

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN DEL
RECURSO HÍDRICO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE VEOLIA
AGUAS DE TUNJA.

YENCY DAYANA SÁENZ VARGAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

DIVISIÓN DE ARQUITECTURAS E INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA – BOYACÁ

2025

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN
DEL RECURSO HÍDRICO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE
VEOLIA AGUAS DE TUNJA.

YENCY DAYANA SÁENZ VARGAS

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PASANTÍA PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

DIRECTOR

ING. ALEXANDER SAAVEDRA PULIDO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

DIVISIÓN DE ARQUITECTURAS E INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA-BOYACÁ

2025

DEDICATORIA

A Dios, a quien debo cada paso, cada fuerza en los momentos de debilidad y cada victoria en medio de la adversidad, gracias, señor por sostenerme cuando sentí desfallecer, por abrir caminos donde no los había y por llenar mi vida de propósito, sin ti, nada de esto habría sido posible.

A mi madre, bendición inmensa en mi vida, mujer de fe, valentía y entrega, gracias por tus oraciones, tus palabras de aliento, por ser mi guía en cada instante y por mostrarme con tu ejemplo el verdadero significado del amor incondicional.

Y a mí misma, por no perder la fe, por levantarme una y otra vez confiando en los planes de Dios y por haber creído que, con él, todo se puede. Este logro no solo marca el final de una etapa, sino también el testimonio de que los sueños puestos en manos de Dios se cumplen en su tiempo perfecto.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, fuente de toda sabiduría, fortaleza y esperanza, gracias por tu compañía y el ánimo que me diste para enfrentar cada dificultad, todo lo que soy y lo que he logrado te lo debo a ti.

A mi madre, Blanca Saenz Vargas, luz en mis días oscuros y fuerza en mis momentos de flaqueza, gracias por caminar a mi lado con amor valiente, por tus consejos sabios y por creer firmemente en mí capacidad de alcanzar cada meta, este logro también es tuyo.

Igualmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Santo Tomas por brindarme la formación académica y profesional que ha sido fundamental en mi desarrollo.

A mis docentes, y director de trabajo de grado quienes con su conocimiento, orientación y exigencia me han guiado a lo largo de esta etapa, les extiendo mi admiración y gratitud.

A Veolia Aguas de Tunja, donde realice mi pasantía, agradezco la oportunidad de aplicar y expandir mis conocimientos en el campo de la ingeniería, así como el apoyo y confianza que recibí por parte de la jefe Yenny Garavito y equipo de producción de la (PTAP).

Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros que fueron de gran importancia y ayuda en este camino y a todas aquellas personas que fueron partícipes para culminar este logro.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDO	5
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE ILUSTRACIONES	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	12
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
MARCO REFERENCIAL.....	13
Marco contextual:	13
Contexto de la compañía:.....	13
Localización:.....	13
Estructura organizacional.....	14
Área de desempeño:	15
Marco teórico	17
Marco conceptual.....	20
Marco legal	25
DESARROLLO DE LA PASANTIA	27
Metodología	27
Metodología fase 1:.....	28

Metodología fase 2:.....	30
Fase 1: Se identificaron las fuentes de datos actuales relacionadas con los parámetros de calidad del agua.	31
Metodología fase 3:.....	33
RESULTADOS	35
Estudio de viabilidad para implementación del sistema de generación en sitio de hipoclorito de sodio	35
Diseño de sistema de gestión y monitoreo de la calidad del agua con base de datos y visualización dinámica por alertas.	43
Proyecto “el reto” reto 1: Elaboración de un plan de seguridad del agua.....	51
Proyecto “el reto” reto 2: Estudio de diseño básico de tratamiento para una ETAP	65
ACTIVIDADES DE APOYO EN LA PTAP	67
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS.....	73
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Costos operativos actuales</i>	37
Tabla 2. <i>Costos operativos de los sistemas propuestos por cada empresa</i>	39
Tabla 3. <i>Costos operativos de los sistemas propuestos por cada empresa</i>	39
Tabla 4. <i>Flujos de caja proyectados</i>	42
Tabla 6. <i>Registro de datos de informe mensual de calidad de la red</i>	43
Tabla 7. <i>Base de datos, muestreo de calidad del agua</i>	45
Tabla 8. <i>Peligros biológicos</i>	53
Tabla 9. <i>Peligros Químicos</i>	53
Tabla 10. <i>Peligros físicos</i>	54
Tabla 11. <i>Criterios para la cuantificación del riesgo</i>	55
Tabla 12. <i>Escala de puntuación para clasificación del riesgo</i>	55
Tabla 13. <i>Cuantificación del riesgo</i>	56
Tabla 14. <i>Medidas preventivas</i>	58
Tabla 15. <i>Clasificación de medidas preventivas.</i>	61
Tabla 16. <i>Plan APPCC para los puntos críticos de control</i>	63

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. <i>Ubicación espacial (PTAP) Veolia Aguas de Tunja S.A.E.S.P.</i>	14
Ilustración 2. <i>Estructura organizacional Veolia Aguas de Tunja S.A.E.S.P.</i>	15
Ilustración 3. <i>Veolia Aguas de Tunja Sede PTAP</i>	17
Ilustración 4. <i>Flujograma proceso de potabilización en la (PTAP)</i>	24
Ilustración 5. <i>Estructura metodológica de la fase 1</i>	29
Ilustración 6. <i>Estructura metodológica de la fase 2</i>	31
Ilustración 7. <i>Estructura metodológica de la fase 3</i>	33
Ilustración 8. <i>Evidencia fotográfica de reuniones presenciales</i>	36
Ilustración 9 <i>Panel de control para la visualización de parámetros de calidad del agua</i>	46
Ilustración 10. <i>Panel de control con alertas de parámetros fuera de norma</i>	47
Ilustración 11. <i>Ilustración parámetros in situ de calidad en la red de distribución</i>	49
Ilustración 12. <i>Monitoreo y seguimiento del sulfato de aluminio</i>	50

RESUMEN

Este trabajo de pasantía tiene como resultado mejorar procedimientos técnicos y operativos en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Veolia Aguas de Tunja, mediante la evaluación de alternativas tecnológicas que mejoren la eficiencia, la seguridad y el control de la calidad del recurso hídrico. Actualmente, la planta utiliza cloro gaseoso como desinfectante, un método efectivo pero que implica riesgos significativos en cuanto al manejo, transporte y seguridad operativa. Por ello, se plantea evaluar la viabilidad técnica, económica y normativa de implementar un sistema de generación in situ de hipoclorito de sodio, que se ha consolidado en otros países como una solución más segura, sostenible y autónoma para el proceso de desinfección.

También se contempla dentro del proyecto el diseño de un sistema de monitoreo digital con una base de datos optimizada y visualización dinámica, que permita el seguimiento en tiempo real de los parámetros críticos de calidad del agua, la generación de alertas automáticas y el soporte en la toma de decisiones técnicas. Esta herramienta tecnológica no solo busca fortalecer el control operativo de la PTAP, sino también reducir los tiempos de respuesta ante desviaciones y facilitar la trazabilidad de la información.

Además, se abordarán casos problema en la gestión del recurso hídrico con el fin de identificar problemáticas asociadas al tratamiento, distribución y control de la calidad del agua, a partir de este análisis se formularán soluciones técnicas adaptadas al contexto, que puedan ser replicables en otras regiones con condiciones similares, esta propuesta responde a la necesidad de fortalecer la gestión integral del agua potable en Tunja, mejorando la seguridad sanitaria, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia operativa, en consonancia con los principios de salud pública y desarrollo sostenible.

INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene como objetivo evaluar alternativas técnicas y operativas que contribuyan al fortalecimiento de la gestión del recurso hídrico en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Veolia Aguas de Tunja. En particular, se enfoca en analizar la viabilidad de implementar un sistema de generación in situ de hipoclorito de sodio como sustituto del uso de cloro gaseoso, así como en diseñar una herramienta digital para el monitoreo y análisis en tiempo real de la calidad del agua tratada. Estas iniciativas responden a la necesidad de optimizar la eficiencia operativa, mejorar la seguridad en el proceso de desinfección y reforzar la trazabilidad de la información técnica en la planta.

La metodología empleada se basó en la revisión documental de normas técnicas vigentes, análisis de literatura científica nacional e internacional, contacto con proveedores especializados, estudio comparativo de tecnologías de desinfección y construcción de prototipos digitales de monitoreo. Adicionalmente, se analizaron experiencias referenciales y estudios técnicos que permiten anticipar posibles escenarios críticos relacionados con la desinfección del agua y la calidad del recurso hídrico. Estos casos, aunque no se han presentado directamente en la PTAP de Veolia Tunja, fueron seleccionados como ejemplos hipotéticos que orientan la formulación de respuestas técnicas y operativas ante eventuales situaciones similares que puedan surgir en el contexto local.

Esta información se organizó en tres fases principales: La viabilidad de implementar un sistema de generación de hipoclorito in situ, un dashboard de monitoreo digital con alertas y revisión de casos problema en la gestión del recurso hídrico para proponer soluciones replicables. Cada bloque se estructuró con base en los objetivos específicos del proyecto y se acompaña de datos comparativos, fichas técnicas, referencias normativas y análisis técnico-operativo.

Entre las principales conclusiones se resalta que la generación in situ de hipoclorito representa una alternativa más segura y sostenible frente al cloro gaseoso, permitiendo mayor control sobre el proceso de desinfección y reduciendo riesgos operativos. Asimismo, se identificó que la incorporación de un sistema de monitoreo en tiempo real con base de datos optimizada puede facilitar la toma de decisiones técnicas.

Este informe se inscribe en el marco de los lineamientos normativos nacionales para la calidad del agua para consumo humano (Resolución 2115 de 2007, Decreto 1575 de 2007 y RAS 2017), así como en las recomendaciones internacionales de la OMS para la gestión integral de los sistemas de potabilización, el proyecto no solo busca plantear soluciones técnicas a nivel operativo, sino también aportar a la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia de la PTAP de Veolia Tunja frente a los retos actuales, tales como el cambio climático, la gestión segura de sustancias químicas y la necesidad de optimizar el uso de los recursos. Con ello, el trabajo pretende consolidarse como un aporte académico y práctico para la innovación en el tratamiento de agua potable, el fortalecimiento de la seguridad hídrica y la promoción de una gestión ambiental sostenible en el contexto regional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudio de la gestión del recurso hídrico en Veolia Aguas de Tunja mediante la evaluación de alternativas tecnológicas para la desinfección, el diseño de herramientas digitales para el monitoreo de la calidad del agua y el análisis de soluciones técnicas aplicadas a casos problema de tratamiento y distribución.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar la viabilidad a largo plazo de un sistema de generación de hipoclorito en sitio para la PTAP Veolia Aguas de Tunja, evaluando equipos, costos y cumplimiento normativo.

Diseñar un sistema de gestión y monitoreo de la calidad del agua con una base de datos optimizada y visualización dinámica para análisis y alertas por alteraciones.

Abordar casos problema en la gestión del recurso hídrico para proponer soluciones técnicas, enfocadas en el tratamiento, distribución y control de la calidad del agua.

MARCO REFERENCIAL

Marco contextual:

Contexto de la compañía:

Veolia, compañía multinacional francesa, enfoca sus actividades en tres pilares medioambientales: la administración del agua, el tratamiento de los residuos sólidos y la energía. (Veolia, S.f) Con presencia global, Veolia juega un papel importante en el acceso, la conservación y la recuperación de los recursos naturales, siendo un líder mundial. Brinda una amplia variedad de soluciones para el diseño, construcción, operación, mantenimiento y mejora de sistemas e infraestructuras para el tratamiento del agua.

En este contexto, la práctica tuvo lugar en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) gestionada por Veolia Aguas de Tunja S. A. E. S. P., empresa de servicios públicos que se dedica al cuidado y la gestión integral del recurso hídrico en Tunja. (veolia Aguas de Tunja , S.f) Veolia es la responsable de tratar y suministrar agua potable a la población urbana y algunas áreas rurales, asegurando la disponibilidad, constancia y calidad del servicio que ofrece.

Localización:

La estación de purificación hídrica está localizada en la zona sur de Tunja, capital del departamento de Boyacá. Su ubicación geográfica exacta se encuentra en las coordenadas 5.52382 de latitud y -73.37359 de longitud, específicamente en la intersección de la Calle 5 con Carrera 18, en el sector alto del barrio Libertador.

Ilustración 1.

Ubicación espacial (PTAP) Veolia Aguas de Tunja S.A.E.S.P.



Fuente: Google earth

Adaptado por el autor ArcGis Pro

Estructura organizacional

La estructura organizacional de Veolia Aguas de Tunja se encuentra encabezada por la asamblea de accionistas, la junta directiva y la gerencia general. (Veolia, S.f) Luego, se divide en cinco áreas principales: la gerencia administrativa y financiera, la gerencia comercial, la gerencia de operaciones, la gerencia de planeación y construcciones, y la gerencia de proyectos, la (Ilustración 2) muestra gráficamente como se organiza la empresa, y este esquema nos ayuda a entender cómo se reparten y se coordinan las tareas, las responsabilidades y los rangos de mando dentro de la compañía.

Ilustración 2.

Estructura organizacional Veolia Aguas de Tunja S.A.E.S.P.



Fuente: Adapto a partir de la Matriz VT-RH-MT-02 Version 01 Veolia Tunja.

Como se observa en la ilustración (Ilustración 2) el área de gerencia de operaciones se encuentra constituida por otras 5 áreas específicas que son: acueducto, mantenimiento, alcantarillado, planta de agua residual (PTAR) y producción (PTAP); siendo esta última área donde realice mi pasantía.

Área de desempeño:

El área de producción tiene como objetivos principales planificar, coordinar y controlar las actividades relacionadas con el tratamiento y la operación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP). Su propósito es transformar el agua captada, modificando sus características fisicoquímicas y bacteriológicas para hacerla apta para el consumo humano.

Durante el proceso de producción, el agua se somete a diversas etapas de tratamiento, entre las que se incluyen: aireación, dosificación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y estabilización del pH, actualmente, el proceso de desinfección se realiza mediante la inyección de cloro gaseoso, una tecnología efectiva pero con altos riesgos operativos y logísticos como resultado, se obtiene agua potable que cumple con los parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007, lista para su almacenamiento y distribución.

En este escenario, la pasantía se centró en evaluar alternativas de desinfección más seguras y sostenibles, como la generación in situ de hipoclorito de sodio, y en diseñar herramientas digitales de monitoreo para optimizar la vigilancia y el control de la calidad del agua tratada, de manera complementaria, se llevan a cabo actividades de registro y seguimiento mediante el diligenciamiento de indicadores (KPI's) y estadísticas obtenidas de las muestras diarias tomadas. De igual forma, se generan reportes de resultados y evaluaciones que permiten valorar el rendimiento de los procedimientos de tratamiento y facilitar la toma de resoluciones. Asimismo, se elaboran informes de resultados y análisis que permiten evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento y facilitar la toma de decisiones.

En este contexto se enmarca el desarrollo de la pasantía, ya que las actividades asignadas por la empresa están directamente relacionadas con la gestión de estos procesos. Cabe mencionar que la práctica se realizó en la sede de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP, ver Ilustración 3), perteneciente al área de producción de la empresa. Esta área cuenta con cuatro sedes: la PTAP, Tanque Oriente, Tanque Centro y la estación de Bombeo La Fuente, cada una con un papel esencial en el proceso de potabilización, distribución y control del agua en la ciudad de Tunja.

Ilustración 3.

Veolia Aguas de Tunja Sede PTAP



Fuente: Autor, 2025. Fotografía tomada en Veolia Aguas de Tunja sede PTAP

Marco teórico

Mantener el agua que bebemos en condiciones óptimas es vital para la salud de todos, y para lograrlo, necesitamos tratamientos y supervisiones rigurosas. Las estaciones de tratamiento de agua potable son cruciales para convertir el agua sin tratar en agua segura para beber, gracias a fases que suprimen elementos dañinos físicos, químicos y también orgánicos. La eficiencia de una PTAP depende no solo de los procesos aplicados, sino también del control continuo sobre las variables críticas de calidad del agua, como el cloro residual libre, la turbiedad, el pH y la presencia de coliformes.

Autores como (Tovar y otros, 2024) en estudios recientes han demostrado que la generación in situ de hipoclorito de sodio se posiciona como una alternativa tecnológica clave para el tratamiento de agua potable, gracias a sus ventajas en seguridad, eficiencia operativa y sostenibilidad. Además de un sistema automatizado de dosificación y monitoreo del hipoclorito producido electroquímicamente a partir de salmuera utilizando controladores Arduino, sensores

potenciostáticos y una interfaz HMI programada en MATLAB permite una producción eficiente y una dosificación precisa del desinfectante, minimizando riesgos de sobre o subcloración, a diferencia del uso de cloro gaseoso o soluciones comerciales, esta alternativa asegura niveles adecuados de cloro residual libre en el agua.

Asimismo, el uso de plataformas digitales con sensores inteligentes y visualización dinámica permite anticipar desviaciones en tiempo real y tomar decisiones informadas, el estudio de (Durgun, 2024) propone un sistema innovador de observación en tiempo real de las características del agua, basado en sensores espectroscópicos AS7265x integrados con inteligencia artificial, esta tecnología permite detectar contaminantes como *E. coli* y analizar la efectividad de la desinfección por radiación UV mediante algoritmos de aprendizaje automático, logrando una clasificación precisa del estado del agua (contaminada, limpia o desinfectada). Su uso en instalaciones destinadas al tratamiento de agua para consumo humano ofrece un control automatizado, sensible y no invasivo, lo que representa un avance clave hacia sistemas de vigilancia inteligente, con gran potencial para entornos urbanos y regionales donde se requiere monitoreo continuo y adaptativo.

La buena calidad del agua es clave para proteger la salud humana, conservar el medio ambiente y fomentar un desarrollo sostenible, y se analiza a través de indicadores físicos, químicos y biológicos según estándares como los de la OMS. (Baeza Gomez, 2016) sin embargo, factores como el crecimiento poblacional, la actividad industrial y agrícola, y el cambio climático han acelerado su deterioro, generando impactos sanitarios, económicos y ecológicos. El caso de Chile evidencia una realidad común en muchos países: la falta de redes de monitoreo y de datos confiables limita una gestión efectiva del recurso. Esto resalta la necesidad de contar con sistemas

integrales de vigilancia, gestión preventiva y acceso a información técnica para orientar decisiones en torno a la calidad del agua.

En Colombia, uno de los casos más relevantes en la implementación de tecnologías de generación in situ, la aplicación de sustancias desinfectantes en plantas de agua potable corresponde al desarrollado por EMCALI en las plantas Río Cali y La Rivera. (Alcaldía de Santiago de Cali , 2024) mediante sistemas electroquímicos que usan salmuera, se produce hipoclorito de sodio en sitio, evitando el manejo de químicos peligrosos. Esto ha mejorado la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del proceso, y demuestra su potencial de replicabilidad en otras regiones del país.

Veolia, en Francia, ha implementado con éxito la tecnología de generación in situ de hipoclorito de sodio mediante electrólisis con su sistema OSG Hydrex®, especialmente en torres de enfriamiento industriales. (Veolia, s.f.) esta solución mejora la seguridad al eliminar el manejo de productos químicos peligrosos, reduce la corrosión de equipos y permite un control más preciso de la desinfección. Además, cumple con las normativas ambientales europeas al disminuir la formación de subproductos nocivos. Su fácil instalación, bajo mantenimiento y eficiencia operativa la consolidan como una alternativa sostenible y replicable para el tratamiento de agua en contextos industriales.

La evaluación integral de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento es fundamental para identificar riesgos sanitarios y proponer mejoras en la gestión del recurso. (Nieto Cañarte y otros, 2024), un estudio realizado en el cantón Valencia, Ecuador, combinó análisis físico-químicos y normativos con herramientas estadísticas como el Índice de Calidad del Agua (ICA), permitiendo clasificar el agua como de excelente calidad en fase de captación y proponer un plan estratégico para su mejora, esta experiencia demuestra la importancia de abordar el suministro de agua desde

un enfoque técnico y preventivo, aplicable también a contextos rurales con deficiencias en infraestructura como en Boyacá.

Marco conceptual

Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP): Instalación diseñada para captar agua de fuentes superficiales o subterráneas y transformarla en apta para el consumo humano mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Las PTAP garantizan la remoción de sólidos, materia orgánica, microorganismos patógenos y contaminantes químicos, cumpliendo con los parámetros de calidad establecidos por la normativa vigente. (Acciona, S.f)

Cloro gaseoso: Compuesto químico ampliamente utilizado como desinfectante en plantas de tratamiento de agua potable. Aunque es altamente eficaz para eliminar bacterias, virus y otros patógenos, implica riesgos significativos en su transporte, almacenamiento y manipulación, debido a su toxicidad y capacidad corrosiva. Su manejo requiere estrictas medidas de seguridad industrial. (PQP, S.f.)

Hipoclorito de sodio: Desinfectante que se puede obtener comercialmente en solución líquida o generarse en sitio mediante electrólisis de salmuera. Presenta ventajas frente al cloro gaseoso, ya que elimina riesgos asociados a su transporte y almacenamiento, permite una dosificación más segura y puede producirse de manera continua en la propia planta. (ATSDR, 2016)

Generación in situ: Producción de una sustancia química (como el hipoclorito de sodio) directamente en el lugar de uso, sin necesidad de transporte ni almacenamiento de sustancias peligrosas. En el contexto de las PTAP, esta tecnología mejora la seguridad operativa y la autonomía de la planta. (Carbotecnia, 2023)

Monitoreo en tiempo real: Conjunto de herramientas y sistemas que permiten medir, registrar y visualizar continuamente parámetros críticos del proceso de tratamiento de agua, como turbidez, pH, cloro residual o caudales. Su finalidad es detectar desviaciones de manera inmediata, generar alertas y facilitar una respuesta rápida ante fallas o variaciones en la calidad. (Meter, S.f.)

Dashboard: Plataforma digital interactiva que integra bases de datos y visualizaciones dinámicas (gráficas, tablas, alertas) para facilitar el análisis de información y la toma de decisiones. (Kyocera, S.f.) En el ámbito de las PTAP, permite al personal técnico evaluar en tiempo real el comportamiento de los parámetros de calidad del agua.

Trazabilidad: Capacidad de rastrear el historial y ubicación de un proceso o producto, registrando las etapas por las que ha pasado. En el tratamiento de agua, asegura que cada medición, ajuste de parámetros y evento relevante quede documentado para su análisis y verificación.

Parámetros fisicoquímicos del agua: Son características medibles que determinan la calidad del agua. Incluyen turbidez, pH, temperatura, color aparente y verdadero, conductividad, sólidos totales disueltos y cloro residual, entre otros. Su monitoreo es clave para cumplir con la normativa de potabilización. (Aconsa, S.f.)

Parámetros microbiológicos del agua: Variables relacionadas con la presencia de microorganismos patógenos o indicadores de contaminación fecal, como coliformes totales y *Escherichia coli*. De acuerdo con (ALazor, S.f.) Estos parámetros son fundamentales para garantizar la inocuidad del agua y proteger la salud pública. Tales criterios resultan esenciales para asegurar que el agua sea segura y garantizar las condiciones sanitarias adecuadas.

Eficiencia operativa: Grado en que un proceso logra resultados óptimos utilizando de forma adecuada los recursos disponibles (tiempo, materiales, costos, personal). En las PTAP,

implica lograr la potabilización cumpliendo estándares de calidad con el menor consumo de insumos y energía posible. (Ecopetrol, 2025)

Indicadores de gestión (KPI): Variables cuantitativas que permiten evaluar el desempeño de procesos y actividades. En las PTAP, los KPI incluyen parámetros como consumo de reactivos, caudales tratados, eficiencia en la remoción de turbidez, cumplimiento normativo y continuidad del servicio.

Coagulación y floculación: Procesos iniciales del tratamiento de agua en los que se agregan coagulantes químicos (como sulfato de aluminio) para desestabilizar las partículas en suspensión. Luego, mediante agitación lenta, se forman agregados (flóculos) que facilitan la sedimentación de impurezas. (Acciona, S.f)

Desinfección: Etapa final del tratamiento de agua que consiste en la aplicación de agentes químicos (como cloro o hipoclorito) o físicos (como radiación ultravioleta) para eliminar microorganismos patógenos y garantizar que el agua sea segura para el consumo humano. (Acciona, S.f)

Plan de Seguridad del Agua (PSA): Según la (Organización Mundial de la Salud , 2011) Herramienta preventiva recomendada para garantizar la inocuidad del agua desde la fuente hasta el consumidor final. Consiste en identificar peligros y riesgos, establecer medidas de control, verificar su eficacia y definir planes de gestión y mejora continua, en el caso de la PTAP de Veolia Aguas de Tunja, su implementación permitiría integrar la generación in situ de hipoclorito y el monitoreo digital como estrategias de control de calidad y reducción de riesgos en la desinfección y distribución.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE TUNJA

La PTAP de Tunja fue construida inicialmente por el Instituto de Fomento Municipal (Insfopal) e inició operaciones en 1968, con una capacidad de diseño de 450 l/s, utilizando aguas captadas del embalse de Teatinos a través de un proceso convencional de coagulación, sedimentación, filtración y aireación. En 1985 y 1990 se realizaron ampliaciones que incorporaron nuevas estructuras como sedimentadores y torre de aireación. En 1996, la concesión pasó a manos de la empresa Seraqua S.A., miembro del grupo europeo FCC, que posteriormente evolucionó a Proactiva Aguas de Tunja y finalmente adoptó la denominación Veolia Aguas de Tunja desde 2018, consolidando su operación de servicios integrales de acueducto y saneamiento en la ciudad. Esta planta permitió, por primera vez, un suministro continuo y eficiente de agua potable a los ciudadanos de Tunja tras décadas de escasez. (VEOLIA, S.f)

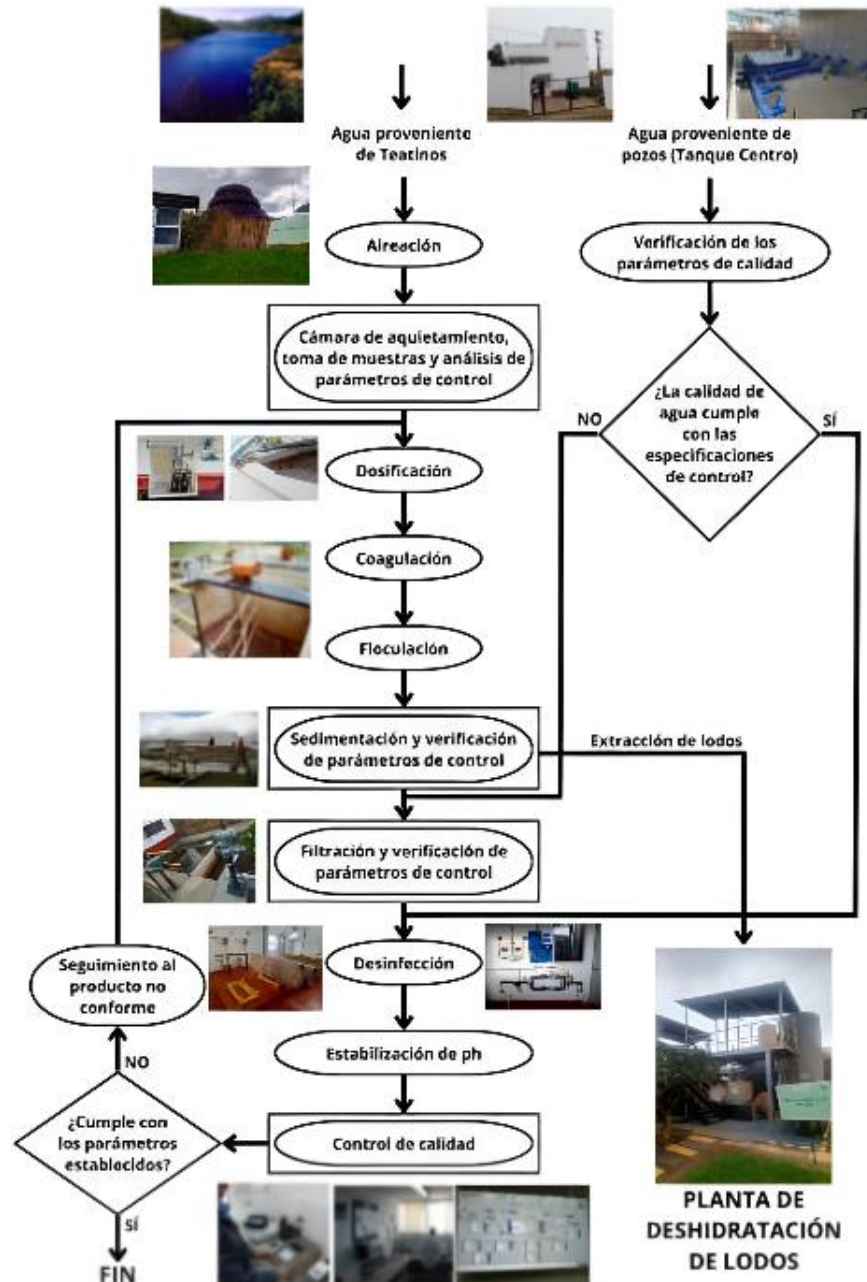
El sistema de tratamiento corresponde a un proceso convencional diseñado para manejar un caudal de hasta 450 litros por segundo. El agua proviene directamente de la represa de Teatinos e ingresa por la torre de aireación. A continuación, se mide el caudal a través de una canaleta Parshall, donde también se lleva a cabo la adición de productos químicos como cal y sulfato de aluminio. Este flujo es dirigido a tres floculadores mediante canales de aproximación, y luego pasa por dos sedimentadores en los que se produce la decantación del floculo. (VEOLIA, S.f)

Una vez completado este tratamiento, el agua se dirige por canales hacia la etapa de filtración. La (Ilustración 4) muestra de forma clara como se lleva a cabo el proceso en la planta de tratamiento de Tunja, esta sección está compuesta por un falso fondo, capas de grava de diferentes tamaños, arena y antracita, el líquido ya filtrado se almacena en el tanque de aguas claras, donde se ajusta el pH y se realiza la desinfección, por último, el agua es conducida a través

de válvulas hacia los distintos tanques de almacenamiento, desde donde se distribuye a la ciudad de Tunja. (VEOLIA, S.f).

Ilustración 4.

Flujograma proceso de potabilización en la (PTAP)



Fuente: Adaptado del flujograma de proceso de potabilización Veolia Aguas de Tunja.

Marco legal

La gestión del recurso hídrico y la operación de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en Colombia se encuentra regulada por un conjunto de leyes, decretos y resoluciones que establecen los parámetros técnicos, sanitarios y operativos para garantizar el acceso a agua segura como derecho fundamental. Estas normas definen los requisitos para el diseño, construcción, operación, control de calidad y vigilancia de los sistemas de abastecimiento, así como las responsabilidades de las empresas prestadoras de servicios públicos en la prestación continua y eficiente del servicio. A continuación, se presentan las principales disposiciones legales aplicables en la gestión del recurso hídrico y sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano.

Resolución 2115 de 2007: la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) operada por Veolia Aguas de Tunja aplica de forma rigurosa los lineamientos establecidos en la (Resolución 2115 de 2007), la cual define los parámetros de calidad exigidos para el agua destinada al consumo humano en Colombia. Esta normativa establece límites máximos permisibles para variables microbiológicas como (*Escherichia coli* y coliformes totales), fisicoquímicas (turbiedad, pH, color, sólidos totales, entre otros) y químicas específicas (metales pesados, nitratos, cloro residual libre), lo que exige un sistema de tratamiento robusto, confiable y permanentemente monitoreado. En el caso de Tunja, donde el agua cruda proviene de fuentes superficiales de alta vulnerabilidad, la planta ha llevado a cabo procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección optimizados para cumplir con estos requisitos.

Decreto 1575 de 2007:

El Decreto 1575 de 2007 establece el sistema de vigilancia y aseguramiento de la calidad del agua destinada al consumo humano. Su objetivo es garantizar que el agua que llega a la población cumpla con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para proteger la salud pública. Además, define las responsabilidades de los prestadores del servicio de acueducto, las autoridades ambientales y sanitarias en cuanto a las actividades de control y seguimiento de la calidad del recurso hídrico, así como las acciones correctivas en caso de incumplimientos con los estándares establecidos. (Ministerio de la Protección Social, 2007)

Resolución 330 de 2017: Es el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, establece los parámetros técnicos y los requisitos mínimos que deben cumplir los sistemas de tratamiento de agua para asegurar su funcionalidad, sostenibilidad y eficiencia, adaptándose a las condiciones particulares de cada territorio, incluyendo zonas con limitaciones técnicas o económicas. (Resolución 330 de 2017) En Colombia, las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) son infraestructuras clave para garantizar el acceso seguro y continuo al agua como derecho fundamental, especialmente en contextos rurales y periurbanos.

Resolución 622 de 2020: La Resolución 622 del año 2020, expedida por el Ministerio de Salud, define pautas esenciales para la supervisión de la calidad del agua para consumo humano, así como para la inspección y el control de salubridad de las redes de suministro. Esta regulación tiene como objetivo reforzar los criterios técnicos y de sanidad en las plantas de tratamiento de agua potable, impulsando una supervisión más rigurosa de su operación, además instituciones como la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios desempeñan roles cruciales dentro del enfoque técnico y práctico para asegurar la pureza del agua suministrada. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020)

Ley 142 de 1994: Colombia cuenta con reglas generales para los servicios básicos en los hogares, como el agua potable, el sistema de alcantarillado y la limpieza, asegurando que todos tengan acceso continuo a estos servicios, y estableciendo claramente qué deben hacer tanto el gobierno como las empresas que los brindan. (Colombia, Congreso de la República de, 1994)

Decreto 1076 de 2015:

Conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y desarrollo sostenible, consolida la normativa ambiental vigente en Colombia, estipula lineamientos en la gestión ambiental, el uso responsable de los recursos naturales, y licenciamientos ambientales, permisos consultas sobre el uso de agua y vertimientos, también compete el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible como autoridad principal del Sistema Nacional Ambiental (SINA) y autoridades ambientales regionales, determina el marco legal sobre el control y aprovechamiento del recurso hídrico, bajo criterios normativos y de estricto cumplimiento. (Decreto 1076 de 2015)

DESARROLLO DE LA PASANTIA

Metodología

El desarrollo de la pasantía se orientó principalmente a actividades administrativas y de apoyo técnico que contribuyeron al cumplimiento de los objetivos del proyecto. Estas labores incluyeron la recopilación, organización y análisis de información técnica relacionada con los procesos de tratamiento de agua en la PTAP de Veolia Aguas de Tunja, así como la gestión documental para la evaluación de alternativas tecnológicas de desinfección. Se participó en la elaboración de bases de datos y reportes que servirán como soporte para el diseño de herramientas digitales de monitoreo de la calidad del agua, facilitando la visualización dinámica y la generación

de alertas. Además, se realizó la sistematización de información relevante para el análisis de la viabilidad de un sistema de generación de hipoclorito en sitio y la propuesta de soluciones técnicas ante escenarios hipotéticos de gestión del recurso hídrico. Estas actividades permitieron aportar al fortalecimiento de la gestión administrativa y técnica del área de producción, en coherencia con los objetivos planteados en la pasantía.

Metodología fase 1:

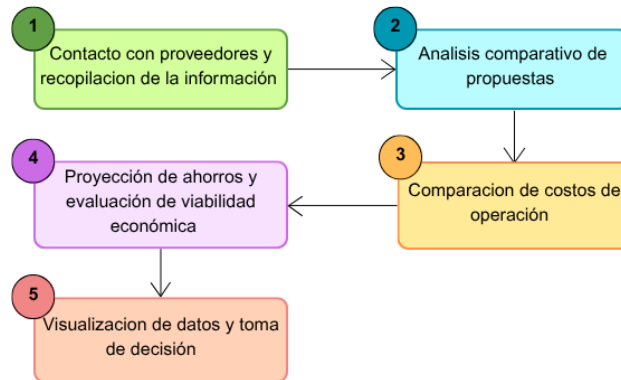
Analizar la viabilidad a largo plazo de un sistema de generación de hipoclorito en sitio para Veolia Aguas de Tunja, evaluando equipos, costos y cumplimiento normativo.

Este proyecto surgió como una alternativa para optimizar el proceso de desinfección del agua en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Veolia Aguas de Tunja. En la actualidad, la desinfección se realiza mediante la inyección de cloro gaseoso, un método efectivo pero que implica riesgos significativos por el transporte, almacenamiento y manipulación de este insumo químico. La implementación de un sistema de generación in situ de hipoclorito de sodio busca disminuir la dependencia del cloro gaseoso, reduciendo los riesgos operativos y de seguridad asociados a su manejo. Además, se pretende automatizar la dosificación del desinfectante, logrando un control más preciso y eficiente del proceso de potabilización y garantizando el cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos en la normativa vigente.

El desarrollo de este proyecto siguió la estructura metodológica que se muestra en la (Ilustración 5).

Ilustración 5.

Estructura metodológica de la fase 1



Fuente: Elaboración propia, a partir de actividades desarrolladas

Fase 1: Contacto con proveedores y recopilación de información

El primer paso consistió en contactar a tres empresas proveedoras especializadas en la instalación de sistemas de generación in situ de hipoclorito de sodio. Se realizaron reuniones virtuales y presenciales con cada una de ellas para conocer sus propuestas, características técnicas, costos de inversión y requerimientos operativos del sistema.

Fase 2 análisis comparativo de propuestas:

Con la información recolectada a partir del contacto con proveedores y la revisión de especificaciones técnicas de los equipos, se elaboró un cuadro comparativo de ventajas y desventajas para cada alternativa tecnológica de generación in situ de hipoclorito de sodio. En este análisis se evaluaron criterios fundamentales como la eficiencia del sistema, los costos de instalación, operación y mantenimiento, el consumo energético, los requerimientos de insumos, el

cumplimiento normativo y la facilidad de operación. Este ejercicio permitió contar con una herramienta objetiva para valorar la viabilidad técnica, económica y operativa de cada propuesta.

Fase 3 comparación de costos de operación:

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo de los costos de operación de cada sistema propuesto en relación con la situación actual de la Planta de tratamiento de agua potable (PTAP) es decir, sin la implementación de un sistema de generación en sitio. Esto permitió identificar el impacto económico de cada alternativa.

Fase 4 proyección de ahorros y evaluación de viabilidad económica:

Se realizó una proyección financiera que permitió estimar los ahorros potenciales que se generarían con la implementación de cada propuesta en comparación con la operación actual. Esta fase fue clave para determinar la viabilidad económica del proyecto y su rentabilidad en el tiempo.

Fase 5 visualización de datos y toma de decisión:

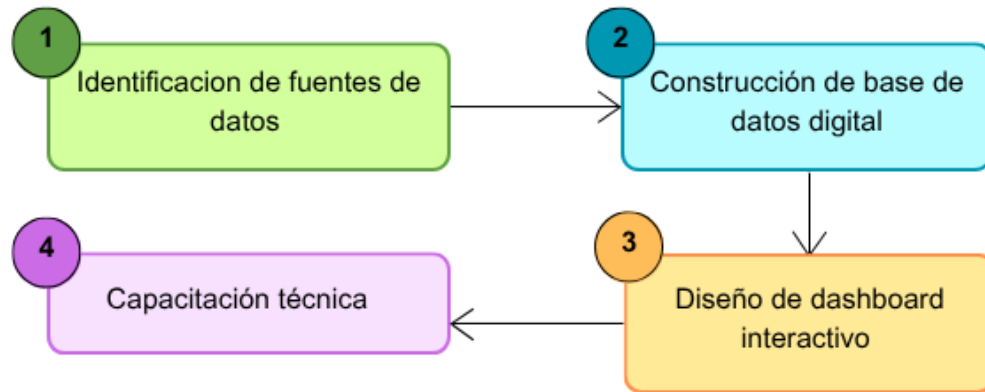
Finalmente, se elaboraron gráficas comparativas que permitieron visualizar de manera clara las diferencias en costos y beneficios de cada alternativa tecnológica evaluada. Estas representaciones facilitaron la interpretación de la información y el análisis de los resultados, contribuyendo a la identificación de la opción más viable para optimizar el proceso de desinfección en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)

Metodología fase 2:

Diseñar un sistema de gestión y monitoreo de la calidad del agua con una base de datos optimizada y visualización dinámica para análisis y alertas por alteraciones.

Ilustración 6.

Estructura metodológica de la fase 2



Fuente: Elaboración propia, a partir de actividades desarrolladas

Fase 1: Se identificaron las fuentes de datos actuales relacionadas con los parámetros de calidad del agua.

En esta fase se realizó un levantamiento de información para conocer las fuentes de datos disponibles en la planta de tratamiento de agua potable y a lo largo del sistema de distribución de la ciudad. Se recopilieron los registros de muestreo diario y los informes mensuales generados por el área de producción y laboratorio de Veolia Aguas de Tunja, los cuales contienen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relevantes (pH, turbidez, cloro residual, *Escherichia coli*, entre otros). Esta información fue clave para estructurar la base de datos y definir qué indicadores debían ser monitoreados de manera prioritaria.

Fase 2: Se construyó una base de datos digital optimizada que permite almacenar, consultar y actualizar los registros históricos.

Con la información obtenida de los informes mensuales y del muestreo diario realizado en diferentes puntos de la ciudad, se consolidó una base de datos organizada que integra los parámetros de calidad del agua y su evolución en el tiempo. La base de datos fue estructurada de manera que facilita la consulta, actualización y análisis histórico de la información, convirtiéndose en una herramienta fundamental para la toma de decisiones y la trazabilidad de los procesos de control de calidad en la PTAP.

Fase 3: Se diseñó un dashboard interactivo con gráficos, filtros dinámicos y alertas automáticas para parámetros fuera de norma.

Posteriormente, se creó un tablero de control interactivo en Looker Studio, herramienta de Google que permite la conexión con bases de datos y la visualización dinámica de información. Este dashboard fue configurado para mostrar gráficos comparativos, tendencias históricas y alertas automáticas en caso de detectar parámetros fuera de los rangos establecidos por la Resolución 2115 de 2007. Gracias a su diseño, el sistema facilita la interpretación de la información y agiliza la identificación de posibles desviaciones en la calidad del agua tratada y distribuida.

Fase 4: Se realizó una jornada de capacitación técnica dirigida al personal operativo y administrativo.

Finalmente, se llevó a cabo una capacitación en la que se explicó el funcionamiento del dashboard, la interpretación de los indicadores visualizados y su utilidad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Esta iniciativa impulsó la mejora de las habilidades del equipo en el manejo

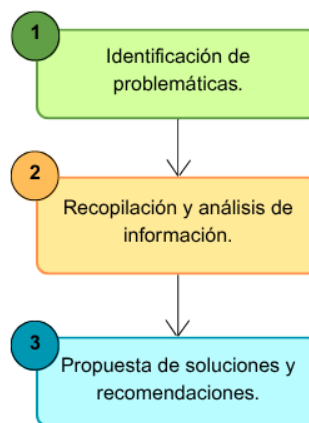
de recursos digitales, optimizando la administración y el control de la calidad del agua, fomentando una cultura de mejora continua y asegurando el aprovechamiento del sistema implementado.

Metodología fase 3:

Abordar casos problema en gestión del recurso hídrico para proponer soluciones técnicas, enfocadas en el tratamiento, distribución y control de la calidad del agua.

Ilustración 7.

Estructura metodológica de la fase 3



Fuente: Elaboración propia, a partir de actividades desarrolladas

Fase 1: Se identificaron las problemáticas de los restos, asociados con la calidad del agua.

En esta fase se analizaron escenarios hipotéticos que podrían presentarse en la PTAP y en la red de distribución de Veolia Aguas de Tunja, relacionados con posibles fallas en la desinfección, variaciones en los parámetros de calidad o afectaciones en la distribución. Para cada escenario se definieron las problemáticas potenciales, considerando aspectos operativos, sanitarios y logísticos que afectarían el suministro de agua potable.

Fase 2: Se recopiló y analizó información técnica, documental y de monitoreo relacionada con el tratamiento, distribución y control de la calidad del agua en dichos casos.

Una vez definidos los escenarios hipotéticos, se realizó la recopilación y análisis de información proveniente de manuales de operación de la PTAP, registros históricos de muestreo, normativas vigentes y bibliografía técnica sobre la gestión de emergencias en sistemas de tratamiento y distribución. Este análisis permitió establecer la relación entre cada problemática potencial y sus posibles consecuencias en la calidad del agua y en la continuidad del servicio.

Fase 3: Se presentaron soluciones propuestas en un informe técnico, acompañadas de recomendaciones para su posible implementación y seguimiento.

Finalmente, se elaboró un informe técnico en el que se incluyeron las soluciones planteadas para cada escenario hipotético identificado. Las propuestas contemplaron medidas correctivas y preventivas enfocadas en mejorar la capacidad de respuesta de la PTAP ante contingencias, optimizar la desinfección y garantizar la continuidad de la distribución de agua potable. El informe incluyó recomendaciones sobre la viabilidad de cada solución, los recursos necesarios y la forma de hacer seguimiento a su implementación.

RESULTADOS

Estudio de viabilidad para implementación del sistema de generación en sitio de hipoclorito de sodio

La ejecución de este proyecto se desarrolló entre mediados de abril y mediados de julio de 2025, con una duración aproximada de tres meses. Durante la etapa inicial fue necesario coordinar reuniones virtuales y presenciales para consolidar la información requerida, aclarar aspectos técnicos y definir el plan de trabajo. A partir de esta organización preliminar, se avanzó en las actividades planificadas y, a continuación, se presentan en detalle los resultados obtenidos en cada una de las fases de estudio.

Contacto con proveedores y recopilación de información

Se estableció comunicación con cuatro empresas proveedoras de sistemas de generación in situ de hipoclorito de sodio: Prominent, Aquasy, Serviclora y Más Agua. Se realizaron reuniones presenciales con Serviclora y Prominent, mientras que con Más Agua y Aquasy los encuentros fueron virtuales. Durante estas reuniones, cada proveedor presentó su propuesta técnica, operativa y económica, explicando aspectos como el funcionamiento del sistema, los requerimientos de instalación, los costos asociados y los beneficios operativos. El detalle de estas propuestas se incluye en el anexo de proyección. La información obtenida permitió contar con un panorama más completo sobre las alternativas disponibles en el mercado y sirvió como base para el análisis comparativo y la siguiente etapa del estudio.

Ilustración 8.

Evidencia fotográfica de reuniones



Fuente: Autor, Fotografía tomada con proveedores

Análisis comparativo de las propuestas

Con la información recopilada de los proveedores, se realizó un análisis comparativo de las diferentes propuestas de sistemas de generación in situ de hipoclorito de sodio. Para este fin, se elaboró un cuadro comparativo (Anexo 1, hoja “ALTERNATIVAS”), en el cual se evaluaron aspectos clave como la eficiencia del sistema, los costos de instalación, el consumo energético, la facilidad de operación, la seguridad en el manejo y los requerimientos de insumos. Este análisis permitió identificar de manera objetiva las ventajas y desventajas de cada alternativa, proporcionando una visión más clara sobre cuál opción resultaba más adecuada para las necesidades operativas de la Planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Los resultados obtenidos sirvieron como base para la siguiente fase del estudio, orientada a la comparación de costos de operación y la proyección de posibles ahorros a largo plazo.

Comparación costos de operación

A partir del análisis de la información suministrada por cada empresa proveedora, se elaboraron cuadros comparativos que facilitan la visualización de los costos de operación de cada sistema evaluado. En estos cuadros se tomó como punto de referencia la operación actual con cloro gaseoso, lo que permitió establecer una comparación directa entre la situación presente de la PTAP y las alternativas de generación in situ de hipoclorito de sodio. Esta comparación no solo evidencia las diferencias económicas de cada propuesta, sino que también brinda un panorama más claro sobre su viabilidad técnica y financiera, sirviendo como insumo fundamental para la toma de decisiones en fases posteriores del estudio.

Tabla 1.

Costos operativos actuales

OPERACIÓN ACTUAL - CLORO GASEOSO		
REQUERIMIENTOS		
Tiempo de Operación		
Hipoclorito de sodio		
Energía		
CONSUMOS		
Tiempo de Operación	24	horas
Hipoclorito de sodio	38	kg/día
	1.58	kg/hora
COSTO UNITARIO		
Hipoclorito de Sodio	\$ 2,150.00	\$/kg
Energía	\$ 699.98	\$/kwh
COSTO DIARIO		TOTAL
Hipoclorito de Sodio	\$ 81,700.00	\$ 98,499.52

OPERACIÓN ACTUAL - CLORO GASEOSO		
Energía	\$ 16,799.52	
COSTO MENSUAL		TOTAL
Hipoclorito de Sodio	\$ 2,451,000.00	\$ 2,954,985.60
Energía	\$ 503,985.60	
COSTO ANUAL		TOTAL
Hipoclorito de Sodio	\$ 29,820,500.00	\$ 35,952,324.80
Energía	\$ 6,131,824.80	

Fuente: Adaptado a partir de los datos actuales de la (PTAP)

A partir de la información consignada en los cuadros comparativos, se realizó el cálculo de los costos anuales de operación asociados a cada una de las propuestas, considerando únicamente los insumos requeridos para el proceso de desinfección. Véase en la (Tabla 1) el cloro gaseoso, actualmente utilizado en la planta, representa la alternativa más económica frente a los sistemas propuestos de generación de hipoclorito de sodio in situ.

El costo del sistema actual (\$35.952.324,80) resulta inferior al de todas las alternativas, con diferencias negativas: Serviclora (-\$38.806.101,39), Prominent (-\$36.087.639,64), Aquasy (-\$34.728.340,81) y Mas Agua (-\$1.359.318,25). Esto indica que implementar cualquiera de ellas incrementaría los costos operativos.

Por lo tanto, aunque el objetivo era identificar una alternativa que permitiera reducir los gastos operativos mediante la sustitución del sistema de desinfección, los resultados muestran que ninguna de las opciones evaluadas genera ahorros anuales. Véase (Tabla 2) para el resumen comparativo de diferencias de costos.

Tabla 2.

Costos operativos de los sistemas propuestos por cada empresa

PROPUESTA SERVICLORO			PROPUESTA PROMINENT			PROPUESTA AQUASY			PROPUESTA +AGUA		
REQUERIMIENTOS			REQUERIMIENTOS			REQUERIMIENTOS			REQUERIMIENTOS		
Cloro Equivalente	26,6	kg/día	Cloro Equivalente	26,6	kg/día	Cloro Equivalente	26,6	kg/día	Cloro Equivalente	26,6	kg/día
Sal	3,3	kg sal / kg cl producido	Sal	3,2	kg sal / kg cl producido	Sal	3,0	kg sal / kg cl producido	Sal	3,5	kg sal / kg cl producido
Energía	4,5	kW / kg cl producido	Energía	4,2	kW / kg cl producido	Energía	4,4	kW / kg cl producido	Energía	4,2	kW / kg cl producido
CONSUMOS			CONSUMOS			CONSUMOS			CONSUMOS		
Tiempo de Operación	24	horas	Tiempo de Operación	24	horas	Tiempo de Operación	24	horas	Tiempo de Operación	24	horas
Sal	86,45	kg/día	Sal	85,12	kg/día	Sal	79,80	kg/día	Sal	93,10	kg/día
	3,60	kg/hora		3,55	kg/hora		3,33	kg/hora		3,88	kg/hora
Energía	4,99	kwh	Energía	4,66	kwh	Energía	4,88	kwh	Energía	4,66	kwh
COSTO UNITARIO			COSTO UNITARIO			COSTO UNITARIO			COSTO UNITARIO		
Sal	\$ 1.400,00	\$/kg	Sal	\$ 1.400,00	\$/kg	Sal	\$ 1.400,00	\$/kg	Sal	\$ 1.400,00	\$/kg
Energía	\$ 699,98	\$/kwh	Energía	\$ 699,98	\$/kwh	Energía	\$ 699,98	\$/kwh	Energía	\$ 699,98	\$/kwh
COSTO DIARIO		TOTAL	COSTO DIARIO		TOTAL	COSTO DIARIO		TOTAL	COSTO DIARIO		TOTAL
Sal	\$ 121.030,00	\$ 204.817,61	Sal	\$ 119.168,00	\$ 197.369,77	Sal	\$ 111.720,00	\$ 193.645,66	Sal	\$ 130.340,00	\$ 208.541,77
Energía	\$ 83.787,61		Energía	\$ 78.201,77		Energía	\$ 81.925,66		Energía	\$ 78.201,77	
COSTO MENSUAL		TOTAL	COSTO MENSUAL		TOTAL	COSTO MENSUAL		TOTAL	COSTO MENSUAL		TOTAL
Sal	\$ 3.630.900,00	\$ 6.144.528,18	Sal	\$ 3.575.040,00	\$ 5.921.092,97	Sal	\$ 3.351.600,00	\$ 5.809.369,78	Sal	\$ 3.910.200,00	\$ 6.256.252,97
Energía	\$ 2.513.628,18		Energía	\$ 2.346.052,97		Energía	\$ 2.457.769,78		Energía	\$ 2.346.052,97	
COSTO ANUAL		TOTAL	COSTO ANUAL		TOTAL	COSTO ANUAL		TOTAL	COSTO ANUAL		TOTAL
Sal	\$ 44.175.950,00	\$ 74.758.426,19	Sal	\$ 43.496.320,00	\$ 72.039.964,44	Sal	\$ 40.777.800,00	\$ 70.680.665,61	Sal	\$ 47.574.100,00	\$ 76.117.744,44
Energía	\$ 30.582.476,19		Energía	\$ 28.543.644,44		Energía	\$ 29.902.865,61		Energía	\$ 28.543.644,44	
AHORRO ANUAL	\$ -38.806.101,39		AHORRO ANUAL	\$ -36.087.639,64		AHORRO ANUAL	\$ -34.728.340,81		AHORRO ANUAL	\$ -1.359.318,25	

Fuente: Elaboración propia adaptado de la información de cada proveedor.

Visualización de datos y toma de decisión

Aquí se presentan los resultados obtenidos a través de la visualización de datos, lo que permite interpretar de manera más clara el impacto económico de la implementación del sistema de generación en sitio de hipoclorito de sodio.

La (Tabla 3) muestra la comparación de costos de operación de cada una de las propuestas evaluadas, traídos a Valor Presente Neto (VPN), en la gráfica se comparan los valores presentes netos (VPN) de los costos de operación a 15 años para el uso de cloro gaseoso frente a las distintas propuestas de generación in situ de hipoclorito de sodio.

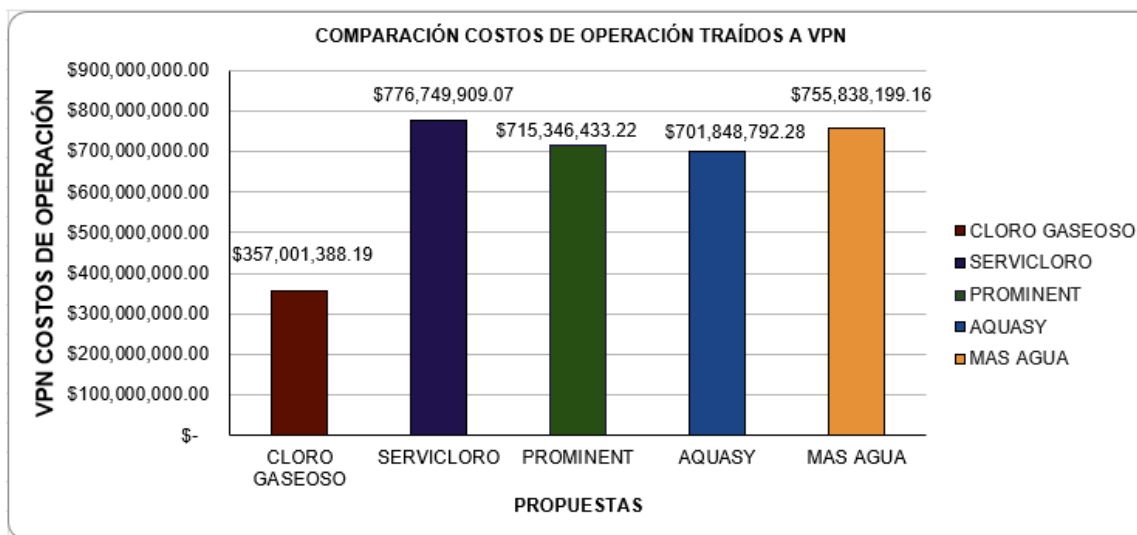
Se observa que el cloro gaseoso presenta el menor VPN de costos (\$357.001.388,19), lo que confirma que, bajo las condiciones actuales, es la opción más económica para la PTAP. En contraste, todas las propuestas evaluadas (Serviclora, Prominent, Aquasy y Más Agua) presentan costos significativamente más altos, con valores entre \$701.848.792 y \$776.749. 909. Este comportamiento se explica porque el costo operativo del cloro gaseoso es menor que el de las alternativas, y la inversión inicial de las nuevas tecnologías incrementa el gasto total proyectado a 15 años. Aunque las propuestas de generación in situ ofrecen beneficios en seguridad y cumplimiento normativo, financieramente no resultan más rentables en el escenario evaluado, ya que no generan ahorros sino un mayor costo acumulado.

Por tanto, el análisis evidencia que, desde la perspectiva económica, la operación con cloro gaseoso continúa siendo la alternativa más favorable para la planta en el horizonte de 15 años, mientras que las demás opciones implican mayores costos de inversión y operación.

Tabla 3.

VPN Costos de operación a 15 años

VPN COSTOS	COLORO GASEOSO	SERVICOLORO	PROMINENT	AQUASY	MAS AGUA
15 años	\$ 357,001,388.19	\$ 776,749,909.07	\$ 715,346,433.22	\$ 701,848,792.28	\$ 755,838,199.16



Fuente: Elaboración propia a partir de los cálculos generados.

Flujos de caja proyectados

A partir del análisis de los flujos de caja proyectados para las cuatro alternativas tecnológicas (Servicloro, Prominent, Aquasy y Mas Agua), se observa que todas presentan valores negativos a lo largo del periodo de 15 años, lo que indica la ausencia de recuperación de la inversión inicial y, por tanto, una rentabilidad financiera nula en este horizonte de evaluación. Sin embargo, se evidencian diferencias en el comportamiento acumulativo de las pérdidas: Aquasy muestra la menor tasa de pérdida, con una curva más estable y plana, lo que la convierte en la opción menos desfavorable económicamente. Véase en la (Tabla 4).

Tabla 4.

Flujos de caja proyectados

FLUJOS DE CAJA PROYECTADOS					
AÑO	SERVICLORO	PROMINENT	AQUASY	MAS AGUA	
0	\$ -830.842.744,20	\$ -1.040.128.515,00	\$ -1.265.73200	\$ -1.018.406.316,28000	
1	\$ -869.648.845,59	\$ -1.076.216.154,64	\$ -34.729.606,54	\$ -1.133.330.162,11	
2	\$ -910.317.639,85	\$ -1.114.036.000,99	\$ -71.124.907,71	\$ -1.253.770.352,55	
3	\$ -954.605.158,85	\$ -1.153.671.199,96	\$ -109.267.183,33	\$ -1.381.658.294,75	
4	\$ -1.001.018.478,77	\$ -1.195.208.888,48	\$ -149.240.288,18	\$ -1.515.684.858,17	
5	\$ -1.049.659.638,04	\$ -1.238.740.386,06	\$ -191.132.102,07	\$ -1.656.144.696,64	
6	\$ -1.100.635.572,95	\$ -1.284.361.395,51	\$ -235.034.723,02	\$ -1.803.346.607,35	
7	\$ -1.156.168.505,07	\$ -1.332.172.213,42	\$ -281.044.669,78	\$ -1.959.724.362,10	
8	\$ -1.216.688.185,47	\$ -1.382.277.950,59	\$ -329.263.093,98	\$ -2.125.929.416,62	
9	\$ -1.282.666.094,84	\$ -1.434.788.763,14	\$ -379.796.002,54	\$ -2.302.665.598,08	
10	\$ -1.351.810.943,87	\$ -1.489.820.094,69	\$ -432.754.490,72	\$ -2.487.885.116,24	
11	\$ -1.424.274.745,64	\$ -1.547.492.930,16	\$ -488.254.986,33	\$ -2.681.995.171,27	
12	\$ -1.500.216.809,90	\$ -1.607.934.061,74	\$ -546.419.505,72	\$ -2.885.422.508,94	
13	\$ -1.579.804.093,25	\$ -1.671.276.367,62	\$ -607.375.922,05	\$ -3.098.614.358,83	
14	\$ -1.663.211.566,19	\$ -1.737.659.104,19	\$ -671.258.246,36	\$ -3.322.039.417,50	
15	\$ -1.750.622.597,84	\$ -1.807.228.212,12	\$ -738.206.922,24	\$ -3.556.188.879,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de los cálculos generados.

De acuerdo con la (Resolucion 2115 de 2007), el agua para consumo humano debe garantizar un cloro residual libre entre 0,3 y 2,0 mg/L en la red de distribución. Si bien ambos métodos de desinfección cloro gaseoso e hipoclorito cumplen con este requisito, la generación in situ ofrece mayor seguridad en el aseguramiento de dicho parámetro, al permitir un control más preciso y reducir la dependencia logística.

Por otra parte, el (Decreto 1076 de 2015) establece la obligatoriedad de un manejo responsable de sustancias químicas peligrosas, reforzando la pertinencia de tecnologías que minimicen el riesgo en la manipulación. En este sentido, la OMS (World Health Organization., 2011) recomienda adoptar alternativas de desinfección que reduzcan la exposición a sustancias de alta toxicidad, siendo la generación de hipoclorito en sitio una buena práctica reconocida internacionalmente.

Diseño de sistema de gestión y monitoreo de la calidad del agua con base de datos y visualización dinámica por alertas.

Se recopilaron las fuentes de información disponibles sobre los parámetros de calidad del agua, a partir de los reportes mensuales elaborados con base en los análisis de muestras tomadas en diferentes puntos de la red de distribución. Estos análisis provienen de los muestreos diarios realizados en la ciudad y evaluados por el laboratorio de Veolia. Gracias a esta información, se logró construir un registro organizado y detallado de los valores obtenidos diariamente, el cual fue fundamental para el desarrollo de la base de datos empleada en el sistema de monitoreo y gestión. Como se puede apreciar en la (Tabla 5).

Tabla 5.

Registro de datos de informe mensual de calidad de la red

			GERENCIA DE OPERACIONES								FORMATO				
			CONSOLIDADO MENSUAL CONTROL DE CALIDAD DE AGUA FRECUENCIA : DIARIA								VT-IPA-F-26				
			RED DE DISTRIBUCIÓN CIUDAD DE TUNJA MES JUNIO 2025								VERSIÓN: 10				
											PAG. 1 DE 5				
Consec.	Fecha	Hora	DIRECCIÓN	CODIGO PUNTO DE MONITOREO	FUENTE	Turbiedad NTU	Color Aparente U.P.C.	pH Unid de pH	Cloro Residual Libre mg/L Cl2	Coliformes Totales UPC/100 mL	E-Coli UPC/100 mL	PERO DE LOS PARAMETROS ANALIZADOS	PERO PARAMETROS QUE NO CUMPLE CON LA NORMA	ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA ABASTECIDA (ICA) (%)	
2506012303	06	7:30	Av Norte No. 80 - 10 Jardines de la Asunción	0001	SUPERFICIAL	0,95	3,90	7,10	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506012304	1 -	7:10	Cr 1 Calle 40 La Esmeralda	0005	SUPERFICIAL	0,70	<3,0	7,00	0,70	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506012305	05	6:30	Transv. 11 No. 22 - 30 CAI Parque Santander	0007	SUPERFICIAL	0,70	5,80	7,00	0,60	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506022301	06	9:35	Cr 2 Este No. 71 - 34 Capitolio	0002	SUPERFICIAL	1,60	13,40	7,40	1,00	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506022302	2 -	9:10	Cr 4 A No. 22 - 12 Lancers	0009	SUPERFICIAL	1,50	13,30	7,00	0,70	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506022303	05	10:45	Cr 21 No. 17 - 08 Milagro	0008	SUPERFICIAL	0,80	6,00	7,30	0,60	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506042303	06	9:25	Calle 50 No. 16 B - 53 Mirador del Norte	0004	SUPERFICIAL	0,70	8,00	7,40	0,90	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506042304	4 -	8:40	Calle 17 Cr 2 Silvino Rodríguez	0015	SUBTERRANEA	0,45	4,50	7,20	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506042305	05	11:20	Calle 13 No. 9 - 53 San Laureano	0011	SUPERFICIAL	0,70	7,60	7,00	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506052303	06	7:18	Diag. 31 A No. 10 - 06 Glorieta Norte	0006	SUPERFICIAL	0,70	7,00	7,10	0,60	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506052304	5 -	8:00	Calle 31 No. 2 - 15 Este Cárcel Municipal	0016	SUPERFICIAL	0,55	5,30	7,10	0,60	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506052305	05	8:19	Cr 17 Sur Calle 2 El Triunfo	0012	SUPERFICIAL	0,80	8,00	7,00	0,60	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506062303	06	9:10	Calle 63 No. 8 - 25 Asis	0020	SUPERFICIAL	0,35	<3,0	7,40	0,90	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506062304	6 -	8:45	Calle 4 C No. 2 Este - 23 Altos de Cooservicios	0018	SUBTERRANEA	0,30	<3,0	7,00	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506062305	05	11:10	Calle 6 Cr 12 Plaza de Mercado del Sur	0014	SUPERFICIAL	0,45	6,20	7,30	0,70	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506072303	06	9:35	Diagonal 42 No. 22 - 12 Doña Limbania	0022	SUPERFICIAL	0,70	3,30	7,30	0,90	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506072304	7 -	7:30	Urbanización Antonia Santos Parquadero	0024	SUPERFICIAL	0,85	<3,0	7,00	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506072305	05	9:50	Cr 16 con Calle 11 A Paraíso	0017	SUPERFICIAL	0,75	4,70	7,50	1,00	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506082301	06	6:50	Av. Universitaria No. 62 - 100 Colegio San Viator	0023	SUPERFICIAL	0,50	<3,0	7,10	0,70	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506082302	8 -	6:35	Cr 3 Este No. 11 - 20 San Antonio	0026	SUBTERRANEA	0,40	<3,0	7,00	0,70	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506082303	05	7:35	Transv. 20 No. 30 - 28 Altamira	0019	SUPERFICIAL	0,25	<3,0	7,10	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506092303	06	9:30	Calle 32 No. 3 - 152 Estadio	0025	SUPERFICIAL	0,35	<3,0	7,20	1,10	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506092304	9 -	9:10	Cr 1 Calle 40 La Esmeralda	0005	SUPERFICIAL	0,40	<3,0	7,40	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506092305	05	10:10	Cr 16 - 2 No. 35 - 97 Trigales	0021	SUPERFICIAL	0,35	<3,0	7,20	0,80	0,00	0,00	77,5	0	0	
2506102303	06	7:00	Calle 13 No. 9 - 53 Monumento La Independencia	0011	SUPERFICIAL	0,25	<3,0	7,40	0,80	Ausencia	Ausencia	77,5	0	0	
2506102304	7:20	Urbanización Antonia Santos Parquadero	0024	SUPERFICIAL	0,30	<3,0	7,60	0,80	Ausencia	Ausencia	Ausencia	77,5	0	0	

Fuente: Archivo de consolidado mensual control de calidad de agua.

Base de datos optimizada para la gestión y trazabilidad de la información de calidad del agua

Se construyó una base de datos digital optimizada con la finalidad de centralizar, almacenar y gestionar de manera eficiente los registros históricos de calidad del agua en la red de distribución. Para ello, se recopilaron y consolidaron los datos obtenidos de los informes mensuales, los cuales incluyen los resultados de los muestreos diarios realizados. Esta base de datos se diseñó con una estructura que facilita su actualización periódica, la consulta de información histórica y la generación de reportes automatizados. Véase en la (Tabla 6) además, permite organizar la información por parámetros, fechas y puntos de muestreo, contribuyendo a la trazabilidad de los resultados y al soporte técnico requerido para la toma de decisiones en la gestión de la calidad del agua.

Tabla 6.

Base de datos, muestreo de calidad del agua

FECHA	CIUDAD	LATITUD - LONGITUD	DIRECCION	CODIGO PUNTO MONITOREO	TURBIEDAD (NTU)	COLOR	PH	CLORO RESIDUAL	MES
01/06/25	Tunja	5.54492, -73.34762	Cr 1 Calle 40 La Esmeralda	0005	0,70	3,00	7,00	0,70	6
01/06/25	Tunja	5.53616, -73.36196	Transv. 11 No. 22 - 30 CAI Parque Santander	0007	0,70	5,80	7,00	0,60	6
02/06/25	Tunja	5.57043, -73.33562	Cr 2 Este No. 71 - 34 Capitolio	0002	1,60	13,40	7,40	1,00	6
02/06/25	Tunja	5.53335, -73.35573	Cr 4 A No. 22 - 12 Lanceros	0009	1,50	13,30	7,00	0,70	6
02/06/25	Tunja	5.53347, -73.37262	Cr 21 No. 17 - 08 Milagro	0008	0,80	6,00	7,30	0,60	6
03/06/25	Tunja	5.51349, -73.37432	Cr 17 Sur Calle 2 El Triunfo	0012	0,95	9,90	7,40	1,00	6
03/06/25	Tunja	5.50928, -73.37142	Calle 6 Cr 12 Plaza de Mercado del Sur	0014	1,10	10,70	7,60	0,80	6
03/06/25	Tunja	5.50131, -73.36365	Calle 10 A Sur No. 3 - 44 Ciudad Jardín	0013	0,45	4,10	7,00	0,80	6
03/06/25	Tunja	5.52728, -73.35120	Calle 17 Cr 2 Silvino Rodríguez	0015	0,25	3,00	7,00	0,60	6
03/06/25	Tunja	5.54043, -73.34920	Calle 31 No. 2 - 15 Este Cárcel Municipal	0016	0,35	4,80	7,00	0,60	6
04/06/25	Tunja	5.52590, -73.37049	Cr 16 con Calle 11 A Paraíso	0017	0,85	7,70	7,80	0,80	6
04/06/25	Tunja	5.52728, -73.35120	Calle 17 Cr 2 Silvino Rodríguez	0015	0,45	4,50	7,20	0,80	6
04/06/25	Tunja	5.52680, -73.36327	Calle 13 No. 9 - 53 Monumento La Independencia	0011	0,70	7,60	7,00	0,80	6
05/06/25	Tunja	5.54509, -73.35784	Diag. 31 A No. 10 - 06 Glorieta Norte	0006	0,70	7,00	7,10	0,60	6
05/06/25	Tunja	5.54043, -73.34920	Calle 31 No. 2 - 15 Este Cárcel Municipal	0016	0,55	5,30	7,10	0,60	6
05/06/25	Tunja	5.51349, -73.37432	Cr 17 Sur Calle 2 El Triunfo	0012	0,80	8,00	7,00	0,60	6
06/06/25	Tunja	5.56915, -73.34560	Calle 63 No. 8 - 25 Asís	0020	0,35	3,00	7,40	0,90	6
06/06/25	Tunja	5.51488, -73.35675	Calle 4 C No. 2 Este - 23 Altos de Cooservicios	0018	0,30	3,00	7,00	0,80	6
06/06/25	Tunja	5.50928, -73.37142	Calle 6 Cr 12 Plaza de Mercado del Sur	0014	0,45	6,20	7,30	0,70	6
07/06/25	Tunja	5.55655, -73.36325	Diagonal 42 No. 22 - 12 Doña Limbania	0022	0,70	3,30	7,30	0,90	6
07/06/25	Tunja	5.51301, -73.36424	Urbanización Antonia Santos Parquadero	0024	0,85	3,00	7,00	0,80	6
07/06/25	Tunja	5.52590, -73.37049	Cr 16 con Calle 11 A Paraíso	0017	0,75	4,70	7,50	1,00	6
08/06/25	Tunja	5.56407, -73.33793	Av. Universitaria No. 62 - 100 Colegio San Viator	0023	0,50	3,00	7,10	0,70	6
08/06/25	Tunja	5.51980, -73.35709	Cr 3 Este No. 11 - 20 San Antonio	0026	0,40	3,00	7,00	0,70	6
08/06/25	Tunja	5.54529, -73.36848	Transv. 20 No. 30 - 28 Altamira	0019	0,25	3,00	7,10	0,80	6
09/06/25	Tunja	5.54327, -73.35292	Calle 32 No. 3 - 152 Estadio	0025	0,35	3,00	7,20	1,10	6
09/06/25	Tunja	5.54492, -73.34762	Cr 1 Calle 40 La Esmeralda	0005	0,40	3,00	7,40	0,80	6
09/06/25	Tunja	5.54915, -73.36183	Cr 16 - 2 No. 35 - 97 Trigales	0021	0,35	3,00	7,20	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.52680, -73.36327	Calle 13 No. 9 - 53 Monumento La Independencia	0011	0,25	3,00	7,40	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.51301, -73.36424	Urbanización Antonia Santos Parquadero	0024	0,30	3,00	7,60	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.51488, -73.35675	Calle 4 C No. 2 Este - 23 Altos de Cooservicios	0018	0,35	3,00	7,00	1,20	6
10/06/25	Tunja	5.54327, -73.35292	Calle 32 No. 3 - 152 Estadio	0025	0,50	4,50	7,40	1,00	6
10/06/25	Tunja	5.54492, -73.34762	Cr 1 Calle 40 La Esmeralda	0005	0,80	7,30	7,40	1,00	6
10/06/25	Tunja	5.55545, -73.34870	Calle 48 No. 3 - 77 Las Quintas	0003	0,30	3,00	7,60	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.57043, -73.33562	Cr 2 Este No. 71 - 34 Capitolio	0002	0,35	3,00	7,60	1,00	6
10/06/25	Tunja	5.58073, -73.33596	Av Norte No. 80 - 10 Jardines de la Asunción	0001	0,20	3,00	7,60	1,20	6
10/06/25	Tunja	5.56043, -73.35735	Calle 50 No. 16 B - 53 Mirador del Norte	0004	0,20	3,00	7,40	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.55655, -73.36325	Diagonal 42 No. 22 - 12 Doña Limbania	0022	0,20	3,00	7,40	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.54915, -73.36183	Cr 16 - 2 No. 35 - 97 Trigales	0021	0,20	3,00	7,60	0,80	6
10/06/25	Tunja	5.54529, -73.36848	Transv. 20 No. 30 - 28 Altamira	0019	0,25	3,00	7,60	0,80	6
11/06/25	Tunja	5.57043, -73.33562	Cr 2 Este No. 71 - 34 Capitolio	0002	0,45	3,00	7,40	1,00	6
11/06/25	Tunja	5.50131, -73.36365	Calle 10 A Sur No. 3 - 44 Ciudad Jardín	0013	0,75	6,70	7,00	0,80	6
11/06/25	Tunja	5.53347, -73.37262	Cr 21 No. 17 - 08 Milagro	0008	0,85	9,40	7,20	0,70	6
12/06/25	Tunja	5.55545, -73.34870	Calle 48 No. 3 - 77 Las Quintas	0003	0,30	3,00	7,40	1,10	6
12/06/25	Tunja	5.52728, -73.35120	Calle 17 Cr 2 Silvino Rodríguez	0015	0,50	4,80	7,00	0,80	6
12/06/25	Tunja	5.54137, -73.35657	Cr 7 No. 28 A - 47 Nieves	0010	0,85	9,90	7,30	0,60	6

Fuente: A partir del consolidado mensual de calidad de la red.

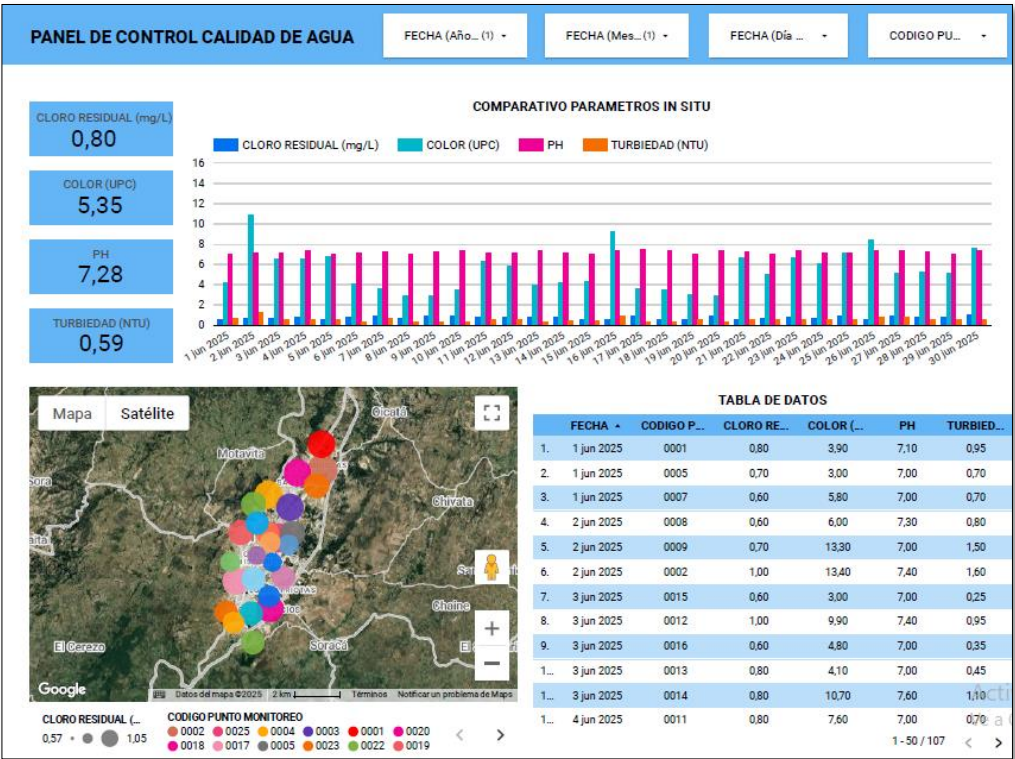
Dashboard interactivo para la visualización y control de la calidad del agua

Se diseñó un dashboard interactivo utilizando la herramienta Looker Studio, con el objetivo de optimizar la visualización y el análisis de los indicadores de calidad del agua. Esta plataforma permitió integrar la base de datos consolidada a partir de los informes mensuales y de los resultados de muestreo diario en la red de distribución, generando gráficos dinámicos, filtros personalizables y sistemas de alerta automática para la detección de valores fuera de los rangos establecidos por la normatividad vigente.

El dashboard se estructuró para facilitar la interpretación de tendencias históricas y la comparación entre puntos de monitoreo, permitiendo al personal técnico y administrativo acceder a la información de manera rápida y centralizada. Gracias a su diseño interactivo, esta herramienta contribuye a la adopción de medidas oportunas, mejora la trazabilidad de los datos y fortalece la gestión de la calidad del agua en la PTAP. En la (Ilustración 9) se visualizan los resultados.

Ilustración 9

Panel de control para la visualización de parámetros de calidad del agua



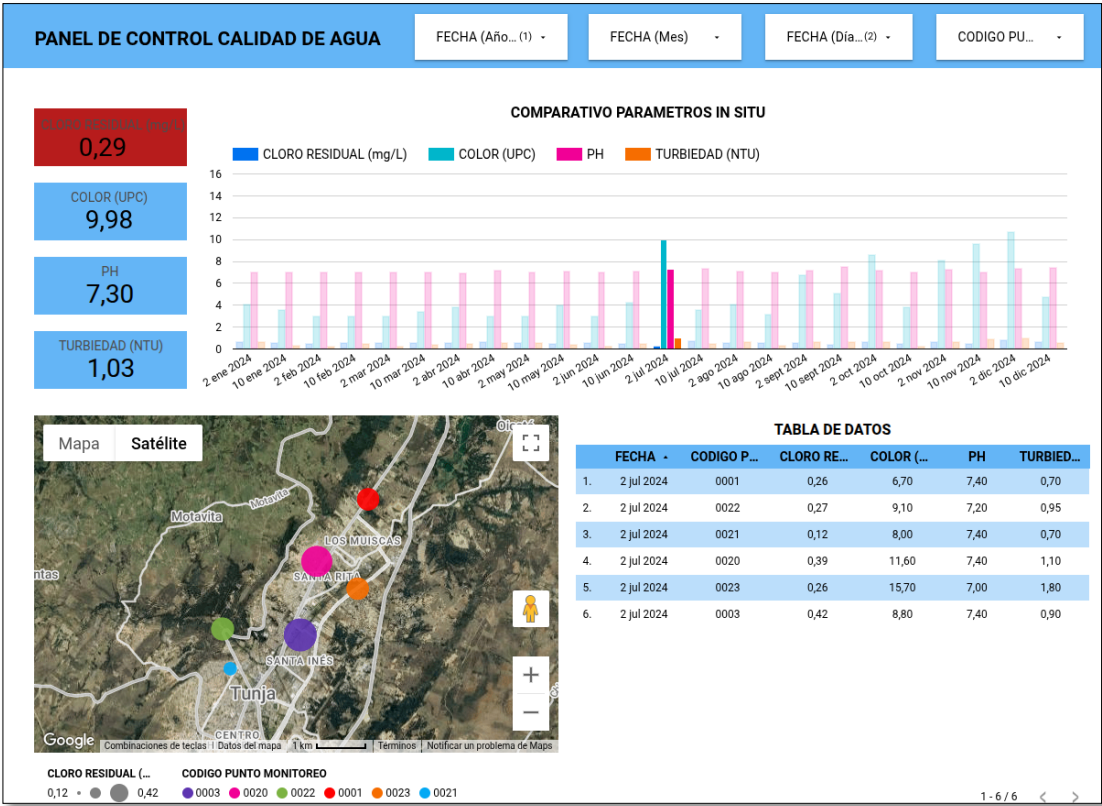
Fuente: Elaboración propia adaptado de la herramienta Looker Studio

Sistema de alertas para parámetros críticos de calidad del agua

El propósito de este dashboard es facilitar la visualización en tiempo real de los parámetros de calidad del agua en la red de distribución, permitiendo identificar de manera inmediata cualquier valor que se encuentre fuera de los límites establecidos por la normatividad vigente. Para ello, el panel incorpora un sistema de alertas visuales mediante la codificación por colores: cuando un parámetro se acerca a un valor crítico, se muestra en color naranja como advertencia, y si supera el límite normativo, cambia a rojo indicando la necesidad de una acción correctiva, como se puede visualizar en la ilustración (Ilustración 10).

Ilustración 10.

Panel de control con alertas de parámetros fuera de norma



Fuente: Elaboración propia adaptado de la herramienta Looker Studio

Georreferenciación de los puntos de monitoreo en el dashboard

Asimismo, el dashboard integra un mapa con visualización satelital que permite ubicar de manera precisa cada punto de muestreo dentro de la red de distribución. Cada marcador en el mapa está asociado a la información del barrio y la fecha en que se realizó la toma de la muestra, lo que facilita la identificación geográfica de los sitios monitoreados. Esta funcionalidad brinda una representación espacial de los datos, permitiendo analizar la distribución de los parámetros de calidad del agua en diferentes sectores de la ciudad y apoyar la toma de decisiones relacionadas con el control y la gestión operativa. Como se puede ver geográficamente también en la (Ilustración 10).

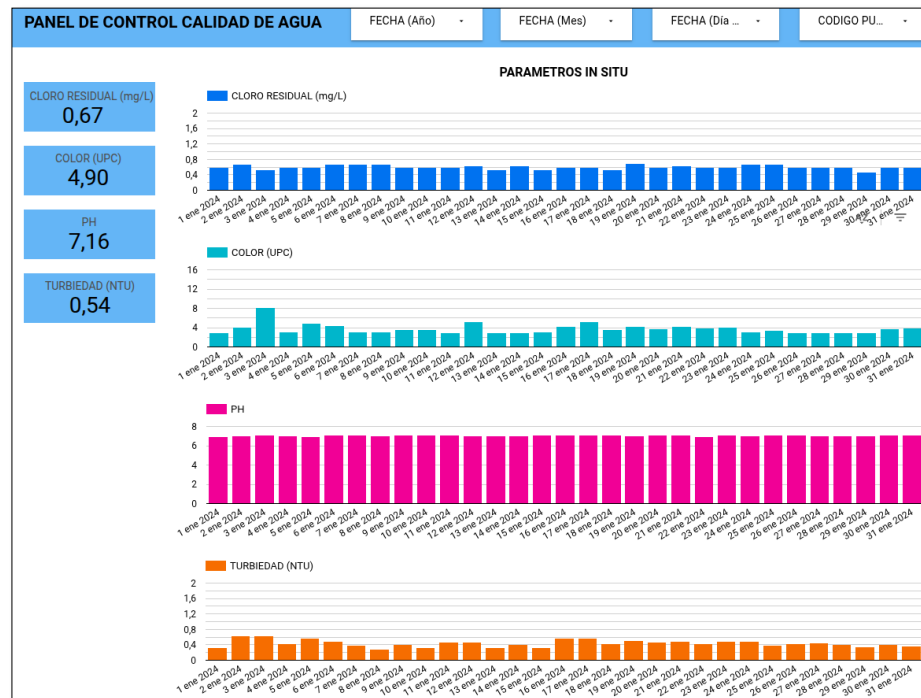
Análisis individual de parámetros de calidad en la red de distribución

En esta sección del dashboard se presentan de manera detallada los valores de cada parámetro de calidad del agua, permitiendo visualizar su comportamiento a lo largo de los diferentes periodos evaluados como se puede apreciar en la (Ilustración 11) los gráficos individuales de cloro residual, color, pH y turbidez facilitan la identificación de tendencias, variaciones y posibles desviaciones frente a los valores normativos establecidos.

Esta representación desagregada ofrece una visión más precisa del estado de la calidad del agua en la red de distribución, ya que permite analizar la evolución de cada parámetro de forma independiente y en función de las fechas de muestreo. Gracias a esta visualización, el personal encargado puede interpretar la información de manera más ágil y tomar decisiones oportunas para garantizar el cumplimiento de los estándares de potabilidad.

Ilustración 11.

Ilustración parámetros in situ de calidad en la red de distribución



Fuente: Elaboracion propia adaptado de la herramienta Looker Studio

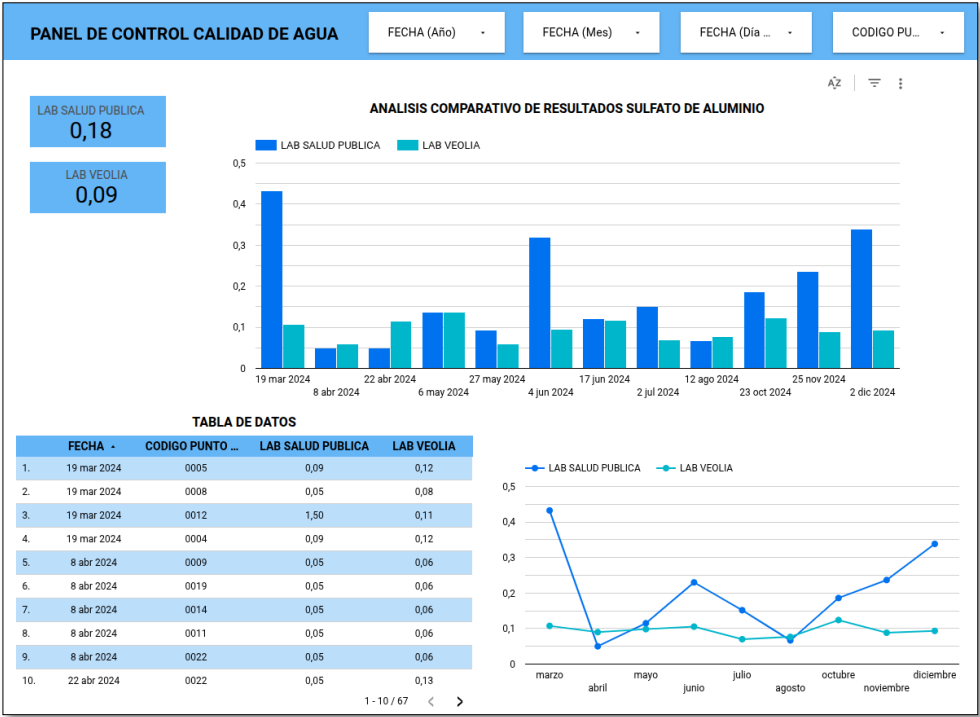
Comparativo histórico de resultados de sulfato de aluminio: secretaria de salud vs Veolia

En la última sección del dashboard se presenta un análisis comparativo de los resultados de sulfato de aluminio obtenidos por el laboratorio de la Secretaría de Salud Pública y el laboratorio de Veolia. Esta visualización permite contar con un registro detallado y un control histórico del comportamiento de este parámetro a lo largo del tiempo.

La información se muestra mediante gráficos de barras y líneas que facilitan la comparación de los resultados entre ambas entidades, evidenciando las variaciones registradas durante el año 2024, cuando en algunos periodos se presentaron valores más elevados. Esta sección constituye una herramienta clave para la trazabilidad y seguimiento de este parámetro, asegurando una verificación constante de la coherencia entre los resultados reportados y reforzando el control de la calidad del agua en el proceso de tratamiento. Asimismo, se presenta únicamente el histórico de este parámetro, ya que en lo que va del año 2025 solo se ha realizado un muestreo por parte de la Secretaría de Salud Pública, sin que hasta el momento se hayan obtenido resultados por parte de dicha entidad. Véase en la (Ilustración 12).

Ilustración 12.

Monitoreo y seguimiento del sulfato de aluminio



Fuente: Elaboracion propia adaptado de la herramienta Looker Studio

El diseño e implementación del dashboard de monitoreo constituye un avance significativo en la trazabilidad y análisis de la información de calidad del agua. Este sistema integra registros históricos y genera alertas en tiempo real para parámetros críticos como turbidez, pH y cloro residual.

El decreto 1575 de 2007 (Ministerio de la Protección Social, 2007) establece que los prestadores del servicio deben implementar mecanismos de aseguramiento y vigilancia de la calidad del agua, lo cual se ve fortalecido con esta herramienta digital. Asimismo, la (Resolucion 330 de 2017) (RAS) exige que las plantas de tratamiento incorporen dispositivos de control confiables y accesibles para el personal operativo, lo que se materializa en el dashboard desarrollado.

En términos de buenas prácticas operativas, la integración de sistemas digitales se alinea con prácticas internacionales como las sugeridas por la EPA (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2009) y la OMS, (World Health Organization., 2011) que promueven el uso de sensores en línea y plataformas digitales para anticipar desviaciones y responder de manera inmediata.

Proyecto “el reto” reto 1: Elaboración de un plan de seguridad del agua

El desarrollo de esta actividad permitió la entrega de un informe en el que se evidencian los resultados de la siguiente manera:

Para la elaboración del Plan de Seguridad del Agua (PSA) se tuvo en cuenta la información técnica disponible sobre la infraestructura y operación del sistema de abastecimiento, así como los resultados de calidad del agua obtenidos en los diferentes puntos de la red de distribución. El

análisis se desarrolló siguiendo las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud OMS, (World Health Organization., 2011) y la normativa vigente en Colombia, considerando los peligros biológicos, químicos y físicos que pueden presentarse en la fuente, la planta de tratamiento y la red de distribución. Además, se utilizaron matrices de evaluación de riesgo que permitieron cuantificar la probabilidad y la consecuencia de cada peligro, priorizando aquellos con mayor impacto en la salud pública. Este enfoque permitió estructurar un plan preventivo y sistemático, basado en la identificación de medidas de control, la definición de puntos críticos y la elaboración de acciones correctivas para garantizar la inocuidad del agua desde la fuente hasta el consumidor final.

Identificación de peligros y análisis de la situación

En esta fase se identificaron los peligros biológicos, químicos y físicos que podrían afectar la calidad del agua a lo largo de todo el sistema de abastecimiento, desde la fuente hasta la distribución. Para ello, se realizó un diagnóstico detallado de la situación actual de la infraestructura, la operación de la planta de tratamiento, los pozos y la red de distribución. También se evaluaron las posibles fuentes de contaminación, como actividades agrícolas, deficiencias en la desinfección, problemas en el mantenimiento de equipos y deterioro de la red de tuberías. Esta identificación inicial permitió reconocer las áreas críticas y los procesos que representan mayor riesgo para la seguridad del agua.

Tabla 7.

Peligros biológicos

Parámetro	% de muestras que superan límite normativo	Causa
Escherichia coli	90%	Contaminación por escorrentía, fauna silvestre y uso del suelo
Coliformes totales	95%	
Clostridium perfringens	20%	Eutrofización en verano y proliferación de cianobacterias.
Microcistinas	20%	
Coliformes totales en red	10%	Cloración insuficiente

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Tabla 8.

Peligros Químicos

Parámetro	% de muestras que superan límite normativo	Causa
Lindano	25%	Uso agrícola en la cuenca de captación.
Metoxicloro	33%	
Arsénico (III)	60%	Contaminación geológica, lixiviación de suelos.
Hierro	20%	

Manganeso	10%	
Cromo total	15%	
Amoniaco	80%	Residuos orgánicos, descomposición vegetal y contaminación agrícola.
Sólidos disueltos	90%	

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Tabla 9.

Peligros físicos

Parámetro	% de muestras que superan límite normativo	Causa
Turbidez	99%	Material en suspensión, algas, procesos de erosión en la cuenca.
Color verdadero	99%	

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Evaluación y cuantificación del riesgo

Una vez identificados los peligros, se procedió a evaluar el nivel de riesgo asociado a cada uno de ellos. Para esto se utilizó una matriz de probabilidad y consecuencia, asignando puntajes que permitieron clasificar los riesgos como bajos, moderados, altos o críticos. Esta cuantificación fue clave para priorizar las etapas más vulnerables del sistema, como la desinfección, la filtración y la distribución, donde la probabilidad de falla o de afectación a la salud de la población era mayor. Como se ven los resultados en la (Tabla 10)

Tabla 10.

Criterios para la cuantificación del riesgo

Categoría	Valor numérico	Descripción de la probabilidad (P)	Descripción de la consecuencia (C)
Muy baja	1	Ocurre muy rara vez (<5% de las veces/una vez en varios años)	Sin impacto sanitario ni operativo
Baja	2	Ocurre rara vez (5–15% / una vez al año o menos)	Molestias menores (olor, color, sin riesgos)
Media	3	Ocurre ocasionalmente (16–30% / algunas veces al año)	Posible rechazo del agua o molestias moderadas
Alta	4	Ocurre frecuentemente (31–70% / varias veces al año o por mes)	Enfermedades importantes o cortes del servicio
Muy alta	5	Ocurre casi siempre (>70% / mensual o más frecuente)	Enfermedades graves, brotes o muertes

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Tabla 11.

Escala de puntuación para clasificación del riesgo

Puntuación del riesgo	<1-5	6-10	11-15	16-25
Clasificación del riesgo	Bajo	Moderado	Alto	Crítico

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Tabla 12.*Cuantificación del riesgo*

Etapas del proceso	Peligro identificado	Probabilidad (P)	Consecuencia (C)	Riesgo (P×C)	Nivel de riesgo
Fuente superficial	Contaminación microbiana (E. coli, coliformes, turbidez alta).	5	5	25	Crítico
Cámara de mezcla	Exceso de cloro por dosificación deficiente.	3	4	12	Alto
Coagulación/decantación	Exceso de hierro en invierno.	3	2	6	Moderado
Coagulación/decantación	Exceso de arsénico.	3	5	15	Alto
Filtración por arena	Contaminación microbiana por mal mantenimiento.	4	4	16	Crítico

Etapas del proceso	Peligro identificado	Probabilidad (P)	Consecuencia (C)	Riesgo (P×C)	Nivel de riesgo
Filtración carbón activo	Microcistinas persistentes y clostridium perfringens.	2	5	10	Moderado
Desinfección final	Coliformes totales detectados.	3	4	12	Alto
Distribución-red- antigua	Color rojizo y material de tuberías.	2	2	4	Bajo
Distribución red- nueva	Roturas frecuentes, discontinuidad del servicio.	4	3	12	Alto
Pozos subterráneos	Nitratos.	4	4	16	crítico
Cloración en red	Cloración insuficiente y nula.	4	5	20	Crítico

Fuente: Elaboración propia, adaptado de documento de la entidad.

Propuestas de medidas preventivas

En esta fase se plantearon las acciones necesarias para reducir o eliminar los riesgos identificados. Entre estas medidas se incluyeron la calibración y mantenimiento de los dosificadores de cloro, la mejora en la operación de filtros, la implementación de prácticas de protección de la fuente de abastecimiento y la supervisión continua del cloro residual en la red de

distribución. Estas acciones fueron pensadas para prevenir la ocurrencia de fallas y asegurar la calidad del agua antes de su consumo.

Tabla 13.

Medidas preventivas

Peligro identificado	Medidas preventivas
E. coli en agua superficial	- Protección de la fuente (vallado, zonas de exclusión) - Control agrícola y ganadero en la cuenca - Pretratamiento adecuado (desbaste, preoxidación) - Optimizar dosificación de desinfectante
Exceso de clorito	- Calibrar y revisar el generador de dióxido de cloro periódicamente - Instalar sistema de control en línea de clorito - Capacitar al personal en dosificación química - Ajustar dosificación según calidad del agua y demanda de oxidantes.
Hierro	-Mejorar la mezcla del coagulante. -Optimizar decantación (tiempo, flujo, temperatura). -Limpieza regular de filtros de arena.

Peligro identificado	Medidas preventivas
Arsénico	- Mejorar eficiencia de decantación - Regenerar carbón activo con mayor frecuencia - Implementar etapa adicional si es necesario (adsorción específica) - Muestreo reforzado en febrero
Contaminación microbiológica por mal mantenimiento.	- Implementar programa de limpieza y lavado de filtros - Verificar caudales de filtración según diseño - Capacitar al personal en mantenimiento preventivo - Supervisar la calidad del agua post-filtración.
Microcistinas y clostridium	- Control de eutrofización en la fuente (algas) - Renovación o regeneración más frecuente del carbón activo - Evaluación del uso de ozono como tratamiento adicional - Control operativo de filtros (velocidad de filtración, retro lavado)
Coliformes en red	- Mantenimiento preventivo de las redes y tanques - Limpieza más frecuente de depósitos (al menos anual) - Verificación del cloro residual en los extremos de red - Control de puntos vulnerables (bajas presiones, tuberías antiguas)
Hierro en red antigua	- Sustitución progresiva de tuberías de fundición dúctil - Lavado preventivo de redes antiguas - Cronograma de purgado en la red de distribución.

Peligro identificado	Medidas preventivas
Roturas en red nueva	- Instalación de válvulas reguladoras de presión. -Análisis hidráulico para sectorizar la red. -Monitoreo sistemático continuo de altas presiones - Auditoría técnica de la red PVC (material y presión) - Mejora en la instalación y sellado de uniones - Implementación de un programa de mantenimiento predictivo - Vigilancia continua de presión y fugas
Nitratos (pozos subterráneos)	- Vigilancia de actividades agrícolas cercanas (fertilizantes) - Monitoreo sistemático del acuífero - Mezcla del agua subterránea con agua superficial tratada
Cloración insuficiente/nula	- Calibración periódica del dosificador de hipoclorito - Supervisión continua del cloro residual - Alarmas por falla de dosificación - Limpieza regular de tanques y tuberías

Fuente: Elaboracion propia, adaptado de documento de la entidad.

Clasificación de medidas según criticidad

Posteriormente, las medidas definidas se clasificaron según su impacto y función dentro del sistema de seguridad del agua. Se agruparon en Puntos de Control Críticos (PCC), cuando su control es esencial para evitar riesgos a la salud; Programas de Prerrequisitos Operativos (PPR-Op), cuando su función es garantizar condiciones de operación seguras; y Programas de Prerrequisitos (PPR), cuando se relacionan con condiciones básicas de infraestructura, gestión o

mantenimiento. Esta clasificación permitió priorizar recursos y establecer controles más rigurosos en las etapas de mayor impacto sanitario.

Tabla 14.

Clasificación de medidas preventivas.

Peligro identificado	Medida preventiva	Clasificación	Justificación
E. coli	Desinfección adecuada cloración.	PCC	Control microbiológico crítico; se debe mantener por debajo del límite legal y con monitoreo continuo.
Cámara de mezcla Exceso de clorito	Dosificación ajustada, monitoreo de clorito.	PCC	Riesgo químico si hay sobredosificación; requiere control con límites críticos y monitoreo.
Hierro	Ajuste de coagulación y limpieza de filtros	PPR-Op	Afecta solo la aceptabilidad del agua; no representa peligro para la salud.
Arsénico	Decantación y carbón activo/regeneración	PCC	Contaminante químico peligroso; se debe eliminar completamente con control operativo en el tratamiento.

Peligro identificado	Medida preventiva	Clasificación	Justificación
Contaminación microbiológica por mal mantenimiento.	Retrolavado, velocidad de filtración, revisión de filtros	PPR-Op	Etapas de reducción de sólidos y microbios; importante pero no reemplaza desinfección
Microcistinas y Clostridium en filtros	Control de algas, filtración efectiva, regeneración de carbón	PCC	Toxinas que afectan la salud; deben ser eliminadas eficazmente
Coliformes en red	Cloro residual, limpieza de depósitos, mantenimiento de redes	PCC	Indicador clave de contaminación en distribución; requiere control continuo y respuesta inmediata.
Hierro en red antigua	Sustitución progresiva y limpieza	PPR	Medida estructural general de mantenimiento de red; no requiere monitoreo específico de salud.
Roturas en red nueva	Reparaciones, detección de fugas, mantenimiento	PPR-Op	Riesgo indirecto si permite ingreso de contaminantes; se requiere vigilancia operativa.
Nitratos (pozos subterráneos)	Monitoreo y mezcla con agua tratada	PCC	Contaminante químico con riesgo grave para bebés; necesita manejo controlado.
Cloración insuficiente/nula	Supervisión y dosificación correcta de hipoclorito	PCC	Desinfección final crítica; debe garantizar la eliminación de patógenos.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de documento de la entidad.

Definición del Plan APPCC

Finalmente, se elaboró el Plan de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC), en el que se establecieron los parámetros de control, los límites de alerta y los límites críticos para cada peligro identificado. También se definieron las acciones correctivas a implementar en caso de que se superen dichos límites. Este plan incluyó parámetros relevantes como *Escherichia coli*, arsénico, cloro residual, microcistinas y nitratos, entre otros. Gracias a esta fase, se dejó estructurado un sistema de control preventivo que permite reaccionar de manera oportuna y eficiente ante cualquier desviación que pueda comprometer la calidad del agua suministrada.

Tabla 15.

Plan APPCC para los puntos críticos de control.

Peligro PCC	Parámetro de control	Límite de alerta	Límite crítico	Acción correctora
E. coli (fuente y tratamiento)	Ausencia de E. coli en agua tratada.	1–10 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	Repetir desinfección, revisar dosificación de cloro, evaluar falla en etapas previas.
Arsénico	Concentración de arsénico en agua tratada.	0,008–0,009 mg/l	0,01 mg/l (OMS)	Revisar coagulación/decantación, regenerar carbón activo, suspender suministro si no se corrige.
Cloración insuficiente/nula	Cloro residual libre.	<0,4 mg/l	<0,2 mg/l o >5 mg/l	Ajustar dosificador, verificar concentración del producto, repetir cloración, hacer purga.

Coliformes en red	Ausencia en puntos de control.	1–10 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	Revisión del sistema de distribución, cloración correctiva, limpieza de depósitos.
Microcistinas y Clostridium	Presencia de toxinas y esporas.	0,7–0,8 > µg/l	>1 µg/l microcistina -LR (OMS)	Aumentar carbón activo, revisar control de algas, detener distribución hasta corregir.
Nitratos (pozos subterráneos)	Concentración de NO ₃ ⁻ en agua tratada.	40–45 mg/l	50 mg/l (OMS)	Suspender el uso del pozo, mezclar con agua superficial, informar a la autoridad sanitaria.
Clorito– exceso en cámara de mezcla.	Concentración de clorito en agua tratada.	0,6–0,7 mg/l	0,7 mg/l(OMS)	Reducir dosificación de dióxido de cloro, verificar reactivos, ajustar mezcla, reforzar monitoreo.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de documento de la entidad.

La elaboración del PSA permitió identificar peligros biológicos (coliformes, *E. coli*), químicos (arsénico, nitratos, pesticidas) y físicos (turbidez, color), clasificándolos en función de su probabilidad y consecuencia. Este ejercicio permitió priorizar riesgos críticos, como la contaminación microbiológica en la fuente y la cloración insuficiente en la red.

El Decreto 1575 de 2007 (Ministerio de la Protección Social, 2007) establece que todo prestador debe implementar planes de contingencia para garantizar la inocuidad del agua. El PSA responde directamente a esta exigencia al estructurar medidas preventivas, correctivas y de control. Teniendo en cuenta que la (Resolución 2115 de 2007) establece valores máximos permisibles que, en algunos casos simulados (turbidez y color >90 % de incumplimiento), resultaron superados, lo que valida la importancia del plan como mecanismo de prevención.

Siguiendo buenas prácticas operativas, sugieren incorporar la metodología de la OMS (World Health Organization., 2011), que considera al PSA como la herramienta más efectiva para gestionar riesgos de manera integral, entre las medidas operativas destacadas se encuentran la calibración de equipos de dosificación, el mantenimiento preventivo de filtros, la protección de la cuenca de captación y la capacitación continua del personal.

Proyecto “el reto” reto 2: Estudio de diseño básico de tratamiento para una ETAP

Este trabajo se enfocó en el diseño y optimización de una planta de tratamiento de agua, con énfasis en la flexibilidad operativa y la eficiencia en el uso de recursos. Los principales aspectos abordados son:

Diseño de dos líneas de tratamiento paralelas para las fases críticas del proceso (tratamiento fisicoquímico, incluyendo cámaras de mezcla y decantación) enfocadas en mejorar la versatilidad operativa y facilitar las tareas de mantenimiento sin interrumpir el servicio.

Dimensionamiento de almacenamiento de productos químicos para las líneas de agua y lodos, considerando un stock de 20 días, asegurando la continuidad del tratamiento y reduciendo la frecuencia de reabastecimiento.

Diseño de sistemas de filtración (arena y carbón activo) con múltiples unidades, capaces de manejar el caudal total de diseño incluso cuando una unidad está en fase de lavado para garantizar la eficiencia continua del proceso de filtración.

Desarrollo de un sistema de recuperación de aguas provenientes de limpiezas de filtros y vaciados, incluyendo el dimensionamiento de un tanque de regulación y bombeo para su reincorporación al tratamiento fisicoquímico, mejorando así la eficiencia en el uso del agua y reduciendo el desperdicio.

En general, como solución a los requerimientos planteados, se diseñaron dos líneas de tratamiento independientes para las fases de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo flexibilidad operativa y mantenimiento sin afectar la continuidad del proceso. Cada línea incluye:

Oxidación: aplicación de hipoclorito de sodio para eliminar metales pesados y microorganismos.

Coagulación y Floculación: cámaras de mezcla rápida, coagulación y floculación diseñadas para optimizar la formación de flóculos.

Sedimentación: decantadores dimensionados para garantizar una eficiente separación de sólidos.

Además, se calcularon las necesidades de almacenamiento de productos químicos, filtración con medios de arena y carbón activado, y un sistema de recuperación y bombeo de aguas de retro lavado. El diseño garantiza una capacidad de 12000 m³/día, asegurando operación continua incluso en caso de mantenimiento de una línea.

El diseño propuesto para la ETAP, basado en dos líneas paralelas de tratamiento, almacenamiento estratégico de químicos, filtración de múltiples unidades, recuperación de aguas de lavado y gestión de lodos, se ajusta a los lineamientos del 1575 de 2007 (Ministerio de la Protección Social, 2007) garantizando continuidad, seguridad y eficiencia en la operación, así mismo y conforme a la OMS, reflejan la aplicación de buenas prácticas operativas como la redundancia de procesos, el monitoreo en línea, el mantenimiento preventivo y el uso eficiente de los recursos, asegurando así un sistema sostenible y confiable para el suministro de agua potable.

ACTIVIDADES DE APOYO EN LA PTAP

ELABORACIÓN DE INFORMES MENSUALES DE CALIDAD DE LA RED:

Para la elaboración de los informes mensuales de calidad de la red, se recopiló y analizó la información obtenida a partir de las muestras de agua tomadas en diferentes puntos de la red de distribución en la ciudad de Tunja. Estas muestras eran enviadas al laboratorio de la PTAP para su correspondiente análisis.

Se manejaron tres tipos de muestras, cada una con una frecuencia y conjunto de parámetros específicos:

Muestras diarias: se analizaron los parámetros fundamentales para el control de calidad del agua, tales como turbiedad, color aparente, pH, cloro residual, coliformes totales y *Escherichia coli*.

Muestras semanales: además de los parámetros diarios, se evaluaron hierro total, aluminio, dureza total, sulfatos, cloruros, alcalinidad total, nitritos y nitratos.

Muestras mensuales: se incluyó un análisis más detallado con parámetros adicionales como calcio, fosfatos, manganeso, molibdeno, magnesio, zinc, fluoruros, carbono orgánico total (COT), entre otros.

Una vez recibidos los resultados de laboratorio, estos eran organizados en los formatos dispuestos por la empresa, facilitando su interpretación y análisis. Finalmente, toda esta información se consolidaba en el informe mensual de calidad de la red.

SEGUIMIENTO AL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS DE LA PTAP:

El seguimiento al sistema de tratamiento de lodos en la PTAP se llevó a cabo a través de los datos resultantes de la toma y análisis periódico de muestras, con el objetivo de evaluar su eficiencia en la reducción de contaminantes presentes en el lodo generado durante el proceso de potabilización. Mensualmente, se realizaban dos tomas de muestra en el sistema de tratamiento de lodos:

- 1. Muestra de entrada:** representativa del lodo antes de ingresar al sistema de tratamiento.
- 2. Muestra clarificada:** obtenida después de que el lodo pasaba por el proceso de tratamiento.

Estas muestras eran tomadas dos veces al mes y enviadas al laboratorio de la PTAP, donde se realizaban los análisis correspondientes. Una vez recibidos los reportes de laboratorio, los datos obtenidos eran registrados en los formatos dispuestos por la empresa los parámetros analizados incluían: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, Aluminio y hierro total.

Con los valores registrados, se procedía a calcular los porcentajes de eficiencia del sistema de tratamiento, determinando en qué medida se lograba la reducción de los parámetros mencionados.

CONCLUSIONES

La pasantía en la PTAP de Veolia permitió afianzar los conocimientos teóricos adquiridos en la formación académica, al ser aplicados en un entorno real de operación de una planta de tratamiento de agua potable, fortaleciendo así las competencias técnicas y profesionales.

Se comprobó la relevancia del monitoreo constante y riguroso de parámetros de calidad del agua como turbiedad, pH, cloro residual y color, los cuales permiten garantizar el cumplimiento de la normatividad vigente y la protección de la salud pública.

La interacción con el equipo operativo evidenció la importancia del trabajo colaborativo, la comunicación efectiva y la adecuada transmisión de información entre turnos, factores esenciales para la continuidad del servicio y la prevención de errores.

Se identificaron oportunidades de mejora en la sistematización de datos y la gestión documental, especialmente en lo referente al registro de resultados de laboratorio, reportes operativos diarios y mantenimiento de equipos, lo cual podría optimizar la trazabilidad y eficiencia operativa.

El conocimiento detallado de las etapas del proceso (captación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección) permitió reconocer la interdependencia entre cada una de ellas y cómo una falla o variación en una etapa afecta todo el sistema.

La experiencia en campo permitió constatar que la gestión ambiental de la planta debe fortalecerse, particularmente en el manejo de residuos, lodos y vertimientos, buscando minimizar el impacto ambiental y cumplir con las exigencias regulatorias.

Se destacó la importancia del compromiso institucional con la mejora continua y la innovación tecnológica, aspectos que inciden directamente en la eficiencia, sostenibilidad y confiabilidad del sistema de abastecimiento de agua potable.

Para el proyecto de generación de hipoclorito en sitio, aunque el análisis determinó que la implementación de esta alternativa no era viable económicamente frente a la situación actual, el estudio permitió comprender en profundidad los factores técnicos, operativos y financieros involucrados, este desarrollo fue altamente valioso, ya que sentó las bases para futuras evaluaciones más sólidas y orientadas a la sostenibilidad.

En el diseño del dashboard una herramienta digital dinámica facilitó el análisis detallado del comportamiento de la calidad del agua en la red, permitiendo visualizar datos clave en tiempo real, representa un aporte significativo para la toma de decisiones, ya que permite detectar tendencias, anticipar desviaciones y mejorar la respuesta operativa.

Por último, el análisis de los casos problema que podrían afectar la operación de la planta fue un ejercicio estratégico que fortalece la capacidad de respuesta ante eventos no previstos, aunque estos escenarios no se han presentado hasta el momento, contar con posibles soluciones y líneas de acción anticipadas resulta fundamental para la gestión proactiva del sistema.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que, en el marco del proyecto de implementación de hipoclorito, la empresa realice un estudio de viabilidad más detallado que contemple no solo los costos de adquisición, sino también los costos de mantenimiento a largo plazo, las condiciones de garantía ofrecidas por los proveedores y el retorno esperado de la inversión. Este análisis permitiría seleccionar la opción tecnológica más sostenible y eficiente, tanto en términos económicos como operativos, contribuyendo a la toma de decisiones informadas y sostenibles en el tiempo.

Como resultado del análisis, se propone a la empresa implementar estas alternativas de manera gradual, iniciando con una fase piloto que permita evaluar su efectividad en condiciones reales de operación y realizar los ajustes necesarios en los procesos internos. La integración progresiva de soluciones tecnológicas en la PTAP no solo optimizaría la calidad y continuidad del servicio de acueducto en Tunja, sino que también fortalecería la posición de Veolia como líder regional en innovación y gestión sostenible del recurso hídrico.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo en línea de parámetros clave de calidad del agua, como cloro residual, turbidez y pH, integrados a una plataforma de control SCADA, esto facilitaría una respuesta más rápida ante desviaciones y mejoraría la trazabilidad de los procesos.

Actualmente, en la planta no se les da ningún aprovechamiento a los lodos generados, sería recomendable realizar estudios para evaluar posibles alternativas de valorización, como su uso en la fabricación de materiales de construcción ladrillos o bloques, en procesos de compostaje como restaurador de suelos no agrícolas o en la recuperación de suelos degradados, teniendo en cuenta análisis fisicoquímicos y microbiológicos que confirmen su viabilidad y seguridad ambiental.

Se recomienda evaluar la viabilidad de implementar procesos de aprovechamiento energético de los lodos generados en la PTAP, como la digestión anaerobia para la producción de biogás. Este biogás podría emplearse para suplir parcialmente las necesidades energéticas de la planta (por ejemplo, calefacción de procesos o generación eléctrica a pequeña escala). Esta alternativa permitiría reducir la dependencia de energía externa, disminuir costos operativos y aprovechar un subproducto que actualmente se dispone sin valorización, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y economía circular de la empresa.

Se recomienda desarrollar programas de educación ambiental y participación comunitaria que sensibilicen a los usuarios sobre el uso racional del agua, la protección de las fuentes hídricas y la aplicación de buenas prácticas domésticas, promoviendo así la corresponsabilidad ciudadana en la sostenibilidad del servicio. Igualmente, es clave implementar estrategias de adaptación al cambio climático, considerando los escenarios de variabilidad hídrica que pueden comprometer la disponibilidad y calidad del agua cruda; dentro de estas medidas se destacan la diversificación de fuentes de abastecimiento, el monitoreo de caudales en periodos de sequía o lluvias extremas y la actualización periódica de planes de contingencia. Finalmente, se sugiere fomentar la innovación tecnológica mediante alianzas con universidades y centros de investigación, que permitan probar materiales filtrantes alternativos, sensores de bajo costo y sistemas de tratamiento avanzados, garantizando que la planta se mantenga a la vanguardia en términos de eficiencia, resiliencia y sostenibilidad.

Finalmente se recomienda crear espacios de retroalimentación entre pasantes y profesionales de la planta, que fortalezcan el aprendizaje práctico, asimismo se sugiere fomentar su participación en cursos y capacitaciones sobre tratamiento de agua y gestión ambiental, para complementar la experiencia adquirida.

REFERENCIAS

Acciona. (S.f). Potabilización del agua: procesos y tecnologías.
<https://www.acciona.com/es/tratamiento-de-agua/potabilizacion>

Aconsa. (S.f). Parámetros físicos de calidad del agua. <https://aconsa-lab.com/parametros-fisicos-de-calidad-del-agua/>

ALazor, L. (S.f). <https://www.laboratorioalazor.com/que-es-analisis-microbiologico-del-agua/>

Alcaldía de Santiago de Cali . (11 de 09 de 2024). EMCALI genera desinfectante ‘in situ’ para optimizar la calidad del agua y eficiencia operativa:

<https://www.cali.gov.co/serviciospublicos/publicaciones/182828/emcali-genera-desinfectante-in-situ-para-optimizar-la-calidad-del-agua-y-eficiencia-operativa/>

ATSDR. (2016). Hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio. Centers for Disease Control and Prevention (CDC): https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts184.html

Baeza Gomez, E. (2016). Calidad del agua. 11. <https://doi.org/https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>

Carbotecnia. (24 de Agosto de 2023). ¿Qué es la cloración? Método de desinfección de agua. https://www.carbotecnia.info/que-es-la-cloracion/?utm_source=chatgpt.com

Colombia, Congreso de la República de. (1994). Función Pública. Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y otras disposiciones: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Decreto 1076 de 2015. (s.f.). Decreto 1076 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Durgun, Y. (2024). Real-time water quality monitoring using AI-enabled sensors: Detection of contaminants and UV disinfection analysis in smart urban water systems. ScienceDirect, 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103409>

Ecopetrol. (27 de Mayo de 2025). Eficiencia operativa en el manejo del agua. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/gestion-integral-del-agua/manejo-agua>

Kyocera. (S.f.). <https://www.kyoceradocumentsolutions.es/es/smarter-workspaces/business-challenges/procesos/dashboard-y-su-significado-estrategico.html>

Meter, B. (S.f.). Monitoreo de parámetros de calidad del agua: cloro. Badger Meter: https://www.badgermeter.com/es-us/parametros-monitoreo-calidad-agua/cloro/?utm_source=chatgpt.com

Ministerio de la Protección Social. (2007). Función Pública. Decreto 1575 de 2007: Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2020). Resolución 622 de 2020. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20622%20de%202020.pdf

Nieto Cañarte, C. A., Velez Ruiz, M. C., Jimenez Icaza , M. G., & Suarez Barzola , K. N. (2024). Evaluación de la calidad del agua en la red pública urbana del cantón Valencia, provincia de Los Ríos, Ecuador. Revista social fronteriza , 1-31. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(4\)e335](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(4)e335)

Organizacion Mundial de la Salud . (2011). Guías para la calidad del agua potable: Incorporación del enfoque de planes de seguridad del agua. OMS: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

PQP, P. (S.f.). Cloro gaseoso. PQP Profesional: <https://pqpprofesional.com/product/cloro-gaseoso/>

Resolucion 2115 de 2007 . (s.f.). Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y ministerio de proteccion social .

<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>

Resolucion 330 de 2017. (s.f.). Ministerio de vivienda, ciudad y territorio Republica de Colombia.

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>

Tovar, J., Barriola, J., Perez, M., & Rosales, S. (2024). Desarrollo de un Sistema de Supervisión y control para un Generador Electroquímico de Hipoclorito de Sodio in-situ. 1-8.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2009). United States Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations: Disinfectants and disinfection byproducts: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>

veolia Aguas de Tunja . (S.f). Veolia Aguas de Tunja . Veolia Latinoamerica: https://www.latinoamerica.veolia.com/es/nuestras-oficinas/veolia-aguas-tunja?utm_source=chatgpt.com

Veolia. (s.f). Desinfección de agua mediante electrólisis salina OSG Hydrex®. https://www.veoliawatertechnologies.com/en/services/disinfection-salt-electrolysis-osg-hydrex?utm_source=chatgpt.com

VEOLIA. (S.f). Nuestra historia en Tunja. Veolia Aguas de Tunja: <https://www.tunja.veolia.co/nosotros/quienes-somos/historia-tunja>

Veolia. (S.f). Veolia Environnement. <https://www.veolia.com/en/our-media/press-releases/h1-2025-results>

World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality.
<https://iris.who.int/handle/10665/44584>

ANEXOS

- Informe técnico en Excel Proyecto de hipoclorito (anexo 1)
- Documento en pdf Dashboard (anexo 2)
- Documento en pdf proyecto el reto 1(anexo 3)
- Documento en pdf Proyecto el reto 2(anexo 4)
- Video conciencia ambiental (anexo 5)

