

Rta: si se realiza filtración y nuevamente es medido turbiedad, color, hierro y pH

- ¿Qué cantidad aplica diariamente de sulfato de aluminio en la planta?

Rta: se aplica 4.10 Kg de sulfato de aluminio en 18 horas

- ¿Qué cantidad aplica diariamente de soda caustica en la planta?

Rta: entre 130 y 140 gr de soda caustica para 18 horas

- ¿Qué cantidad aplica diariamente de hipoclorito en la planta?

Rta: de 200 a 250 gr en 18 horas

- ¿Qué cantidad aplica diariamente del polímero AAF700?

Rta: 140 gr para 22 horas

- ¿Cómo y con qué regularidad realiza el mantenimiento a la unidad de coagulación?

Rta: se realiza cada dos días a través de los filtros de lavado con que cuenta la unidad.

- ¿Cómo y con qué regularidad realiza el mantenimiento a la unidad de aireación?

Rta: No es regular ya que no está en funcionamiento

- ¿Qué material tiene en la actualidad la unidad de aireación?

Rta: No tiene porque el que estaba cumplió su vida útil y dado que no se está usando la unidad no se le ha aplicado el carbón de coque.

- ¿Cómo y con qué regularidad realiza el mantenimiento a la unidad de floculación?

Rta: cada dos días por medio de filtros de lavado que tiene la unidad.

- ¿Cómo y con qué regularidad realiza el mantenimiento a las unidad de filtración?

Rta: todos los días se realiza lavado a los filtros a través de presión de mediante flujo ascendente con agua tratada.

- ¿Cómo y con qué regularidad realiza el mantenimiento a la unidad de cloración y almacenamiento?

Rta: Este procedimiento se realiza cada 6 meses, con una solución de hipoclorito de calcio, se ingresa al tanque y es limpiado manualmente.

- ¿Dónde disponen los lodos y mas o menos que cantidad generan?

Rta: Los lodos son llevados a un lecho de secado pero es muy poco luego se lleva a campo abierto donde se usa como abono.

- ¿Qué unidades producen lodos?

Rta: Solo el sedimentador

- ¿cuenta con algún tipo de capacitación?

Rta: Si la secretaria de salud organiza las capacitaciones, estas son anuales y las realiza el SENA, no solo para operación de la planta sino además para seguridad industrial y salud ocupacional.

ANEXO C: CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO

1. PROYECCIÓN DE POBLACIÓN:

1.1. POBLACIÓN:

Tabla 1A. Censos del municipio de Combita

años	población
1964	940
1973	320
1985	498
1993	438
2005	828

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

2. NIVEL DE COMPLEJIDAD

Teniendo en cuenta la TABLA A.3.1 del RAS 2000, para la población del municipio de Combita de 828 habitantes el nivel de complejidad del sistema es Bajo, como se observa en la tabla 2^a

Tabla 2A. Nivel de complejidad del sistema

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (habitantes)	Capacidad economía de los usuarios
Bajo	< 2500	Baja
Medio	2501 a 12500	Baja
Medio Alto	12501 a 60000	Media
Alto	> 60000	Alta

Fuente: RAS 2000, título A

De acuerdo con la tabla la tabla 3A para el nivel de complejidad nivel e del municipio, se determinaron los métodos de cálculo de proyección de la población.

Tabla 3A. Métodos de cálculo de proyección de la población

Método por emplear	Nivel de complejidad			
	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
aritmético, geométrico y exponencial	x	x		
aritmético + geométrico + exponencial + otros			x	x
por componentes (demográfico)			x	x
detallar por zonas y detallar densidades			x	x

Fuente: RAS2000, título B

3. ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN:

3.1. MÉTODO ARITMÉTICO

$$ka = \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci}$$

$$Pf = Puc + Ka(Tf - Tuc)$$

Ka= pendiente de la recta

Puc= población del último censo

Pci= población censo inicial

Tuc= tiempo último censo

Tci= tiempo censo inicial

Tf= año a proyectar la población

Tabla 4A. Proyección de población método aritmético

TCI	K	2010	2014	2020	2025	2032
1964	-2,60	820	810	794	781	763
1973	14,94	873	933	1022	1097	1202
1985	15,00	873	933	1023	1098	1203
1993	27,86	912	1023	1190	1329	1524
promedio		869	925	1007	1076	1173

Fuente: Autor

3.2. MÉTODO GEOMÉTRICO

$$r = \left[\frac{Puc}{Pci} \right]^{\frac{1}{Tcu-Tci}} - 1$$

$$Pf = Puc[1 + r]^{Tf-Tuc}$$

R= tasa de crecimiento anual

Tabla 5A. Proyección de población método geométrico

TCI	R	2010	2014	2020	2025	2032
1964	-0,00294	821	811	797	785	769
1973	0,02835	900	1007	1191	1370	1666
1985	0,02337	887	973	1118	1255	1476
1993	0,04653	949	1138	1496	1878	2582
PROMEDIO		889	982	1150	1322	1623

Fuente: Autor

3.3. MÉTODO EXPONENCIAL

$$k = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$$

$$Pf = Pci * e^{k*(Tf-Tci)}$$

K= tasa de crecimiento de la población

Tca= año censo anterior

Tcp= año censo posterior

Tabla 6A. Proyección de población método exponencial

TCI	k	2010	2014	2020	2025	2032
1964	-0,1197	491	464	426	397	360
1973	0,0369	190	179	165	154	139
1985	-0,0160	350	331	304	283	256
1993	0,0425	345	326	299	279	253
PROMEDIO	-0,0141	344	325	299	278	252

Fuente: Autor

4. RESULTADOS:

Tabla 7A. Promedio proyección de población por cada método

Método	Año				
	2010	2014	2020	2025	2032
Método aritmético	854	906	985	1050	1142
Método geométrico	866	950	1101	1253	1516
Método exponencial	344	325	299	278	252
PROMEDIO	688	727	795	861	970

Fuente: Autor

5. DOTACIÓN

En la tabla 8A de acuerdo con el nivel de complejidad se determinó la dotación neta

Tabla 8A. Dotación neta mínima para el municipio

Nivel de complejidad del sistema	Dotación neta mínima (L/hab*día)	Dotación neta máxima (L/hab*día)
Bajo	100	150
Medio	120	175
Medio Alto	130	-
Alto	150	-

Fuente: RAS2000, título B

5.1. DOTACIÓN BRUTA

$$D_{Bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \%p}$$

$$\%P = Pa + Pptap + Pc + Pt$$

%P: porcentaje de pérdidas

Pa: pérdidas en la aducción, (inferior al 5%)

Pptap: Necesidades de la planta de tratamiento (3% -5%)

Pc: pérdidas de conducción (inferior al 5%)

Pt: pérdidas técnicas en el sistema de acueducto tabla 9A

Tabla 9A. Porcentaje de pérdidas admisibles

Nivel de complejidad del sistema	Porcentaje máximo admisible de pérdidas técnicas para el cálculo de dotación bruta
Bajo	40%
Medio	30%
Medio Alto	25%
Alto	20%

Fuente: RAS 2000 título B

$$\%P = 25\%$$

6. DEMANDA

- **Caudal medio diario (Qmd)**

$$Qmd = \frac{P * D_{Bruta}}{86400}$$

- **Caudal máximo diario (QMD)**

$$QMD = Qmd * k_1$$

Coeficiente de consumo máximo diario - k1 en la tabla 10A

Tabla 10A. Coeficiente de consumo máximo diario - k1, según nivel de complejidad del sistema

Nivel de complejidad del sistema	Coeficiente de consumo máximo diario – k1
Bajo	1.3
Medio	1.3
Medio Alto	1.2
Alto	1.2

Fuente: RAS2000 título B

- **Caudal máximo horario (QMH)**

$$QMH = QMD * k_2$$

Coeficiente de consumo máximo horario - k2 en la tabla 11A

Tabla 11A. Coeficiente de consumo máximo horario, k2, según el Nivel de Complejidad del Sistema

Nivel de complejidad del sistema	Red menor de distribución	Red secundaria	Red matriz
Bajo	1.60	-	-
Medio	1.60	1.50	-
Medio Alto	1.50	1.45	1.40
Alto	1.50	1.45	1.40

Fuente: RAS 2000 Titulo B

7. RESULTADOS

7.1. CONSUMOS

CONSUMO							
AÑO	POBLACIÓN	INCREMENTO	INCREMENTO %	NETO	PERDIDA	TOTAL	ADOPTADO
2010	688			196	25	261	265
		5,71	0,57				
2014	727			197	25	263	265
		9,29	0,93				
2020	795			199	25	265	265
		8,26	0,83				
2025	861			201	25	268	270
		12,71	1,27				
2032	970			203	25	271	275

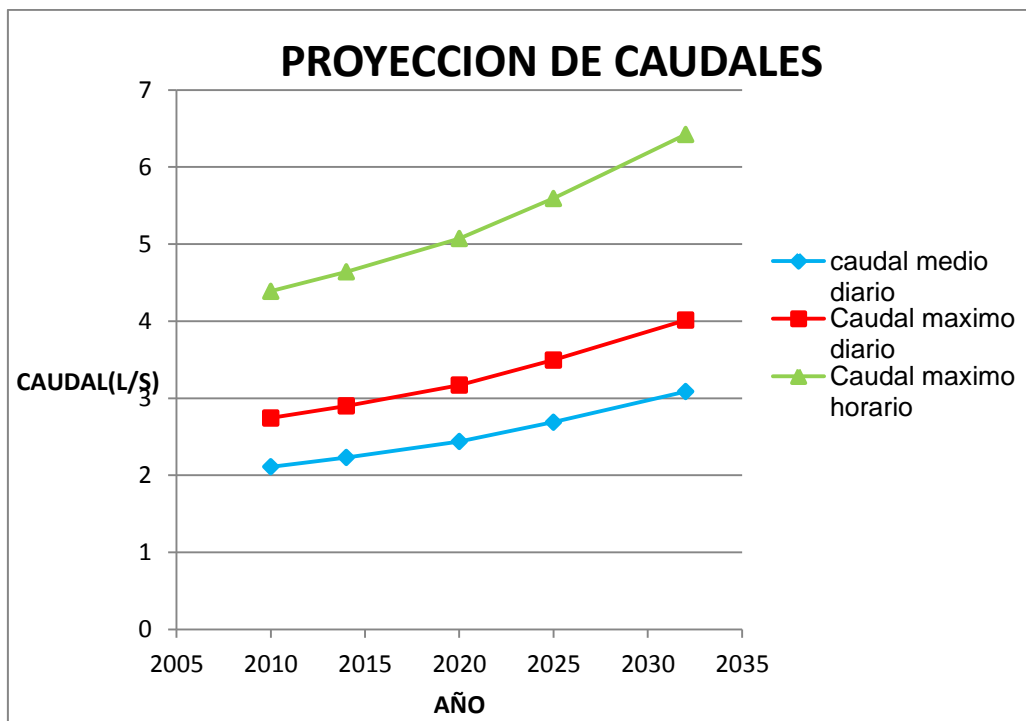
FUENTE: Autor

7.2. CAUDAL DE DISEÑO:

CAUDALES							
AÑO	POBLACION	CONSUMO	Qmd	K1	QMD	K2	QMH
2010	688	265	2,110	1,3	2,74	1,6	4,39
2014	727	265	2,231	1,3	2,90	1,6	4,64
2020	795	265	2,438	1,3	3,17	1,6	5,07
2025	861	270	2,689	1,3	3,50	1,6	5,59
2032	970	275	3,087	1,3	4,01	1,6	6,42

FUENTE: Autor

Figura 1A. Proyección de caudales para la población urbana del municipio de Combita



FUENTE: Autor

El caudal de diseño a estimar será el correspondiente al caudal máximo diario para el año 2014.

Caudal de diseño: 2.85 L/s

ANEXO D: CAUDAL DE OPERACIÓN


1. DETERMINACIÓN DE LA CAUDAL OPERACIÓN

Los datos del caudal de operación por facilidades de medición son obtenidos en el vertedero previo a la unidad de floculación, punto donde convergen los caudales provenientes de las tres fuentes de abastecimiento, estos datos arrojan caudales entre 2.75 L/s y 3.6 L/s, para el presente estudio se determinó el caudal de operación como el promedio del caudal mínimo y máximo registrado.

Caudal de operación: 3.18 L/s


ANEXO E: ENSAYOS DE JARRAS

Tabla 1E. Ensayo con Sulfato de Aluminio

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS <small>PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA</small> <i>Experiencia y Calidad</i>		<h1>Sulfato de Aluminio</h1>			
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2 UNT				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis (mg/L)	20	30	40	50	
Formacion del Floc (min)	25	25	13	25	
clasificacion del floc	0	0	0	0	
Agua Sedimentada	Temperatura	15,6	15,4	16,3	16,2
	Turbiedad UNT	1,49	1,4	1,36	3,36
	Color aparente	0	0	0	5
	pH	5,98	6,04	5,86	5,82
	Conductividad (mS)	31,9	41,8	51	59,9
	Hierro mg/L	0,1	0	0,1	0,8
	SDT mg/L	19,1	25,1	30,8	36,2
	mL Lodo	0,1	0,2	0,25	0,1
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	0,66	0,66	0,24	1,43
	Color verdadero	0	0	0	0
	pH	6,02	6,03	5,8	5,76
	Conductividad (mS)	34	43,7	53,7	60
	Hierro mg/L	0,1	0	0,1	0,8
	SDT mg/L	20,5	26,3	32,2	36,9


Fuente: Autor

Tabla 2E. Ensayo con Sulfato de Aluminio más soda Caustica

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					
Sulfato de Aluminio + Soda Caustica					
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis sulfato de aluminio (mg/L)	30	30	40	40	
Dosis Soda Caustica (mg/L)	12	16	16	20	
Formacion del Floc (min)	10	20	15	16	
clasificacion del floc	2	2	2	2	
Agua Sedimentada	Temperatura	15,1	15	15,1	15
	Turbiedad UNT	0,59	2,43	2,8	2,27
	Color aparente	0	0	0	0
	pH	7,65	8,14	7,9	8,22
	Conductividad (mS)	51,7	68,7	72	79,4
	Hierro mg/L	0	0	0	0
	SDT mg/L	31	41,2	43,2	47,6
	mL Lodo	0,2	0,4	0,8	0,1
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	0,332	1,46	0,15	1,8
	Color verdadero	0	0	0	0
	pH	7,57	8,07	7,85	8,07
	Conductividad (mS)	57,1	70,3	74,1	84,6
	Hierro mg/L	0	0	0	0
	SDT mg/L	34,2	42,2	44,4	50,8


Fuente: Autor

Tabla 3E. Ensayo con Sulfato de Aluminio más Cal

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					
Sulfato de Aluminio + Cal					
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis sulfato de aluminio (mg/L)	30	30	40	40	
Dosis Cal (mg/L)	10	15	15	20	
Formacion del Floc (min)	15	17	15	17	
clasificacion del floc	2	2	2	2	
Agua Sedimentada	Temperatura	15,5	15,4	15,4	15,3
	Turbiedad UNT	1,6	2,28	3,34	2,21
	Color aparente	0	0	0	0
	pH	6,14	6,51	6,62	6,14
	Conductividad (mS)	40,2	41,9	54,7	51,3
	Hierro mg/L	0,1	0	0,1	0
	SDT mg/L	24,2	25,1	32,8	30,8
	mL Lodo	0,1	0,1	0,1	0,1
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	1,05	1,62	0,24	1,26
	Color verdadero	0	0	0	0
	pH	6,2	6,55	6,68	6,15
	Conductividad (mS)	46,4	49,6	64,7	61,5
	Hierro mg/L	0,1	0	0	0
	SDT mg/L	27,7	29,8	38,9	36,9


Fuente: Autor

Tabla 4E. Ensayo con Cloruro Férrico

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS <small>PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA</small> <i>Experiencia y Calidad</i>		Cloruro Ferrico			
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2 UNT				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis (mg/L)	10	20	30	40	
Formación del Floc (min)	10	8	8	8	
clasificación del floc	0	0	0	0	
Agua Sedimentada	Temperatura	16,4	16	15,7	15,8
	Turbiedad UNT	2,18	2,77	3,13	1,94
	Color aparente	40	70	100	100
	pH	5,88	5,23	5,06	4,98
	Conductividad (mS)	23,4	60,8	101	129,2
	Hierro mg/L	1,2	3	3	3
	SDT mg/L	14,01	40,4	64,2	79,9
	mL Lodo	0,1	0,2	0,2	0,2
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	0,83	0,82	0,89	1,21
	Color verdadero	30	70	100	100
	pH	6,06	5,36	5,11	5,05
	Conductividad (mS)	20,5	59,6	96,3	128,7
	Hierro mg/L	1,2	3	3	3
	SDT mg/L	12,7	37,4	57	79


Fuente: Autor

Tabla 5E. Ensayo con Cloruro Férrico más Soda Caustica

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER EL SANTO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA Experiencia y Calidad					
Cloruro Ferrico + Soda Caustica					
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad					
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis Cloruro Ferrico (mg/L)	5	5	10	10	
Dosis Soda Caustica (mg/L)	4	6	7	9	
Formacion del Floc (min)	25	24	20	17	
clasificacion del floc	2	2	2	2	
Agua Sedimentada	Temperatura	14,9	14,8	14,8	14,5
	Turbiedad UNT	2,23	2,6	2,54	2,37
	Color aparente	30	30	30	40
	pH	7,96	8,56	8,38	8,63
	Conductividad (mS)	28,3	37,3	36,4	42,9
	Hierro mg/L	2	2	2	2
	SDT mg/L	16,98	22,4	22	25,7
	mL Lodo	0,1	0,1	0,2	0,1
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	1,43	1,48	1,3	1,64
	Color verdadero	20	20	20	40
	pH	8,06	8,48	8,44	8,44
	Conductividad (mS)	33,4	41,5	39,6	45,9
	Hierro mg/L	2	2	2	2
	SDT mg/L	20	24,9	23,7	27,6


Fuente: Autor

Tabla 6E. Ensayo con Cloruro Férrico más Cal

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					
Cloruro Ferrico + Cal					
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis Cloruro Ferrico (mg/L)	5	5	10	10	
Dosis Cal (mg/L)	4	6	7	9	
Formacion del Floc (min)	20	15	25	25	
clasificacion del floc	0	4	0	0	
Agua Sedimentada	Temperatura	14,3	14,9	15,2	15,1
	Turbiedad UNT	2,02	1	1,62	2,25
	Color aparente	30	10	30	40
	pH	6,98	7,25	6,77	7,17
	Conductividad (mS)	44,6	21,1	20,9	24,6
	Hierro mg/L	2	0,8	0,8	2
	SDT mg/L	26,6	12,56	12,53	14,83
	mL Lodo	0,1	0,8	0,1	0,1
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	1,18	0,25	0,88	0,22
	Color verdadero	10	10	20	30
	pH	7,1	7,3	7,02	7,2
	Conductividad (mS)	21,3	28,3	24,8	31,2
	Hierro mg/L	1,2	0,8	0,8	2
	SDT mg/L	12,9	17,1	15	18,8


Fuente: Autor

Tabla 7E. Ensayo con Sulfato Ferroso

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					<h1>Sulfato Ferroso</h1>			
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)							
T	15° C							
Turbiedad	4,2							
Color	5							
pH	7,21							
Conductividad	11,6 nS							
Hierro	0,3 mg/L							
SDT	6,62 mg/L							
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt				
Coagulación	270	1	704,84	42292,217				
Floculación	40	25	40,94	61423,894				
CONDICIÓN	JARRA							
	1	2	3	4				
Dosis (mg/L)	20	30	40	50				
Formación del Floc	25	25	25	25				
clasificación del floc	0	0	0	0				
Agua Sedimentada	Temperatura	15	15,2	15	14,7			
	Turbiedad UNT	6,65	6,66	8,82	15,25			
	Color aparente	10	10	5	5			
	pH	6,39	6,31	6,37	6,31			
	Conductividad (mS)	36,1	49,9	64,2	75,6			
	Hierro mg/L	3	3	3	3			
	SDT mg/L	21,7	30,2	38,5	45,3			
	mL Lodo	0,1	0,1	0,2	0,2			
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	1,22	1,37	1,94	3,66			
	Color verdadero	5	5	5	5			
	pH	6,51	6,38	6,32	6,31			
	Conductividad (mS)	40,7	58,9	72,2	83,7			
	Hierro mg/L	3	3	3	3			
	SDT mg/L	24,4	35,4	43,3	50,1			


Fuente: Autor

Tabla 8E. Ensayo con Sulfato Ferroso más Soda Caustica

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					
Sulfato Ferroso + Soda Caustica					
Fuente	Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)				
T	15° C				
Turbiedad	4,2				
Color	5				
pH	7,21				
Conductividad	11,6 nS				
Hierro	0,3 mg/L				
SDT	6,62 mg/L				
	RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt	
Coagulación	270	1	704,84	42292,21653	
Floculación	40	25	40,94	61423,89386	
CONDICIÓN	JARRA				
	1	2	3	4	
Dosis sulfato Ferroso (mg/L)	30	30	40	40	
Dosis Soda Caustica (mg/L)	17	20	23	26	
Formacion del Floc (min)	10	4	3	3	
clasificacion del floc	0	4	0	0	
Agua Sedimentada	Temperatura	14,7	14,6	14,6	14,5
	Turbiedad UNT	15,11	10,06	6,08	7,43
	Color aparente	150	150	100	150
	pH	8,77	8,98	8,09	9,16
	Conductividad (mS)	77,2	93,5	93,4	112,8
	Hierro mg/L	3	3	3	3
	SDT mg/L	46,4	56,1	56	87,7
	mL Lodo	0,2	0,4	2,4	0,5
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	10,94	4,11	3,49	4,04
	Color verdadero	150	100	70	100
	pH	8,72	8,71	8,45	8,91
	Conductividad (mS)	79	91,9	97,8	110,9
	Hierro mg/L	3	3	3	3
	SDT mg/L	47,4	55,2	58,7	66,6

Fuente: Autor

Tabla 9E. Ensayo con Sulfato Ferroso más Cal

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA <i>Experiencia y Calidad</i>					
Sulfato Ferroso + Cal					
Fuente		Tanque de homogenización (El Santuario y Los Tanques)			
T		15° C			
Turbiedad		4,2			
Color		5			
pH		7,21			
Conductividad		11,6 nS			
Hierro		0,3 mg/L			
SDT		6,62 mg/L			
		RPM	TIEMPO (min)	G (S ⁻¹)	Gt
Coagulación		270	1	704,84	42292,21653
Floculación		40	25	40,94	61423,89386
CONDICIÓN		JARRA			
		1	2	3	4
Dosis sulfato Ferroso (mg/L)		30	30	40	40
Dosis Cal (mg/L)		16	20	20	24
Formacion del Floc (min)		5	4	4	3
clasificacion del floc		6	6	6	6
Agua Sedimentada	Temperatura	15,4	15,4	15,4	15,2
	Turbiedad UNT	1,16	3,12	2,86	4,73
	Color aparente	40	50	40	30
	pH	6,68	7,01	6,8	6,93
	Conductividad (mS)	53,5	58,1	69,3	72,8
	Hierro mg/L	3	5	5	3
	SDT mg/L	32,1	34,9	41,4	43,6
	mL Lodo	6	10	12	15
Agua Filtrada	Turbiedad UNT	0,21	0,39	0,34	0,14
	Color verdadero	0	0	0	0
	pH	6,76	6,97	6,8	6,77
	Conductividad (mS)	56,4	61,9	72,7	74,6
	Hierro mg/L	3	3	5	3
	SDT mg/L	35,1	37,2	43,7	44,9

Fuente: Autor