



**Optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales en la Planta de  
Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín mediante  
estrategias de control y fortalecimiento biológico**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Ambiental**

**Valentina García Álvarez**

**Alejandro de Jesús Molina González**

**Ingeniero Sanitario**

**Corporación Universitaria Lasallista**

**Facultad de ingenierías**

**Ingeniería ambiental**

**Caldas, Antioquia**

**2026**

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a mi hermano, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo, inspiración y fortaleza. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, por su amor incondicional y por el esfuerzo constante que realizaron para que hoy pueda cumplir este sueño de convertirme en profesional. Este logro también es de ustedes.

Extiendo mi gratitud a todos mis docentes, quienes durante mi formación académica me brindaron conocimientos fundamentales y herramientas valiosas para mi crecimiento personal y profesional. Cada una de sus enseñanzas contribuyó a la realización de este proyecto y a la construcción de la profesional que hoy soy.

De manera especial, agradezco a mi jefe y tutor de práctica, por brindarme la oportunidad de realizar mi proceso formativo en una empresa tan prestigiosa como Bimbo. Su paciencia, guía y dedicación fueron esenciales para que adquiriera las competencias técnicas y operativas que fortalecieron significativamente mi aprendizaje durante estos seis meses.

## Resumen

El presente trabajo de grado tiene como finalidad optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín, mediante la implementación de estrategias de control y el fortalecimiento biológico, orientadas a incrementar la eficiencia operativa y garantizar la calidad del efluente tratado.

Para el desarrollo de la investigación se adoptó una metodología aplicada de carácter descriptivo, que incluyó la revisión y el seguimiento sistemático de parámetros fisicoquímicos clave pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED), demanda química de oxígeno (DQO) y cloruros en diferentes puntos de control: homogenizador de entrada, salida del tratamiento fisicoquímico y salida del reactor biológico.

Asimismo, se diseñó una estrategia de estabilización basada en el control de cloruros y la optimización del tiempo de maduración de los floculantes, con el objetivo de reducir baches operativos recurrentes y mejorar la eficiencia del sistema. Paralelamente, se implementaron acciones de fortalecimiento biológico orientadas a mejorar la actividad, estabilidad y resiliencia de la biomasa en los procesos de depuración.

Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en la estabilidad de los procesos, mayor uniformidad en los parámetros de control y una reducción en los periodos de inestabilidad operativa, lo cual repercute positivamente en la calidad del efluente y en la sostenibilidad del sistema.

En conclusión, la integración de estrategias de control operativo y de fortalecimiento biológico constituye una herramienta efectiva para optimizar el desempeño de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, asegurando tanto el cumplimiento normativo como la reducción de riesgos ambientales asociados a la descarga de vertimientos.

**Palabras clave:** Tratamiento de aguas residuales, control de cloruros, optimización de procesos.re

## Abstract

The present undergraduate thesis aims to optimize the wastewater treatment process at the Non-Domestic Wastewater Treatment Plant (PTARnD) of Bimbo Medellín through the implementation of control strategies and biological strengthening, focused on increasing operational efficiency and ensuring the quality of the treated effluent.

For the development of the research, an applied descriptive methodology was adopted, which included the review and systematic monitoring of key physicochemical parameters pH, temperature, total suspended solids (TSS), settleable solids (SS), chemical oxygen demand (COD), and chlorides at different control points: inlet homogenizer, outlet of the physicochemical treatment, and outlet of the biological reactor.

Additionally, a stabilization strategy was designed based on chloride control and the optimization of the flocculant maturation time, with the objective of reducing recurrent operational upsets and improving system efficiency. In parallel, biological strengthening actions were implemented to enhance the activity, stability, and resilience of the biomass involved in the treatment processes.

The results obtained show significant improvements in process stability, greater uniformity in control parameters, and a reduction in periods of operational instability, which positively impacts the effluent quality and the sustainability of the system.

In conclusion, the integration of operational control strategies and biological strengthening represents an effective tool to optimize the performance of industrial wastewater treatment plants, ensuring both regulatory compliance and the reduction of environmental risks associated with wastewater discharge.

**Keywords:** wastewater treatment, chloride control, process optimization.

## Tabla de contenido

Agradecimiento .....	2
Resumen.....	3
Abstract .....	4
Índice de ilustraciones .....	7
Índice de tablas .....	8
Introducción .....	9
Planteamiento del problema.....	11
Justificación.....	14
Objetivos .....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	16
Alcance y limitaciones.....	17
Limitaciones.....	18
Marco teórico .....	19
Tratamiento de aguas residuales industriales.....	19
Procesos biológicos en el tratamiento de agua .....	19
Impacto de grasas, aceites y sales en el reactor biológico .....	20
Coagulación, floculación y etapas fisicoquímicas .....	20
Reúso del agua tratada en la industria alimentaria y sostenibilidad .....	20
Marco de sostenibilidad y economía circular .....	20
Metodología .....	22
Enfoque y diseño del estudio .....	22
Frecuencia de muestreo y número de datos .....	22
Lugar de realización de los análisis .....	22
Normas técnicas y protocolos de referencia .....	23
Criterios operativos y toma de decisiones .....	23
Descripción del área de estudio .....	24
Homogenización y tamizado: .....	25
Tratamiento fisicoquímico:.....	26
Tratamiento biológico:.....	27

Sedimentación primaria y almacenamiento del efluente tratado: .....	27
Población y muestra: .....	28
VARIABLES DE ESTUDIO .....	30
Instrumentos y materiales .....	30
Procedimiento .....	31
Validez y confiabilidad .....	31
Resultados .....	32
Parámetros fisicoquímicos antes y después de la optimización del sistema.....	32
Comparativo de parámetros fisicoquímicos.....	32
Variabilidad temporal del proceso .....	35
Ajuste de maduración del floculante.....	35
Dosificación de urea y ácido fosfórico .....	36
Determinación de cloruros .....	38
Comparación de resultados con límites normativos .....	40
Evidencia visual del proceso.....	40
Análisis microbiológico del reactor biológico .....	42
Conclusiones y recomendaciones .....	46
Bibliografías.....	49

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Diseño metodológico del estudio.....	24
Ilustración 2. Fotografía de la Planta de Tratamiento de Agua Residual no Doméstica (PTARnD).....	25
Ilustración 3. Fotografía del tanque equalizador de entrada y el sistema de cribado.....	26
Ilustración 4. Fotografía de la GEM y el tanque alimentador.....	26
Ilustración 5. Fotografía del reactor aerobio.....	27
Ilustración 6. Fotografía tanque sedimentador y tanque agua de reúso.....	28
Ilustración 7. Fotografía del homogenizador de entrada (afluente bruto). ....	29
Ilustración 8. Fotografía de la salida del tratamiento fisicoquímico.....	29
Ilustración 9. Fotografía de la salida del reactor biológico (efluente tratado).....	30
Ilustración 10. Incorporación tanque auxiliar de floculante aniónico.....	36
Ilustración 11. Fotografía y muestra del tanque reactor aerobio (color anaranjado).....	37
Ilustración 12. Fotografía y muestra del tanque reactor aerobio (color gris).....	37
Ilustración 13. Fotografía muestra del tanque reactor aerobio (color café).....	38
Ilustración 14. Fotografía muestra (10 mL) + agua destilada (90mL) + K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> (1ml).....	39
Ilustración 15. Fotografía muestra (10 mL) + agua destilada (90mL) + K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> (1ml) + titulación con AgNO <sub>3</sub> 0,0282 N.....	39
Ilustración 16. Fotografía muestra de agua tanque equalizador con sólidos de 20.000.....	41
Ilustración 17. Fotografía muestra de agua del efluente tratado con sólidos de 134.....	42
Ilustración 18. Observación microscópica del reactor biológico (40x). Se aprecian flóculos y bacterias dispersas.....	43
Ilustración 19. Observación microscópica del reactor biológico (100x). Se observan bacterias filamentosas y células cocoides. ....	44
Ilustración 20. Foaming en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas .....	45

### Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros del homogenizador (antes). Elaboración propia. ....	32
Tabla 2. Parámetros a la salida del fisicoquímico. Elaboración propia. ....	33
Tabla 3. Parámetros a la salida del reactor aerobio. Elaboración propia. ....	33
Tabla 4. Parámetros homogenizador de entrada (después). Elaboración propia. ....	33
Tabla 5. Parámetros a la salida del fisicoquímico. Elaboración propia. ....	33
Tabla 6. Parámetros a la salida del reactor aerobio. Elaboración propia. ....	34
Tabla 7. Seguimiento cloruros. Elaboración propia.....	40
Tabla 8. Comparación de parámetros finales vs límites normativos. ....	40
Tabla 9. Datos y valores obtenidos de test de jarras. Elaboración propia. ....	42

## Introducción

El agua es uno de los recursos más esenciales para el desarrollo de las actividades humanas e industriales, y su gestión adecuada constituye un reto fundamental en el marco de la sostenibilidad ambiental. A nivel mundial, la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2023) estima que más del 80 % de las aguas residuales generadas por las actividades humanas son vertidas sin tratamiento adecuado, lo que incrementa los riesgos para la salud pública, la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos. En Colombia, este panorama se hace especialmente crítico en sectores como el de alimentos, donde el consumo intensivo de agua y la generación de cargas contaminantes representan un desafío significativo para las empresas que buscan cumplir la normativa ambiental vigente y, a la vez, fortalecer sus políticas de sostenibilidad.

En este contexto, la industria de alimentos se ve obligada a implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales cada vez más eficientes, no solo para garantizar el cumplimiento regulatorio, sino también para contribuir a la protección de los recursos hídricos y reducir el impacto ambiental de sus procesos productivos. Sin embargo, las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales enfrentan limitaciones operativas frecuentes, como variaciones en la calidad del afluente, inestabilidades en los procesos biológicos y fisicoquímicos, y altos costos asociados al mantenimiento. Estos factores dificultan la operación continua y efectiva, generando periodos de ineficiencia que comprometen la calidad del efluente final.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín constituye un caso representativo de este reto. La empresa, reconocida internacionalmente en el sector de alimentos, ha asumido un compromiso con la sostenibilidad ambiental y la mejora de sus procesos internos. Sin embargo, durante la operación de la PTARnD se han identificado situaciones como baches operativos, dificultades en el control de cloruros, variaciones en los parámetros de depuración y episodios de desestabilización biológica, que afectan tanto la eficiencia del sistema como la estabilidad de la biomasa encargada del tratamiento biológico. Dichas problemáticas evidencian la necesidad de diseñar estrategias integrales que permitan optimizar el desempeño de la planta, reduciendo riesgos ambientales y mejorando la calidad de los vertimientos.

La relevancia de este trabajo se enmarca en tres dimensiones principales: ambiental, social y empresarial. Desde la perspectiva ambiental, la investigación contribuye a la conservación del

recurso hídrico, al cumplimiento de la normatividad nacional (Resolución 0631 de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y a la mitigación de impactos negativos sobre los cuerpos receptores. En el ámbito social, promueve una cultura de sostenibilidad que fortalece la confianza de la comunidad frente al compromiso de la empresa con la protección del entorno. Finalmente, desde el enfoque empresarial, la optimización del proceso de tratamiento favorece un uso más eficiente de los recursos, reduce costos de operación y mantenimiento, y se alinea con los objetivos de responsabilidad social corporativa de Bimbo.

En este sentido, el objetivo general del estudio es optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la PTARnD de Bimbo Medellín mediante la aplicación de estrategias de control y fortalecimiento biológico, con el fin de incrementar la eficiencia operativa y garantizar la calidad del efluente. Para alcanzar este propósito, se establecieron tres objetivos específicos: (1) monitorear diariamente los parámetros pH, temperatura, SST, SSED, DQO y cloruros en diferentes puntos de control del sistema; (2) diseñar una estrategia de estabilización mediante el control de cloruros y la optimización del tiempo de maduración de los floculantes, con el fin de reducir baches operativos y mejorar la eficiencia del tratamiento; y (3) implementar acciones biológicas que favorezcan la actividad, estabilidad y resiliencia de la biomasa en los procesos de depuración.

## Planteamiento del problema

El agua, como recurso vital, desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad ambiental, el bienestar social y el desarrollo económico. Sin embargo, la creciente presión sobre los recursos hídricos a nivel mundial plantea un desafío significativo: la disponibilidad y calidad del agua se ven comprometidas por el aumento de la población, la urbanización, la industrialización y los efectos del cambio climático. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2022), aproximadamente 2,3 mil millones de personas viven en países con estrés hídrico, y más del 80 % de las aguas residuales generadas a nivel global se descargan en el medio ambiente sin tratamiento adecuado. Esta situación evidencia la necesidad de implementar tecnologías y estrategias de tratamiento más eficientes, que garanticen el uso sostenible del recurso y la mitigación de impactos ambientales.

En el contexto colombiano, el manejo de las aguas residuales constituye un desafío prioritario en la agenda ambiental. El país genera un volumen considerable de vertimientos industriales, los cuales aportan cargas contaminantes con alta variabilidad y complejidad, dificultando su depuración (IDEAM, 2020). El sector de alimentos, particularmente, se caracteriza por su elevado consumo de agua y la generación de efluentes con altas concentraciones de materia orgánica, grasas, sólidos suspendidos y sales. Estos vertimientos, de no ser tratados adecuadamente, representan riesgos ambientales significativos, tales como la eutrofización de cuerpos receptores, la alteración de ecosistemas acuáticos y el deterioro de la calidad del agua utilizada por las comunidades aledañas.

La empresa Bimbo, líder global en la industria de alimentos, cuenta con un compromiso institucional frente a la sostenibilidad y el cumplimiento normativo. En su planta de Medellín, se implementó una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD), cuyo objetivo es garantizar la depuración de los vertimientos generados en los procesos de producción antes de su descarga al medio ambiente. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados, la operación de la PTARnD ha presentado desafíos recurrentes que afectan la eficiencia del sistema. Entre ellos, se destacan las variaciones en la calidad del afluente, la inestabilidad de la biomasa en el reactor biológico, dificultades en el control de cloruros y periodos de desestabilización que generan “baches” operativos, comprometiendo el cumplimiento de los parámetros de vertimiento

exigidos por la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La literatura científica respalda que los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales enfrentan retos similares a los observados en la PTARnD de Bimbo Medellín. Diversos estudios han evidenciado que la variabilidad de las cargas contaminantes y los cambios abruptos en la composición del afluente reducen la resiliencia de los procesos biológicos, generando disminuciones en la eficiencia de remoción de contaminantes (Metcalf & Eddy, 2016; Tchobanoglous et al., 2014). Asimismo, investigaciones recientes destacan que la implementación de estrategias de control operativo y de fortalecimiento biológico puede contribuir significativamente a mejorar la estabilidad del sistema y a prolongar la vida útil de la biomasa activa (García et al., 2021; López & Ramírez, 2020). No obstante, persisten vacíos relacionados con la integración práctica de dichas estrategias en plantas industriales específicas, particularmente en contextos productivos del sector alimentario en Colombia.

De esta manera, se plantea el siguiente problema de investigación: **¿cómo optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la PTARnD de Bimbo Medellín mediante la aplicación de estrategias de control y fortalecimiento biológico, que permitan incrementar la eficiencia operativa y garantizar la calidad del efluente tratado?** Esta pregunta busca orientar el estudio hacia la identificación y aplicación de soluciones prácticas que reduzcan la inestabilidad de los procesos, aseguren el cumplimiento normativo y aporten a la sostenibilidad de la planta en el largo plazo.

El alcance de la investigación se centra en el análisis, monitoreo e intervención del proceso de depuración en la PTARnD de Bimbo Medellín durante el período de prácticas profesionales, delimitado al estudio de variables fisicoquímicas (pH, temperatura, SST, SSED, DQO y cloruros), al diseño de estrategias de control operativo y al fortalecimiento biológico de la biomasa. La población objeto de estudio corresponde a los efluentes industriales generados en los procesos productivos de la planta, y la unidad de análisis se constituye por el sistema de tratamiento en sus diferentes etapas: homogenizador, tratamiento fisicoquímico y reactor biológico. Esta delimitación permite enfocar la investigación en aspectos medibles y aplicables, que proporcionen resultados concretos y útiles tanto para la empresa como para el campo de la ingeniería ambiental.

En conclusión, el problema de investigación surge de la necesidad de enfrentar los retos operativos presentes en la PTARnD de Bimbo Medellín, en un contexto donde el manejo eficiente de las aguas residuales industriales resulta crucial para garantizar la sostenibilidad ambiental y la

competitividad empresarial. El estudio busca, por tanto, aportar soluciones innovadoras y prácticas que fortalezcan la gestión del recurso hídrico, contribuyendo a la reducción de riesgos ambientales y al cumplimiento de la normativa vigente en Colombia.

## Justificación

El tratamiento de aguas residuales industriales constituye un desafío fundamental para la gestión ambiental en el contexto actual, marcado por la creciente demanda de recursos hídricos y la necesidad de garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas. En sectores como el alimentario, donde el consumo de agua es elevado y la generación de vertimientos implica cargas contaminantes variables, resulta indispensable el diseño de estrategias que permitan optimizar la eficiencia de las plantas de tratamiento. En Colombia, la normativa ambiental vigente, particularmente la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece parámetros estrictos para la descarga de efluentes. El cumplimiento de esta normativa exige no solo la implementación de tecnologías adecuadas, sino también la adopción de estrategias de control que aseguren la estabilidad de los procesos en escenarios de alta variabilidad operativa.

La investigación propuesta se justifica en la medida en que aborda un problema práctico y recurrente en la PTARnD de Bimbo Medellín: la presencia de inestabilidades operativas que comprometen la eficiencia de los procesos de depuración y la calidad del efluente. Aunque existen estudios generales sobre optimización de plantas de tratamiento, se evidencia una brecha en la aplicación específica de estrategias de control y fortalecimiento biológico en el contexto industrial de alimentos en Colombia. Este vacío en la literatura científica limita la capacidad de generar soluciones contextualizadas, lo cual hace relevante y necesario el presente estudio, tanto para el campo académico como para la práctica profesional en ingeniería ambiental.

Asimismo, la pertinencia del proyecto radica en su impacto multidimensional. Desde el ámbito ambiental, contribuye a la protección de los recursos hídricos y a la reducción de riesgos asociados a la descarga de contaminantes en cuerpos receptores. Desde el enfoque empresarial, ofrece alternativas de mejora continua que favorecen la eficiencia operativa, reducen los costos de mantenimiento y fortalecen la responsabilidad social corporativa de la compañía. En el plano social, el estudio promueve una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad y a la confianza de la comunidad en las prácticas ambientales de la industria. Finalmente, desde la perspectiva académica, este trabajo aporta un caso de estudio que enriquece el conocimiento aplicado sobre el diseño e implementación de estrategias de control y fortalecimiento biológico en plantas industriales, ampliando el campo de referencia para futuras investigaciones.

Otra razón de peso para la realización del estudio es la novedad del enfoque planteado. La integración de acciones biológicas con estrategias de control operativo no ha sido suficientemente explorada en investigaciones aplicadas al sector alimentario nacional. Este carácter innovador permite no solo responder a las necesidades específicas de la PTARnD de Bimbo Medellín, sino también ofrecer un modelo replicable en otras plantas de tratamiento industriales que enfrentan problemas similares de inestabilidad y eficiencia. Al llenar este vacío, el trabajo de grado se posiciona como una contribución valiosa al avance de la ingeniería ambiental, combinando teoría y práctica en la búsqueda de soluciones efectivas.

Finalmente, las implicaciones a largo plazo del estudio refuerzan su justificación. La implementación de los resultados obtenidos no solo permitirá optimizar el desempeño de la planta en el corto plazo, sino que también establecerá bases sólidas para la gestión sostenible del recurso hídrico en el marco de la industria de alimentos. Los hallazgos podrán orientar futuras investigaciones sobre la resiliencia de los sistemas biológicos de tratamiento, así como influir en el diseño de políticas empresariales y ambientales más robustas. En este sentido, la investigación trasciende el ámbito institucional, proyectándose como un aporte a la construcción de un modelo de gestión hídrica más eficiente, sostenible y responsable con el entorno.

## Objetivos

### *Objetivo general*

- Optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín mediante la aplicación de estrategias de control y el fortalecimiento biológico, con el fin de incrementar la eficiencia operativa y garantizar la calidad del efluente.

### *Objetivos específicos*

- Monitorear diariamente los parámetros pH, temperatura, SST, SSED, DQO y cloruros en el homogenizador de entrada, salida del tratamiento fisicoquímico y salida del reactor biológico.
- Diseñar una estrategia de estabilización mediante la optimización del tiempo de maduración de floculantes, con el fin de reducir baches operativos y mejorar la eficiencia.
- Implementar acciones biológicas que favorezcan el fortalecimiento, la actividad y la resiliencia de la biomasa en los procesos de depuración.

### **Alcance y limitaciones**

El presente estudio abarca la evaluación y el fortalecimiento del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) del Grupo Bimbo, con el fin de optimizar la calidad del agua tratada para su posterior reutilización en los sanitarios de la planta. El proyecto se centra en el análisis de los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados, identificando oportunidades de mejora que permitan aumentar la eficiencia y estabilidad del sistema.

Dentro del alcance también se incluye la caracterización del agua tratada, la implementación de medidas operativas para reducir los baches en el proceso, y la propuesta de estrategias que permitan garantizar una mejor calidad del efluente final. Además, se contempla el estudio del comportamiento de la biomasa y la evaluación del desempeño de los equipos actuales.

El trabajo se desarrollará exclusivamente en la PTARnD ubicada en las instalaciones del Grupo Bimbo, durante el periodo correspondiente a la práctica profesional. Los resultados obtenidos servirán como base para la toma de decisiones y para la futura ampliación de la planta, aunque la ejecución de dichas modificaciones se proyecta para el año siguiente.

## Limitaciones

Si bien el estudio busca generar aportes significativos en la optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales, es importante reconocer algunas limitaciones que pudieron influir en el desarrollo y en la aplicabilidad de los resultados.

En primer lugar, la investigación estuvo limitada por el tiempo disponible, correspondiente al período de prácticas profesionales, lo cual restringió la posibilidad de realizar un seguimiento a largo plazo que permitiera observar la sostenibilidad de los resultados implementados durante ciclos operativos más extensos. En segundo lugar, la disponibilidad de recursos técnicos y económicos condicionó el alcance de los ensayos, ya que no se contó con acceso a equipos de laboratorio avanzados o pruebas piloto externas que hubieran permitido una caracterización más profunda del efluente y de la biomasa.

Durante el desarrollo del estudio se identificaron ciertas limitaciones que pueden influir en los resultados y en la interpretación de estos. Una de las principales dificultades está relacionada con la variabilidad en la carga contaminante del afluente, especialmente por el ingreso de grasas y aceites provenientes de la línea de panquelería, la cual impacta significativamente el comportamiento del reactor biológico. Esta situación puede alterar los parámetros de operación, dificultar la estabilidad del sistema y afectar la calidad del agua destinada al reúso.

## Marco teórico

### *Tratamiento de aguas residuales industriales*

Las industrias modernas generan grandes volúmenes de aguas residuales con características muy variables y complejas, lo que exige estructuras de tratamiento adaptadas al tipo de vertimiento. Por ejemplo, una revisión reciente señala que los efluentes industriales presentan gran diversidad en contaminantes y concentración, lo que dificulta la selección de técnicas estándar sin antes caracterizar adecuadamente el afluente (Kato & Kansha, 2024). Otro estudio sistemático revisó la gestión del agua residual industrial durante la última década y destacó que los marcos regulatorios, las innovaciones tecnológicas y los enfoques de sostenibilidad son pilares clave para una gestión eficaz, aunque persisten barreras como la infraestructura y la cooperación entre actores (Singh, Chakraborty & Sehgal, 2023). En este sentido, en plantas industriales como la Bimbo de Medellín, el tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD) se convierte en un componente esencial para asegurar que los vertimientos cumplan con la normativa ambiental colombiana y para proteger los recursos hídricos.

### *Procesos biológicos en el tratamiento de agua*

Los tratamientos biológicos (por ejemplo, lodos activados, biomasa), juegan un papel central en la depuración de contaminantes orgánicos. Sin embargo, estos procesos enfrentan desafíos cuando las cargas contaminantes fluctúan o incluyen sustancias que inhiben la biomasa (por ejemplo, grasas, aceites, sales). Una revisión sobre avances en tratamientos biológicos señala que, aunque los procesos convencionales son robustos, presentan limitaciones como alta producción de lodos, consumo energético y sensibilidad a perturbaciones del sistema (Avances en los procesos de tratamiento biológico, 2023). Por ello, se están explorando estrategias integradas que combinan métodos físicos/químicos con biológicos para mejorar la estabilidad y resiliencia del sistema (Pan et al., 2022).

Para el presente estudio, es especialmente relevante monitorear parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y cloruros, pues reflejan tanto la carga orgánica como la presencia de sales que pueden afectar la actividad biológica en el reactor.

### ***Impacto de grasas, aceites y sales en el reactor biológico***

En plantas del sector alimentario, uno de los retos operativos más habituales está asociado con cargas altas de grasas, aceites y sólidos (FOG: fats, oil & grease) que pueden generar problemas en flotación, sedimentación, inhibición de la biomasa y reducción de la eficiencia del tratamiento (Shamika et al., 2024). Además, las aguas residuales con altas concentraciones de sales o cloruros también complican los procesos biológicos al afectar la actividad microbiana y la formación del flóculo. Este tipo de condiciones particulares justifican la necesidad de estrategias de estabilización específicas, por ejemplo, tiempo de maduración de floculantes y control de cloruros como se propone en el presente trabajo.

### ***Coagulación, floculación y etapas fisicoquímicas***

Antes o en paralelo al tratamiento biológico, los procesos fisicoquímicos como coagulación y floculación permiten reducir la carga de sólidos, aceites y partículas que inhiben los procesos biológicos. En un estudio reciente se revisaron coagulantes y floculantes naturales como alternativa sostenible para efluentes industriales, destacando su eficacia y menor impacto ambiental (Natural-based coagulants/flocculants, 2023). Estas etapas también contribuyen a la estabilidad del sistema y a la mejora de la calidad del efluente destinado al reúso.

### ***Reúso del agua tratada en la industria alimentaria y sostenibilidad***

La posibilidad de reutilizar aguas ya tratadas representa una estrategia clave para la sostenibilidad hídrica de la industria alimentaria. Un análisis específico del sector de alimentos muestra que el reúso permite una reducción del consumo de agua virgen, contribuye a la economía circular y disminuye la presión sobre los recursos hídricos (Garnier, 2023). Además, un estudio del enfoque integrado en la industria alimentaria resalta que el reúso no solo requiere tratamiento técnico adecuado, sino también la consideración de factores regulatorios, aceptación social y evaluación del riesgo (Integrated Management of Industrial Wastewater in the Food Sector, 2023). Dentro del contexto de la planta de Bimbo, la implementación de un efluente tratado con calidad suficiente para reúso en sanitarios o procesos auxiliares aporta valor operacional, ambiental y económico.

### ***Marco de sostenibilidad y economía circular***

La gestión del agua residual industrial se inserta hoy en el paradigma de la economía circular, donde el vertimiento se transforma en recurso y la biodiversidad, la eficiencia hídrica y la reducción de emisiones se consideran objetivos estratégicos. Según los estudios de gestión

industrial de agua, la transición hacia modelos más sostenibles exige no solo tecnología, sino también gobernanza, innovación y cooperación multi-actor (Singh et al., 2023). En consecuencia, la mejora del proceso de tratamiento en la PTARnD de Bimbo Medellín contribuye a ese gran marco estratégico, alineándose con políticas corporativas de sostenibilidad, reducción de huella hídrica, y cumplimiento normativo.

## **Metodología**

### ***Enfoque y diseño del estudio***

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y descriptivo, ya que se fundamentó en la observación sistemática y la medición de parámetros fisicoquímicos y biológicos asociados al proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín.

El estudio se orientó hacia la optimización operativa mediante la aplicación de estrategias de control y fortalecimiento biológico, enfocadas en mejorar la eficiencia del sistema y garantizar la calidad del efluente tratado. Además, se adoptó un diseño no experimental de tipo longitudinal, dado que se trabajó con variables reales del proceso sin manipulación directa, observando su comportamiento a lo largo del tiempo.

### ***Frecuencia de muestreo y número de datos***

El monitoreo de los parámetros pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED), demanda química de oxígeno (DQO) y cloruros se realizó con una frecuencia diaria durante los días operativos de la planta, a lo largo de un periodo aproximado de seis meses. Cada parámetro fue medido de manera individual en los puntos de muestreo definidos: homogenizador de entrada, salida del tratamiento fisicoquímico (GEM) y salida del reactor biológico.

Para cada variable se recolectaron múltiples datos diarios, generando un volumen significativo de información. Sin embargo, para efectos de síntesis y claridad en la presentación de resultados, en el documento se reportan valores representativos correspondientes al inicio y al cierre del periodo de seguimiento, manteniendo como respaldo el registro completo de las mediciones realizadas.

### ***Lugar de realización de los análisis***

Las mediciones se efectuaron directamente en las instalaciones de la PTAR, específicamente en el cuarto de control y áreas operativas de la planta, con el acompañamiento y apoyo de los operarios del sistema. Los análisis de campo incluyeron mediciones directas de pH, temperatura y evaluación visual del comportamiento del proceso, mientras que las determinaciones de DQO, SST y SSED se realizaron mediante procedimientos operativos internos de la planta.

No se contó con análisis en laboratorios externos, dado que el objetivo principal del estudio

fue evaluar el desempeño operativo bajo condiciones reales de operación industrial.

### *Normas técnicas y protocolos de referencia*

La toma de muestras y el seguimiento de parámetros se realizaron considerando lineamientos generales establecidos en el Protocolo del IDEAM para el monitoreo de vertimientos, así como referencias metodológicas basadas en los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF), aplicados de manera indirecta conforme a los procedimientos internos de la planta.

Estos lineamientos permitieron garantizar la consistencia en la recolección, manejo y análisis de las muestras, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

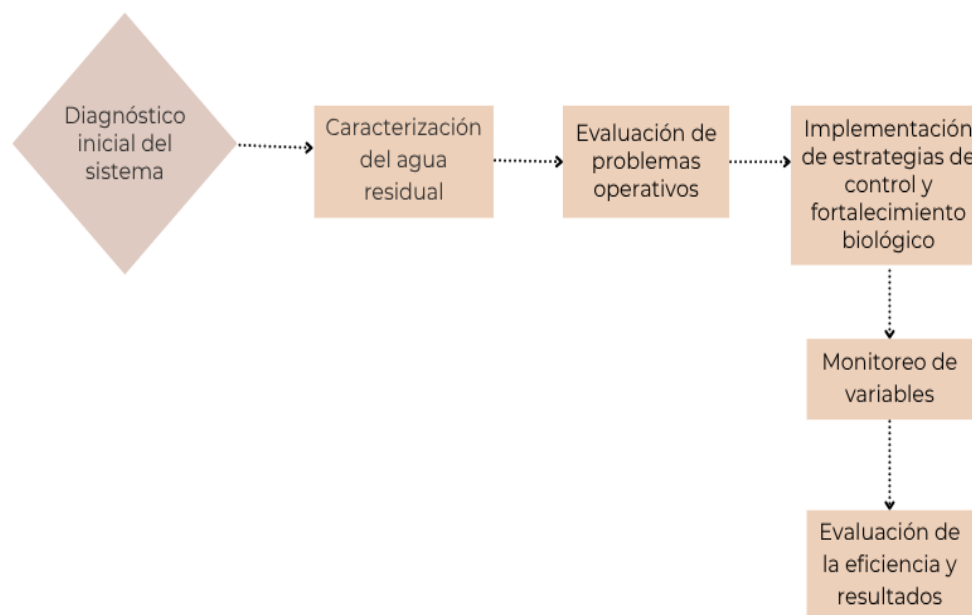
### *Criterios operativos y toma de decisiones*

Durante el seguimiento del sistema se establecieron criterios técnicos para la toma de decisiones operativas. Se consideró como indicador crítico el comportamiento de los cloruros, dado su potencial impacto sobre la actividad biológica del reactor, realizando ajustes cuando se evidenciaban incrementos sostenidos fuera de los rangos operativos establecidos por la planta.

Asimismo, se definieron como baches operativos aquellas fluctuaciones del proceso que se presentaban aproximadamente cada dos horas, alcanzando hasta seis eventos diarios antes de la optimización. Posterior a la implementación de las mejoras, estos eventos se redujeron a un rango de dos a cuatro baches por día, evidenciando una mayor estabilidad del sistema y una mejor continuidad del tratamiento.

Las decisiones relacionadas con la dosificación de floclulantes, nutrientes (urea y ácido fosfórico) y ajustes operativos se fundamentaron en el análisis conjunto de los resultados diarios y la observación del comportamiento del sistema.

En la ilustración 1, se presenta el diseño metodológico del estudio, que resume las etapas desarrolladas para evaluar y optimizar el sistema de tratamiento.



*Ilustración 1. Diseño metodológico del estudio.*

*Elaboración propia*

### ***Descripción del área de estudio***

La investigación se llevó a cabo en la PTARnD de la planta Bimbo Medellín, ubicada en el municipio de Itagüí, Antioquia. Esta planta tiene como función tratar las aguas residuales generadas en los procesos de producción alimentaria, las cuales provienen principalmente de las líneas de panificación, panquelería y lavado de equipos industriales.

La ilustración 2 muestra la entrada de la Planta de tratamiento de Agua Residual no Doméstica (PTARnD) de la planta Bimbo Medellín.



*Ilustración 2. Fotografía de la Planta de Tratamiento de Agua Residual no Doméstica (PTARnD).*

El sistema de tratamiento consta de las siguientes etapas principales:

***Homogenización y tamizado:***

Donde se recibe el agua residual y se eliminan sólidos gruesos.

La ilustración 3, muestra las unidades de homogenización y tamizado, esenciales para recibir el caudal de agua residual y remover los sólidos gruesos antes de su ingreso al sistema de tratamiento.



*Ilustración 3. Fotografía del tanque ecualizador de entrada y el sistema de cribado.*

### ***Tratamiento fisicoquímico:***

Mediante coagulación floculación.

La ilustración 4, muestra el sistema de coagulación–floculación, compuesto por la unidad GEM y el tanque alimentador, donde se dosifican los reactivos químicos responsables de desestabilizar y aglomerar los contaminantes presentes en el agua residual.



*Ilustración 4. Fotografía de la GEM y el tanque alimentador.*

***Tratamiento biológico:***

A través de un reactor aeróbico donde actúa la biomasa.

La ilustración 5, presenta el reactor aeróbico en el cual la biomasa microbiana degrada la materia orgánica soluble mediante procesos biológicos dependientes de oxígeno, constituyendo la etapa central del tratamiento biológico.



*Ilustración 5. Fotografía del reactor aerobio.*

***Sedimentación primaria y almacenamiento del efluente tratado:***

Destinado al reúso en sanitarios o el lavado de la PTAR como tal o su descarga al alcantarillado, según la calidad alcanzada.

La ilustración 6, muestra el tanque sedimentador, donde los sólidos suspendidos floculados se separan por gravedad, permitiendo clarificar el agua tratada. Asimismo, se observa el tanque de almacenamiento del agua de reúso, destinado a su aprovechamiento en sanitarios, lavado de equipos o descarga al alcantarillado según la calidad obtenida.



*Ilustración 6. Fotografía tanque sedimentador y tanque agua de reúso.*

***Población y muestra:***

La población objeto del estudio corresponde a las corrientes de agua residual generadas en los procesos industriales de Bimbo Medellín, particularmente aquellas tratadas en la PTARnD.

Se trabajó con muestras compuestas tomadas en tres puntos de control definidos:

En la ilustración 7, se muestra el homogenizador de entrada que corresponde al afluente bruto que ingresa a la PTAR, antes de cualquier etapa de tratamiento. Este punto permite evaluar la calidad inicial del agua residual, caracterizar su carga contaminante y establecer la línea base para comparar la eficiencia de los procesos posteriores.

- **Punto 1:** Homogenizador de entrada (afluente bruto).



*Ilustración 7. Fotografía del homogenizador de entrada (afluente bruto).*

En la ilustración 8, se muestra la salida del tratamiento fisicoquímico que corresponde al efluente posterior a la coagulación–floculación, donde ya se han removido sólidos suspendidos, coloides y parte de la carga orgánica. Este punto permite evaluar la eficiencia del proceso fisicoquímico antes de ingresar al reactor biológico.

- **Punto 2:** Salida del tratamiento fisicoquímico.



*Ilustración 8. Fotografía de la salida del tratamiento fisicoquímico.*

En la ilustración 9, se muestra la salida del reactor biológico que corresponde al efluente tratado después del proceso aeróbico, donde la biomasa microbiana reduce de manera significativa la materia orgánica. Este punto permite determinar la calidad final del agua y verificar el cumplimiento de los criterios para su reúso o descarga.

- **Punto 3:** Salida del reactor biológico (efluente tratado).



*Ilustración 9. Fotografía de la salida del reactor biológico (efluente tratado).*

Las muestras se tomaron de forma diaria durante varios meses del período de práctica, siguiendo los procedimientos establecidos en el Protocolo de Muestreo y Análisis de la planta.

#### ***Variables de estudio***

Las variables monitoreadas fueron seleccionadas con base en su relevancia operativa y su influencia sobre la calidad del efluente. Estas incluyen:

- pH
- Temperatura (°C)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Sólidos Sedimentables (SSED)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Cloruros (mg/L)

El control de estos parámetros permitió evaluar la eficiencia del tratamiento y la estabilidad del sistema, así como correlacionar su comportamiento con las estrategias implementadas.

#### ***Instrumentos y materiales***

Para la toma y análisis de muestras se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales:

- Termómetro digital
- pH metro
- Probetas Imhoff para sólidos sedimentables.
- Equipo de laboratorio para determinación de DQO y SST (DR 900).

- Kits de análisis para cloruros: Plata Nitrato 0,0282N y Potasio Cromato Solución 5%, agitador magnético, pipeta graduada y beacker.
- Floculantes y coagulantes suministrados por proveedor 1 y proveedor 2 utilizado en los procesos de acondicionamiento de lodos y clarificación.

Los datos se registraron en hojas de control diarias y posteriormente se procesaron en hojas de cálculo para su análisis.

### ***Procedimiento***

1. Monitoreo diario: Se registraron los parámetros fisicoquímicos en los tres puntos definidos del proceso, garantizando consistencia en la hora de muestreo.
2. Evaluación del desempeño: Se compararon los resultados con los límites establecidos por la normativa ambiental colombiana (Resolución 0631 de 2015) y con los valores internos de control de la planta.
3. Implementación de estrategias: Se aplicaron medidas de estabilización, como el control de cloruros, la regulación del tiempo de maduración del floculante y el refuerzo biológico del reactor mediante la dosificación de urea y ácido fosfórico como fuente de nutrientes.
4. Observación de resultados: Se evaluaron los efectos de las estrategias sobre la estabilidad del reactor, la reducción de DQO y SST, y la calidad del agua de reúso.
5. Registro fotográfico y análisis comparativo: Se documentaron los cambios en color, sedimentación y aspecto del reactor biológico y los lodos.

### ***Validez y confiabilidad***

Para asegurar la confiabilidad de los datos:

- Las mediciones se realizaron con equipos calibrados.
- Se aplicaron los mismos procedimientos en cada punto de muestreo.
- Los resultados fueron verificados cada semana.

Esta consistencia metodológica permitió obtener resultados representativos y comparables a lo largo del periodo de estudio.

## Resultados

### *Parámetros fisicoquímicos antes y después de la optimización del sistema*

En esta sección se presenta la comparación de los principales parámetros analizados antes y después de implementar las estrategias de mejora, incluyendo la adición de un nuevo tanque de floculación, la dosificación de urea y ácido fosfórico, y el refuerzo biológico del reactor.

Durante la investigación se evaluó el comportamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín antes y después de la implementación de las mejoras en el proceso de tratamiento. Se incluyeron los resultados obtenidos en cada etapa del sistema y las acciones complementarias realizadas para optimizar la eficiencia operativa, mejorar la calidad del efluente tratado y estabilizar el proceso biológico.

### *Comparativo de parámetros fisicoquímicos*

En la siguiente tabla se presentan los valores medidos de pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED) y demanda química de oxígeno (DQO) en los puntos de muestreo antes y después de la implementación de las mejoras.

La tabla 1, presenta las características del agua residual en el homogenizador de entrada antes de la implementación de las mejoras, incluyendo los valores de pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED) y demanda química de oxígeno (DQO). Estos datos permiten establecer la calidad inicial del afluente bruto que ingresa a la PTAR.

Antes				
Homogenizador de entrada (tanque equalizador)				
pH	°C	SST	SSED	DQO
7.02	27	20.321	233	>15.000

*Tabla 1. Parámetros del homogenizador (antes). Elaboración propia.*

La tabla 2, muestra las características del efluente a la salida del tratamiento fisicoquímico (GEM), incluyendo los valores de pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED) y demanda química de oxígeno (DQO). Estos resultados permiten evaluar la eficiencia del proceso de coagulación–floculación antes de su ingreso al tratamiento biológico.

Salida fisicoquímica (GEM)
----------------------------

pH	°C	SST	SSED	DQO
7.65	26.7	390	4.1	824

*Tabla 2. Parámetros a la salida del fisicoquímico. Elaboración propia.*

La tabla 3, presenta los parámetros medidos en el efluente proveniente del reactor aeróbico, después del proceso de sedimentación. Los valores de pH, temperatura, SST, SSED y DQO permiten evaluar la calidad del agua tratada mediante procesos biológicos.

Salida reactor aerobio (sedimentador)				
pH	°C	SST	SSED	DQO
8.13	25	439	5	820

*Tabla 3. Parámetros a la salida del reactor aerobio. Elaboración propia.*

La tabla 4, muestra las características del agua residual en el homogenizador de entrada después de la implementación de las mejoras. Los valores de pH, temperatura, SST, SSED y DQO permiten comparar el afluente bruto con respecto a las condiciones iniciales y evidenciar la reducción de carga contaminante.

Después				
Homogenizador de entrada (tanque equalizador)				
pH	°C	SST	SSED	DQO
6.4	26.6	4.982	115	2.500

*Tabla 4. Parámetros homogenizador de entrada (después). Elaboración propia.*

La tabla 5, presenta los valores obtenidos en la salida del tratamiento fisicoquímico (GEM) después de las mejoras implementadas. Los parámetros analizados permiten verificar el aumento de eficiencia de la coagulación–floculación antes del ingreso al tratamiento biológico.

Salida fisicoquímica (GEM)				
pH	°C	SST	SSED	DQO
7.2	26.1	115.6	0.93	170

*Tabla 5. Parámetros a la salida del fisicoquímico. Elaboración propia.*

La tabla 6, muestra las características del efluente tratado a la salida del reactor aeróbico tras la fase de sedimentación, una vez aplicadas las mejoras. Los valores registrados permiten evaluar la estabilidad del proceso biológico y la calidad final del agua tratada.

Salida reactor aerobio (sedimentador)				
pH	°C	SST	SSED	DQO
8.04	25.3	122.2	1.4	150

*Tabla 6. Parámetros a la salida del reactor aerobio. Elaboración propia.*

Para evaluar el cumplimiento normativo, se tomaron como referencia los valores máximos permisibles en el efluente del reactor aerobio, los cuales corresponden a un rango de pH entre 5 y 9, sólidos suspendidos totales de hasta 300 mg/L, sólidos sedimentables con un límite de 3 mL/L, cloruros con un valor máximo de 250 mg/L y DQO de hasta 900 mg/L.

Los resultados muestran una disminución significativa en la concentración de SST, SSED y DQO a lo largo de las etapas del tratamiento. En el homogenizador de entrada, la DQO inicial era superior a 15.000 mg/L, mientras que después de la optimización se redujo hasta 2.500 mg/L. En el efluente del tratamiento fisicoquímico (GEM) la DQO pasó de 824 a 170 mg/L, y finalmente, en la salida del reactor aerobio, descendió hasta 150 mg/L.

Esta reducción evidencia una mejora en la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos, atribuida al ajuste de la dosificación de floculante y al fortalecimiento biológico del reactor. Asimismo, el pH del sistema se mantuvo dentro del rango óptimo para la actividad microbiana, entre 7,0 y 8,1.

### ***Eficiencia de remoción de contaminantes***

Con el fin de evaluar cuantitativamente el impacto de las mejoras implementadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín, se calculó el porcentaje de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos comparando los valores registrados al inicio y al final del periodo de prácticas.

En el homogenizador de entrada, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presentó una disminución desde valores superiores a 15.000 mg/L hasta aproximadamente 2.500 mg/L, lo que representa una reducción mínima estimada del 83 % de la carga orgánica. De manera similar, los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se redujeron de 20.321 mg/L a 4.982 mg/L, equivalente a una disminución aproximada del 75,5 %, evidenciando una reducción significativa de la carga

particulada antes del ingreso al tratamiento fisicoquímico.

En la salida del tratamiento fisicoquímico (GEM), la DQO disminuyó de 824 mg/L a 170 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción cercana al 79 %, mientras que los SST pasaron de 390 mg/L a 115,6 mg/L, correspondiente a una reducción aproximada del 70 %. Estos resultados confirman la mejora en la eficiencia del proceso de coagulación–floculación tras la optimización del tiempo de maduración de los floculantes.

Por su parte, en la salida del reactor aeróbico, la DQO se redujo de 820 mg/L a 150 mg/L, lo que representa una remoción cercana al 82 %, evidenciando un fortalecimiento del desempeño biológico del sistema y una mayor estabilidad del proceso de depuración.

### ***Variabilidad temporal del proceso***

Aunque el monitoreo de los parámetros pH, temperatura, SST, SSED, DQO y cloruros se realizó de manera diaria durante un periodo aproximado de seis meses, para efectos de síntesis se presentan en este documento los valores representativos correspondientes al inicio y al cierre del periodo de evaluación. No obstante, durante el seguimiento continuo se observó una tendencia progresiva de estabilización de los parámetros, caracterizada por una disminución de los picos operativos y una reducción de la variabilidad diaria, especialmente posterior a la implementación de las mejoras en la dosificación de floculantes y el refuerzo biológico del reactor. Este comportamiento refleja una mayor estabilidad hidráulica y biológica del sistema.

### ***Ajuste de maduración del floculante***

Con el objetivo de mejorar la separación de sólidos, optimizar la coagulación y reducir baches operativos, se implementó un ajuste en la maduración del floculante, incorporando un segundo tanque de floculación (tanque auxiliar). Este permitió una mejor dilución y homogenización del producto antes de su dosificación, además de la reducción de baches en la operatividad del sistema.

En la ilustración 10, se muestra la implementación del segundo tanque de floculante para mejorar la operatividad del sistema.



*Ilustración 10. Incorporación tanque auxiliar de floculante aniónico*

### ***Dosificación de urea y ácido fosfórico***

Durante la fase en la que el reactor presentó coloración gris y anaranjada, se identificó un desequilibrio nutricional del sistema biológico. Para corregirlo, se implementó la dosificación controlada de urea y ácido fosfórico, los cuales aportan nitrógeno (N) y fósforo (P), elementos esenciales para el crecimiento y mantenimiento de la biomasa.

La aplicación permitió restablecer la proporción ideal C: N:P (100:5:1), favoreciendo la actividad bacteriana y la degradación de la materia orgánica. Como resultado, el reactor recuperó su coloración café característica, indicando un equilibrio biológico adecuado.

En la ilustración 11, se muestra el reactor de color naranja, el cual suele asociarse a eventos de sobrecarga orgánica, proliferación de microorganismos filamentosos y oxigenación superficial insuficiente, lo que refleja un estado de estrés en la biomasa.



*Ilustración 11. Fotografía y muestra del tanque reactor aerobio (color anaranjado).*

En la ilustración 12, se muestra el reactor de color gris, lo cual indica la acumulación de sólidos en el fondo, esto pasa si no se purga bien el lodo, éste se putrefacta y oscurece el reactor.



*Ilustración 12. Fotografía y muestra del tanque reactor aerobio (color gris)*

En la ilustración 13, se ve el reactor aerobio de color café luego de agregarle urea y ácido fosfórico, los cuales aportan nitrógeno (N) y fósforo (P).



*Ilustración 13. Fotografía muestra del tanque reactor aerobio (color café).*

### ***Determinación de cloruros***

Se realizó la cuantificación de cloruros en el efluente tratado siguiendo el método de Mohr, utilizando nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$  0,0282 N) y cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) como indicador.

Procedimiento:

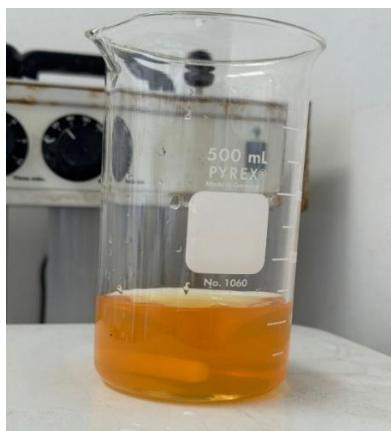
1. Preparación de la muestra: Se toma 10 mL de muestra de agua tratada y se agrega a un beaker de 100mL con 90mL de agua destilada (dilución 1:10)
2. Adición del indicador: Se añade 1mL de indicador  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  al 5%.
3. Titulación: Con el agitador magnético a 300 rpm se titula con  $\text{AgNO}_3$  0,0282 N hasta que aparezca un color rojizo- ladrillo persistente. Se registra el volumen conseguido ( $V_{\text{muestra}}$ )
4. Blanco: Se realiza la misma titulación con 100mL de agua destilada + 1mL de indicador. Se registra el volumen conseguido ( $V_{\text{blanco}}$ ).
5. Se calcula el volumen corregido:  $V_{\text{corregido}}: V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}}$ .
6. Cálculo de la concentración de cloruros:  $V_{\text{corregido}}(\text{mL}) * N * 35450 / V_{\text{muestra original}}(\text{mL})$ .

En la ilustración 14, se observa la mezcla de la muestra de agua tratada, más la adición del indicador cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ).



*Ilustración 14. Fotografía muestra (10 mL) + agua destilada (90mL) + K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> (1ml)*

En la ilustración 15, se observa la mezcla de la muestra, más el indicador cromato de potasio (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) y la titulación con nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub> 0,0282 N).



*Ilustración 15. Fotografía muestra (10 mL) + agua destilada (90mL) + K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> (1ml) + titulación con AgNO<sub>3</sub> 0,0282 N*

En la tabla 7, se presenta el seguimiento mensual realizado desde el inicio de la implementación de cloruros hasta el último mes de prácticas, con el fin de evaluar el comportamiento del proceso a lo largo del tiempo.

Cloruros (máximo 250 mg/L)	
11/08/2025	199,9
11/09/2025	250

11/10/2025	149,9
------------	-------

*Tabla 7. Seguimiento cloruros. Elaboración propia.*

Los valores obtenidos oscilaron entre 149,9 y 250 mg/L, manteniéndose dentro del límite máximo permitido de 250 mg/L según la normatividad nacional para descargas industriales. Los picos observados se asociaron a descargas puntuales provenientes de la línea de panquelería. En general, los resultados reflejan un control adecuado del parámetro y la estabilidad del sistema de tratamiento.

### ***Comparación de resultados con límites normativos***

Con el fin de evaluar el cumplimiento normativo, se compararon los valores finales medidos en la salida del reactor aeróbico con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

En la tabla 8, se presenta la comparación entre los valores finales de los parámetros fisicoquímicos medidos en la salida del reactor aeróbico y los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, con el fin de verificar el cumplimiento normativo del efluente tratado y su viabilidad para el reúso interno.

Parámetro	Resultado final	Límite normativo	Cumplimiento
pH	8.04	5-9	Cumple
SST (mg/ L)	122.2	≤ 300	Cumple
SSED (mL/ L)	1.4	≤ 3	Cumple
DQO (mg/ L)	150	≤ 900	Cumple
Cloruros (mg/ L)	Dentro de rango operativo	≤ 250	Cumple

*Tabla 8. Comparación de parámetros finales vs límites normativos.*

### ***Evidencia visual del proceso***

Las siguientes imágenes muestran la evolución visual del agua en diferentes etapas del

proceso, desde la muestra inicial con alto contenido de sólidos y color intenso, hasta el efluente final con una apariencia más clara y homogénea.

En la ilustración 16, se presenta la muestra de agua proveniente del tanque ecualizador, caracterizada por un alto contenido de sólidos. Esta muestra fue utilizada para la realización del test de jarras, con el propósito de evaluar la eficiencia del coagulante y el floculante frente a una carga elevada de sólidos en suspensión.



*Ilustración 16. Fotografía muestra de agua tanque ecualizador con sólidos de 20.000*

En la ilustración 17, se observa la muestra de agua correspondiente al efluente tratado, la cual presenta un contenido significativamente menor de sólidos. Esta fotografía permite evidenciar la mejora en la calidad del agua tras el proceso de tratamiento.



*Ilustración 17. Fotografía muestra de agua del efluente tratado con sólidos de 134.*

La tabla 9, presenta los resultados del test de jarras realizado con agua cruda del tanque equalizador, comparados con los valores obtenidos tras la dosificación de coagulante y floculante en condiciones controladas. Este análisis permite evaluar la eficiencia del tratamiento fisicoquímico en la corrección del pH y en la remoción de color, turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST).

Test de jarras:

Parámetro	Agua cruda	Con dosificación en test (floculante y coagulante)
pH	4,7	7,7
Color	13.000	91
Turbiedad	6.400	9
SST	8.970	6

*Tabla 9. Datos y valores obtenidos de test de jarras. Elaboración propia.*

### ***Análisis microbiológico del reactor biológico***

Con el propósito de evaluar la composición microbiológica del lodo activo y el estado biológico del sistema, se realizaron observaciones microscópicas de una muestra tomada del reactor biológico de la PTARnD de Bimbo Medellín en las instalaciones de la universidad. Las observaciones se efectuaron utilizando un microscopio óptico con aumentos de 40x y 100x (con inmersión en aceite).

A 40x se evidenció una biomasa activa con abundante presencia de bacterias dispersas, acompañadas de pequeños flóculos biológicos. La muestra mostró una distribución uniforme de microorganismos, sin presencia significativa de sólidos gruesos o partículas inorgánicas, lo que indica un proceso de tratamiento estable.

A 100x se identificaron bacterias con morfología cocoide y filamentosas. Estas últimas presentan una estructura alargada y transparente, características de géneros como Sphaerotilus o Type 021N, los cuales son comunes en sistemas biológicos aerobios y participan en la formación

y cohesión de los flóculos.

No se observaron protozoos ni rotíferos, lo que sugiere condiciones de alta carga orgánica o de oxígeno disuelto limitado, en las que predominan las bacterias sobre los organismos superiores.

En la ilustración 18, se presenta la observación microscópica del reactor biológico a 40x, en la cual se identifican flóculos de biomasa y bacterias dispersas. Esta visualización permite evaluar la estructura general del lodo activado y el estado de agregación de los microorganismos.



*Ilustración 18. Observación microscópica del reactor biológico (40x). Se aprecian flóculos y bacterias dispersas.*

En la Ilustración 19 se muestra la observación microscópica del reactor biológico a 100x, donde se evidencian bacterias filamentosas y células cocoides. Esta imagen resulta útil para analizar la composición microbiana del lodo y detectar la presencia de formas filamentosas asociadas a inestabilidades del proceso biológico.



*Ilustración 19. Observación microscópica del reactor biológico (100x). Se observan bacterias filamentosas y células cocoides.*

La presencia predominante de bacterias filamentosas es indicativa de una biomasa activa y en crecimiento, aunque su exceso puede generar problemas de sedimentabilidad (bulking) en el lodo.

La mayoría de las bacterias que conforman la biomasa encargada de depurar el agua residual en el tratamiento biológico son unicelulares; sin embargo, algunos microorganismos pueden presentar sucesiones de células formando filamentos. Cuando la cantidad de estos organismos filamentosos es alta dentro del sistema de lodos activados, pueden generarse dos tipos de problemas biológicos:

- **Esponjamiento filamentoso (Bulking):** Se presenta cuando los filamentos interfieren en la compactación del flóculo dentro del decantador secundario, dificultando la sedimentación, espesamiento y concentración de los lodos. En casos severos, puede formarse una capa flotante de fango que ocasiona la pérdida de biomasa activa.
- **Espumamiento biológico (Foaming):** Ocurre cuando los microorganismos filamentosos producen una espuma espesa de color blanco o marrón, la cual puede acumularse y generar flotantes en el decantador secundario.

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín, el problema de espumamiento biológico se controla mediante la aplicación de un

antiespumante químico. Para su manejo, se adicionan 100 mL del producto, previamente mezclados con agua, lo que permite una mejor distribución sobre la superficie del reactor y facilita la eliminación de la espuma generada.

La ilustración 20, evidencia la presencia de *foaming* en la planta de tratamiento, un fenómeno caracterizado por la formación excesiva de espuma sobre la superficie de las unidades biológicas. Este comportamiento suele asociarse a un desequilibrio en el proceso, comúnmente provocado por la proliferación de microorganismos filamentosos o variaciones en las cargas orgánicas.



*Ilustración 20. Foaming en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas*

## Conclusiones y recomendaciones

Durante el periodo de prácticas, el sistema de reúso de agua tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales no Domésticas (PTARnD) de Bimbo Medellín operó de manera parcial, permitiendo su utilización en sanitarios en dos ocasiones. En ambas oportunidades, el agua presentó buenas características físicas, con apariencia clarificada, ausencia de olores desagradables y un adecuado comportamiento hidráulico durante su impulsión, lo cual evidenció una mejora perceptible en la calidad del efluente tratado y su potencial de aprovechamiento interno.

La implementación de estrategias de mejora en la PTARnD permitió evidenciar un avance significativo en la eficiencia del proceso de depuración, reflejado en una disminución sustancial de la carga contaminante y una mayor estabilidad del sistema a lo largo de las diferentes etapas del tratamiento. Estos resultados confirman el impacto positivo de las acciones operativas implementadas sobre el desempeño global de la planta.

El cumplimiento del primer objetivo específico se evidenció mediante el monitoreo sistemático de los parámetros pH, temperatura, SST, SSED, DQO y cloruros en los distintos puntos del proceso, lo cual permitió caracterizar el comportamiento del sistema, identificar desviaciones operativas y soportar la toma de decisiones técnicas oportunas.

En relación con el segundo objetivo específico, la optimización del tiempo de maduración de los floculantes contribuyó a reducir los baches operativos y a mejorar la continuidad del proceso, favoreciendo un comportamiento hidráulico más estable y una mayor eficiencia del tratamiento fisicoquímico.

Respecto al tercer objetivo específico, la implementación de acciones biológicas orientadas al fortalecimiento de la biomasa permitió mejorar la estabilidad del reactor aeróbico y potenciar la capacidad de remoción de materia orgánica, evidenciando una adecuada adaptación del sistema a las condiciones operativas.

Las acciones desarrolladas durante la investigación se enmarcaron en la normatividad ambiental colombiana vigente, principalmente la Resolución 0631 de 2015 y la Resolución 2115 de 2007, fortaleciendo el cumplimiento de los parámetros de vertimiento y promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico dentro de la planta.

El análisis microscópico permitió identificar microorganismos característicos de sistemas

aeróbicos estables, lo cual confirma un adecuado equilibrio de la biomasa activa y respalda la estabilidad del proceso biológico.

Desde el punto de vista académico y profesional, el proyecto fortaleció competencias en monitoreo ambiental, análisis e interpretación de parámetros fisicoquímicos y biológicos, control operativo de sistemas de tratamiento y aplicación de la normativa ambiental vigente.

Finalmente, si bien los resultados evidencian mejoras significativas en el desempeño del sistema, estos deben ser validados en periodos de monitoreo más prolongados, que permitan confirmar la sostenibilidad de los indicadores de calidad del agua bajo diferentes condiciones operativas, variaciones de carga y cambios estacionales. Asimismo, futuras evaluaciones podrían incorporar análisis económicos y energéticos que permitan determinar la viabilidad integral de las mejoras implementadas a largo plazo.

#### **Recomendaciones:**

- Se recomienda realizar un seguimiento operativo más frecuente al sistema de reúso, con el fin de identificar las causas que limitaron su funcionamiento continuo y garantizar su estabilidad en el tiempo. Además, sería conveniente implementar un control periódico de la calidad del agua tratada, verificando parámetros como turbidez, DBO, DQO y olor, para asegurar su conformidad con los estándares exigidos para uso sanitario.

De igual forma, se sugiere evaluar el desempeño de las bombas y líneas de conducción que transportan el agua hacia los sanitarios, a fin de evitar obstrucciones o pérdidas de caudal que puedan afectar el suministro. La optimización de estas condiciones permitirá incrementar la frecuencia de reúso, fortaleciendo la sostenibilidad del sistema y el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico en la planta.

-Monitorear los niveles de oxígeno disuelto en el reactor, manteniéndolos entre 2,0 y 3,0 mg/L para favorecer el equilibrio entre bacterias y protozoos.

-Revisar la dosificación de nutrientes (N y P), ya que su deficiencia puede estimular el desarrollo de bacterias filamentosas.

-En caso de observar pérdida de sedimentabilidad, aumentar la aireación o implementar recirculación de lodos para controlar la proliferación de filamentos.

- Se recomienda continuar con la evaluación del sistema una vez se implementen completamente los tanques y el floculador, además de realizar un seguimiento mensual de los parámetros de vertimiento para verificar la estabilidad del sistema. También se sugiere realizar

pruebas piloto de reúso y comparar la calidad del agua con los requerimientos de la Resolución 1207 de 2014.

## Bibliografías

Comunicaciones. (2022, 21 enero). *Minambiente y ANDI lanzaron resolución que permite el reúso de aguas residuales* -. <https://www.minambiente.gov.co/minambiente-y-andi-lanzaron-resolucion-que-permite-el-reuso-de-aguas-residuales/>?

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). Protocolo para el monitoreo de vertimientos de aguas residuales. Bogotá D.C.: IDEAM. <https://www.ideam.gov.co>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, 17 de marzo). Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Diario Oficial No. 49.486. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007, 22 de junio). Resolución 2115 de 2007: Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial No. 46.673. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-2115-de-2007.pdf>

Minambiente reglamenta el reúso de aguas residuales en el país. (s. f.). <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Minambiente-reglamenta-el-re%C3%BAso-de-aguas-residuales-en-el-pa%C3%ADs.aspx?>

User, S. (s. f.). Vertimientos y reúso de aguas residuales | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales>

Works, E. (s. f.). El problema del foaming en la digestión anaerobia de fangos EDAR/PTAR. <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/el-problema-del-foaming-en-la-digestion-anaerobia--rcggg>