

Evaluación de los posibles impactos de vertimientos no domésticos en el alcantarillado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, PTAR San Silvestre, del Municipio de Barrancabermeja, Santander.

Karina González Gaviria

Trabajo de Grado para optar al título de Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento
Ambiental

Directora

Viviana Valencia Zuluaga

Ingeniera Sanitaria, MSc Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, por permitirme seguir siendo su instrumento en la tierra, y perseverar para alcanzar este logro, a mis padres Rafael y Beatriz, por sus palabras de ánimo y tenerme siempre en sus oraciones, a mis hijos Keider y Kiara, por su comprensión y paciencia en los momentos de ausencia, a mi esposo por su valioso apoyo, ustedes son mi motivación, por eso este logro es de todos.

A mi directora, mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, disposición, orientación y confianza en mí para culminar esta tan anhelada meta personal y académica.

¡¡¡Gracias!!!

Salmo 100:4-5 “Dadle gracias y alabad su nombre. Porque el Señor es bueno y su amor es eterno, su fidelidad perdura por todas las generaciones”

Agradecimientos

Especial agradecimiento a la empresa Aguas de Barrancabermeja S.A E.S. P, por contribuir en mi crecimiento profesional, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de grado, permitiéndome fortalecer el conocimiento a través de este tiempo en el área de saneamiento básico, que se ve retribuido día a día en las labores realizadas en pro del medio ambiente, especialmente del recurso hídrico, y el bienestar de nuestros usuarios.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Antecedentes	16
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo General	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. Marco Referencial	21
3.1 Marco Teórico	21
3.1.1 Tratamiento de Aguas Residuales	21
3.1.2 Teoría de los Lodos Activados	24
3.1.3 Impacto de los Vertimientos No Domésticos	26
3.1.4 Efectos Ambientales del Vertimiento	29
3.2 Marco Conceptual	31
3.3 Marco Legal	33
3.4 Estado del Arte	37
3.4.1 Estado del Conocimiento en el Tratamiento de Aguas Residuales Mixtas	37
3.4.2 Investigaciones Relevantes sobre Vertimientos No Domésticos	39
3.4.3 Tesis y Proyectos Previos	42
4. Metodología	46
4.1 Enfoque	46
4.2 Diseño	46

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DE VERTIMIENTOS NO DOMÉSTICOS	5
4.3 Método	47
4.4 Tipo de Investigación	47
4.5 Nivel de Investigación	47
4.6 Participantes	48
4.7 Herramientas	48
4.8 Procedimientos	49
5. Resultados y Discusión	52
5.1 Caracterización de la Calidad del Agua Residual que Ingresa a la PTAR San Silvestre	52
5.1.1 Actividad 1: Análisis de la Variabilidad Temporal de Contaminantes	53
5.1.2 Actividad 2: Modelación de la Calidad del Agua y Evaluación de Contaminantes Críticos en el Sistema de Alcantarillado Utilizando EPA SWMM	60
5.1.3 Actividad 3: Comparación con Normas Ambientales	76
5.1.4 Actividad 4: Análisis de Carga Contaminante	79
5.2 Análisis de los Impactos de Vertimientos No Domésticos en la PTAR San Silvestre	83
5.2.1 Evaluación de Carga Contaminante por Tramo y Año	84
5.2.2 Impacto de la Carga Contaminante en la Capacidad de Tratamiento	86
5.2.3 Recomendaciones Basadas en el Análisis de Impactos	88
5.3 Estrategias para Minimizar los Impactos Generados en la PTAR	89
5.3.1 Actividad 1: Identificación de Parámetros con Riesgo Ambiental Crítico	89
5.3.2 Actividad 2: Evaluación de la Carga Contaminante Residual No Tratada	90
5.3.3 Actividad 3: Análisis de Riesgo Ambiental Acumulado	91
6. Conclusiones	99
7. Recomendaciones	101

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DE VERTIMIENTOS NO DOMÉSTICOS	6
Referencias	105
Apéndices	112

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Variabilidad Temporal de Parámetros de Calidad de Agua en Vertimientos No Domésticos hacia la PTAR San Silvestre</i>	53
Tabla 2. <i>Concentración de DBO y SST a lo largo del Sistema Simulado</i>	65
Tabla 3. <i>Comparación con Normativa Vigente (Resolución 0631 de 2015)</i>	76
Tabla 4. <i>Cálculo de la Carga Contaminante Promedio de Vertimientos No Domésticos hacia la PTAR San Silvestre</i>	79
Tabla 5. <i>Presenta la carga diaria promedio de DBO y DQO (en kg/día) desglosada por tramos y años.</i>	84
Tabla 6. <i>Presenta evaluación del impacto de la carga.</i>	86
Tabla 7. <i>Cumplimiento normativo para los parámetros analizados en diferentes puntos de muestreo</i>	90
Tabla 8. <i>Análisis para determinar el impacto acumulado de la carga contaminante</i>	91
Tabla 9. <i>Evaluación de Riesgo Ambiental Según la Matriz EPA</i>	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Variabilidad de DBO, DQO y SST a lo Largo del Año en los Vertimientos No Domésticos Hacia la PTAR San Silvestre</i>	57
Figura 2. <i>Configuración del Modelo en EPA SWMM</i>	62
Figura 3. <i>Configuración de parámetros de calidad de agua</i>	63
Figura 4. <i>Características hidráulicas</i>	68
Figura 5. <i>Variación de la Concentración de DBO según el modelo</i>	70
Figura 6. <i>Distribución Espacial de SST en el Sistema de alcantarillado</i>	73

Resumen

Título: Evaluación de los posibles impactos de vertimientos no domésticos en el alcantarillado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, PTAR San Silvestre, del Municipio de Barrancabermeja, Santander*.

Autor: Karina González Gaviria**

Palabras clave: Vertimientos no domésticos, Sistema de alcantarillado, Modelación de calidad, Tratamiento de aguas residuales.

Descripción

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar los posibles impactos de vertimientos no domésticos en el sistema de alcantarillado sobre la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Silvestre, ubicada en el municipio de Barrancabermeja, Santander. Se utilizó un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental y un método analítico que permitió identificar las características de los vertimientos y su influencia en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. Los principales parámetros analizados incluyeron DBO, SST y la presencia de metales pesados como el mercurio y el plomo. Los resultados indicaron que los vertimientos no domésticos generaron fluctuaciones significativas en contaminantes, afectando la capacidad de la PTAR para mantener la eficiencia de remoción de contaminantes. Se identificaron puntos críticos de acumulación de contaminantes en la red de alcantarillado que podrían provocar daños estructurales y un incremento en los costos operacionales. Las conclusiones sugieren la necesidad de implementar estrategias de pretratamiento en las industrias locales para garantizar que los vertimientos se ajusten a los parámetros establecidos por la normativa vigente, minimizando así los impactos negativos en la infraestructura de la PTAR. El estudio contribuye al conocimiento técnico y regulatorio para el manejo de vertimientos industriales, y sus recomendaciones son aplicables a nivel local y regional para mejorar la gestión del recurso hídrico y asegurar la sostenibilidad de las plantas de tratamiento en entornos similares.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Civil. Maestría En Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Directora: Viviana Valencia Zuluaga, Ingeniera Sanitaria, MSc ingeniería Sanitaria y Ambiental

Abstract

Title: Evaluation of the possible impacts of non-domestic discharges into the sewerage system on the domestic wastewater treatment plant, PTAR San Silvestre, in the Municipality of Barrancabermeja, Santander.*

Author: Karina González Gaviria**

Keywords: non domestic discharges, sewerage system, quality modelling, wastewater treatment.

Description

The objective of this study is to evaluate the possible impacts of non-domestic discharges in the sewerage system on the San Silvestre Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in the municipality of Barrancabermeja, Santander. A quantitative approach was used with a non-experimental design and an analytical method that allowed identifying the characteristics of the discharges and their influence on the efficiency of wastewater treatment. The main parameters analyzed included Biochemical Oxygen Demand (BOD), Total Suspended Solids (TSS) and the presence of heavy metals such as mercury and lead. The results indicated that non-domestic discharges generated significant fluctuations in pollutants, affecting the capacity of the WWTP to maintain the efficiency of pollutant removal. Critical points of accumulation of pollutants in the sewerage network were identified that could cause structural damage and an increase in operational costs. The conclusions suggest the need to implement pretreatment strategies in local industries to ensure that discharges conform to the parameters established by current regulations, thus minimizing negative impacts on the WWTP infrastructure. The study contributes to the technical and regulatory knowledge for the management of industrial discharges, and its recommendations are applicable at the local and regional level to improve water resource management and ensure the sustainability of treatment plants in similar environments.

* Thesis

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Master's Degree in Water Resources and Environmental Sanitation. Director: Viviana Valencia Zuluaga, Sanitary Engineer, MSc Sanitary and Environmental Engineering

Introducción

Por aguas servidas se entiende como la transformación de la composición natural del agua generada por actividades antrópicas, trayendo consigo cambios nocivos de su calidad respecto a los manejos siguientes o respecto a su capacidad ambiental; este tipo de residuos líquidos procede del proceso de suministro de agua de una comunidad, luego de ser alteradas por su uso en actividades caseras, industriales e institucionales. Las aguas servidas están constituidas por agentes físicos, químicos y biológicos, es decir, por una gama de sustancias que pueden ser orgánicas e inorgánicas, material suspendido o disuelto (Díaz, Alvarado y Camacho, 2012).

En este sentido, la EPA (2020) señala que los vertimientos contienen contaminantes que afectan directamente los ecosistemas acuáticos y la salud humana si no son tratados adecuadamente.

Específicamente, las aguas servidas de carácter doméstico hacen alusión a aquellas que han sido implementadas con fines higiénicos, como la preparación de alimentos, el uso de baterías sanitarias, lavado de prendas e higiene personal. Estas aguas están constituidas por desechos de diversas actividades humanas que son descargados en la red de alcantarillado sanitario o combinado a través de vertimientos provenientes de viviendas, lugares comerciales, públicos y similares. Por ello, es esencial un proceso adecuado de tratamiento (Mara, 2004). Según estudios recientes (WHO/UNICEF, 2021), las aguas residuales domésticas representan un reto global debido a su elevada proporción de agua (cerca del 99.9 %) y una pequeña cantidad de sólidos suspendidos y disueltos (0.1 %), que ocasionan la mayoría de los problemas en su depuración y disposición.

Con la depuración de las aguas residuales de tipo doméstico se busca reducir o mitigar los agentes perjudiciales hasta que cumplan con los parámetros y valores límites máximos

permisibles establecidos en la Resolución N° 0631/2015. Este proceso es crucial para garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos, como lo destacan Bakker y Demerouti (2019) en sus análisis sobre la sostenibilidad ambiental. En virtud de los diferentes contaminantes que se presentan en dichas aguas, el proceso de tratamiento varía considerablemente, siendo clasificado en convencionales y alternativos según su operación.

Estas diferencias inciden directamente en su eficiencia, especialmente ante la presencia de aguas residuales no domésticas, que alteran significativamente las características del influente (EPA, 2020). Esto ha sido corroborado en investigaciones de Mara (2004) y Díaz, Alvarado y Camacho (2012), quienes destacaron la importancia de un monitoreo continuo para garantizar el cumplimiento normativo y minimizar el impacto ambiental.

Así mismo, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos suspendidos (SS), son parámetros que pueden variar drásticamente durante el día de acuerdo a la carga contaminante de las aguas residuales. Esta variación, a corto plazo radica en las llamadas cargas de choque, que se presentan generalmente en plantas de tratamiento de poca capacidad de almacenamiento que permite disminuir la carga. Es importante, tener en cuenta las características del agua residual y de los caudales resultantes cuando se van a aceptar vertimientos industriales en la red de alcantarillado municipal. De hecho, es conveniente definir el efecto que pueda causar sobre los vertidos que se van a descargar cualquier variación futura de los diversos procesos implementados en la industria (Metcalf y Eddy, 1995).

Igualmente, las aguas residuales no domésticas están asociadas a los procesos de corrosión que son agresivos y deterioran las estructuras colectoras, de transporte y tratamiento de las aguas residuales, ocasionados por fenómenos electroquímicos, químicos y de actividad microbiana, cuya combinación, genera inconvenientes de degradación anticipada del sistema de

tratamiento, ya que la ubicación de los agentes corrosivos y agresivos se extiende desde el agua residual hacia las atmósferas en contacto con ella y a los sólidos separados de manera forzada o no de la misma. La actividad destructiva de la corrosión y su proceso degradativo en las plantas de tratamientos en España generaron por cada año, pérdidas que ascienden a 10.000 M€, además de diversos costos de índole social, sanitaria y ambiental (Marín Galvín, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, el municipio de Barrancabermeja en materia de vertimientos de aguas residuales no domésticas, no es ajeno a esta problemática, ya que los usuarios industriales, comerciales, deben cumplir con un tratamiento previo al sistema de alcantarillado público en el casco urbano, bajo los lineamientos de la Resolución N° 0631/2015. El sistema de alcantarillado de la Empresa Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P. cuenta con una cobertura del 83,3%, atendiendo a un total de 54.705 usuarios registrados en su base de datos. De estos, 54.705 (93,85%) corresponden a usuarios residenciales, 3.001 (5,48%) a usuarios comerciales, 8 (0,014%) a usuarios industriales y 352 (0,64%) a usuarios oficiales. Cabe destacar que los usuarios industriales están concentrados en la Comuna Tres (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022).

La red de alcantarillado dispone de 133 puntos de vertimiento distribuidos en siete fuentes receptoras, de los cuales 19 se ubican en la Comuna Tres y descargan directamente en el humedal San Silvestre, que actúa como fuente receptora principal (Resolución N° 0000172 de 2012, CAS).

Cabe destacar, que los 133 vertimientos, serán colectados y conducidos a través de la red primaria y redes secundarias, para ser tratadas sus aguas en la PTAR San Silvestre, la cual empezó a dilucidarse en el año 2010, cuando Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., la Alcaldía Distrital, y Ecopetrol se unieron para financiar el proyecto de su construcción, que tiene como

objetivo contribuir a la descontaminación de los cuerpos hídricos del municipio, entre los que se encuentran los humedales ciénagas Juan Esteban, Miramar, El Castillo y San Silvestre, que es actualmente el único recurso hídrico destinado para consumo humano en el municipio.

En consecuencia, la PTAR San Silvestre, se diseñó en el año 2016, para tratar las aguas residuales domésticas, con un nivel de tratamiento terciario que consta de un pozo de gruesos, pre - desbaste, sistema de bombeo de agua cruda, sistema de desbaste, alivio de excesos, desarenado-desengrasado, tratamiento primario, tratamiento biológico de reactores biológicos, luego un tratamiento biológico de decantadores secundarios, desinfección y finalmente, el vertido por emisario al río Magdalena. Actualmente se encuentra en la fase de construcción, la cual se encargará de depurar un caudal promedio de 774 L/s y un máximo de 1320 L/s para el año horizonte 2043, removiendo cerca del 90% de la carga orgánica contaminante y se piensa poner en operación a partir del año 2025 (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022) (Consortio PTAR San Silvestre, 2022).

Sin embargo, las aguas residuales recolectadas en la red de alcantarillado de la Comuna Tres no son exclusivamente de tipo doméstico. Según la base de datos, ocho empresas industriales contribuyen con vertimientos no domésticos a la red. Estas empresas, cuya actividad productiva incluye la refinación de hidrocarburos, procesamiento de alimentos, manufactura química y tratamiento de metales, generan descargas con características específicas de contaminantes como hidrocarburos aromáticos, aceites, grasas, y metales pesados, que representan un desafío para el tratamiento convencional.

De acuerdo con los registros de la Empresa Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., no se dispone de información sobre si estas empresas cuentan con sistemas de pretratamiento antes de descargar sus vertimientos. Este incumplimiento podría estar en contravención con los límites

establecidos en la Resolución N° 0631 de 2015, afectando directamente la operación del alcantarillado y la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales en la PTAR San Silvestre.

Además, al no cumplir con los parámetros y valores límites máximos permisibles, por la Resolución N° 0631 de 2015, después de su proceso de tratamiento, los cuerpos hídricos a los cuales se realizarán los vertimientos, se verían afectados por el aumento de la concentración de parámetros fisicoquímicos, causando el deterioro de los ecosistemas dulceacuícolas y posibles afectaciones de salud pública de las poblaciones aledañas (Morales H., 2019) y las sanciones pecuniarias que esto implica para la entidad prestadora del servicio.

1. Antecedentes

El tratamiento de aguas residuales es una de las principales estrategias para la protección de los recursos hídricos en áreas urbanas e industriales, ya que previene la contaminación de los cuerpos de agua y protege la salud pública. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 80% de las aguas residuales en todo el mundo se descargan sin tratamiento adecuado en los cuerpos hídricos, lo que contribuye significativamente a la contaminación de los ecosistemas acuáticos y a la propagación de enfermedades de origen hídrico (OMS, 2018). En este contexto, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) juegan un papel crucial para mitigar los efectos adversos de los vertimientos, sobre todo en zonas urbanas con alta concentración de actividades industriales y domésticas.

En Colombia, la situación de vertimientos no tratados es especialmente preocupante. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, cerca del 55% de las aguas residuales generadas en el país no reciben ningún tipo de tratamiento antes de ser vertidas a los cuerpos hídricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Esta problemática es aún más crítica en regiones altamente industrializadas como el municipio de Barrancabermeja, que alberga un gran número de industrias que generan vertimientos con características fisicoquímicas diferentes a las aguas residuales domésticas.

El municipio de Barrancabermeja, ubicado en el departamento de Santander, es un centro clave para la industria petrolera y otras actividades industriales, lo que ha generado un aumento en la demanda de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Silvestre fue diseñada para tratar las aguas residuales domésticas de la ciudad, pero se ha identificado que un porcentaje significativo de los vertimientos corresponde a aguas no domésticas provenientes de actividades industriales, lo que

genera un desafío adicional para su operación eficiente (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022).

El marco normativo en Colombia ha establecido lineamientos claros para el manejo y tratamiento de las aguas residuales. La Resolución 0631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales en cuerpos hídricos y sistemas de alcantarillado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Esta normativa aplica tanto para vertimientos domésticos como no domésticos, siendo especialmente relevante para las plantas de tratamiento que reciben aguas mixtas. Uno de los principales retos para la PTAR San Silvestre es el manejo de las aguas residuales no domésticas, que pueden contener sustancias químicas peligrosas y componentes no fácilmente degradables por los métodos convencionales de tratamiento.

Estudios previos han demostrado que la introducción de vertimientos industriales en los sistemas de alcantarillado destinados principalmente a aguas domésticas puede reducir la eficiencia de los tratamientos biológicos, tales como los lodos activados, debido a la presencia de compuestos tóxicos que inhiben la actividad microbiana necesaria para la degradación de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1995). En el caso específico de Barrancabermeja, las aguas residuales no domésticas provenientes de actividades industriales contienen altos niveles de hidrocarburos, grasas y aceites, así como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes. Estos componentes no solo podrían dañar la infraestructura de la PTAR San Silvestre, sino que también representan un riesgo significativo para los cuerpos de agua receptores, como el Humedal San Silvestre y el río Magdalena, que son fuentes de agua potable y hábitat de numerosas especies (Aguas de Barrancabermeja SA ESP, 2022).

Investigaciones recientes señalan que los vertimientos industriales en los cuerpos hídricos no solo afectan la calidad del agua, sino que también alteran los ciclos biogeoquímicos y reducen la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos (Morales, 2019). El deterioro de estos cuerpos de agua tiene implicaciones directas en la salud pública, ya que el agua contaminada puede ser una vía para la propagación de patógenos. Adicionalmente, la corrosión es otro problema significativo que enfrentan las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales cuando se procesan vertimientos no domésticos.

La combinación de componentes químicos y microbiológicos presentes en las aguas industriales puede acelerar el deterioro de las tuberías y estructuras de concreto en las plantas de tratamiento, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la vida útil de las instalaciones (Marín Galvín, 2011). La PTAR San Silvestre fue diseñada inicialmente para tratar un caudal promedio de 774 litros por segundo (L/s) y un caudal máximo de 1,320 L/s, con una proyección para el año 2043 (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022). Sin embargo, la presencia de vertimientos no domésticos no controlados podría alterar significativamente la capacidad de la planta para cumplir con los objetivos de remoción de carga orgánica, que se estiman en alrededor del 90%. La capacidad de tratamiento se ve afectada por las fluctuaciones en la carga contaminante, generadas por los vertimientos de industrias que no cumplen con los parámetros establecidos por la normativa vigente (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022). La importancia de una adecuada gestión de los vertimientos no domésticos radica no solo en la eficiencia operativa de la PTAR, sino también en la protección de los recursos hídricos que son fundamentales para el bienestar de las comunidades locales. En este sentido, la gestión ambiental integral debe incluir estrategias de monitoreo, control y sanción de los vertimientos industriales

que no cumplan con los límites permisibles, tal como lo exige la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Finalmente, cabe destacar que la gestión de vertimientos no domésticos en el sistema de alcantarillado y su impacto en las plantas de tratamiento es una problemática global. Países como Estados Unidos y China han implementado políticas estrictas para el control de los vertimientos industriales, priorizando la protección de sus cuerpos hídricos y mejorando la eficiencia de sus sistemas de tratamiento mediante la implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento y monitoreo continuo de la calidad del agua (EPA, 2019).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar los posibles impactos de vertimientos no domésticos en el alcantarillado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, PTAR San Silvestre, del municipio de Barrancabermeja, Santander.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar las características de calidad del agua residual urbano que llegaría a la PTAR San Silvestre con las condiciones actuales de vertimientos industriales en el alcantarillado.

Analizar los posibles impactos que generan los vertimientos no domésticos sobre la planta de tratamiento de aguas residuales.

Establecer las estrategias para minimizar los impactos generados en la PTAR.

3. Marco Referencial

El marco teórico proporcionó los fundamentos científicos relacionados con el tratamiento de aguas residuales, el impacto de los vertimientos industriales en sistemas de tratamiento biológico, como el proceso de lodos activados, y los principios que guían la operación eficiente de las plantas de tratamiento. Este apartado incluyó revisiones teóricas sobre cómo los vertimientos de origen industrial pueden interferir en los procesos biológicos, afectando la remoción de contaminantes como DBO y SST (Metcalf y Eddy, 1995).

El marco conceptual abordará las definiciones clave que guían esta investigación, tales como las aguas residuales domésticas y no domésticas, los vertimientos, y los parámetros de calidad del agua como la DBO y los SST. Este apartado es crucial para clarificar los conceptos que serán utilizados a lo largo del estudio y asegurar una comprensión uniforme de los mismos, tanto por parte de los investigadores como de los lectores (CORNARE, 2022).

Por último, el marco legal expondrá las normativas vigentes que regulan los vertimientos de aguas residuales en Colombia, con un énfasis particular en la Resolución N° 0631 de 2015, que establece los límites máximos permisibles para los vertimientos en cuerpos hídricos y sistemas de alcantarillado. Este apartado permitirá comprender cómo la legislación influye en el diseño, operación y control de plantas de tratamiento como la PTAR San Silvestre, y qué acciones deben implementarse para garantizar el cumplimiento de los parámetros legales y la protección de los recursos hídricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de aguas residuales es un proceso esencial para reducir la contaminación hídrica y proteger los ecosistemas acuáticos. Las aguas residuales, provenientes tanto de

actividades domésticas como industriales, contienen contaminantes que pueden ser perjudiciales para la salud pública y los ecosistemas si no son tratados adecuadamente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el tratamiento de aguas residuales es crucial para evitar la proliferación de enfermedades y proteger los recursos hídricos, ya que más del 80% de las aguas residuales a nivel mundial se descargan sin tratamiento, lo que genera un alto nivel de contaminación en ríos y cuerpos de agua (OMS, 2020).

Los procesos de tratamiento de aguas residuales se dividen en tres grandes categorías: físicos, químicos y biológicos. El tratamiento físico consiste en la remoción de sólidos suspendidos mediante procesos de sedimentación, filtración y flotación. Estos métodos son los más básicos y suelen ser la primera etapa en el tratamiento del agua. En este sentido, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Silvestre incluye sistemas de desbaste y desarenado como parte de su proceso inicial, lo que permite la separación de sólidos grandes antes de la entrada de las aguas al tratamiento biológico (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022).

El tratamiento químico, por otro lado, se enfoca en la neutralización de contaminantes disueltos a través de reacciones químicas. Este tipo de tratamiento incluye procesos como la coagulación, la floculación y la precipitación química, los cuales son útiles para remover contaminantes específicos como fosfatos y metales pesados. La PTAR San Silvestre, al estar diseñada principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas, no cuenta con un proceso químico extenso, pero el tratamiento biológico posterior compensa la falta de procesos químicos para la degradación de materia orgánica (Propuesta de Aplicación, 2022).

El tratamiento biológico es la etapa más importante para la remoción de materia orgánica disuelta y suspendida. En este proceso, los microorganismos juegan un papel fundamental al

descomponer los compuestos orgánicos presentes en el agua. La tecnología de lodos activados es uno de los sistemas biológicos más utilizados a nivel global para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En este proceso, se introduce aire en los reactores biológicos para que los microorganismos aeróbicos descompongan la materia orgánica. Este sistema es altamente eficiente en la reducción de DBO y otros parámetros contaminantes (Metcalf y Eddy, 1995).

En el caso de la PTAR San Silvestre, el sistema de lodos activados es uno de los más relevantes debido a su capacidad para tratar grandes volúmenes de aguas residuales domésticas, las cuales representan la mayor parte de los vertimientos en la zona. Sin embargo, es importante destacar que la introducción de vertimientos industriales en este tipo de sistema puede afectar la eficiencia del tratamiento biológico. Los compuestos tóxicos presentes en las aguas industriales, como los metales pesados y los hidrocarburos, pueden inhibir la actividad microbiana y, por lo tanto, reducir la capacidad de remoción de la materia orgánica (Características agua Influyente y Efluente, 2016).

Los vertimientos industriales que contienen altas concentraciones de grasas, aceites y compuestos tóxicos representan un reto adicional para los sistemas biológicos. Estos contaminantes tienden a formar capas superficiales que impiden la oxigenación de las aguas residuales, lo que afecta negativamente el proceso de lodos activados. Además, el ingreso de sustancias tóxicas puede provocar la muerte de microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica, lo que disminuye la eficiencia general del tratamiento (Rodríguez Pimentel, 2017). Los principios teóricos del tratamiento biológico se basan en la actividad microbiana para convertir los contaminantes orgánicos en gases y biomasa, que luego se eliminan del sistema.

Este proceso es esencial para garantizar la calidad del agua tratada y evitar la contaminación de los cuerpos receptores, como el río Magdalena, que recibe el efluente tratado de la PTAR San Silvestre. Sin embargo, para que este sistema funcione de manera eficiente, es necesario que los vertimientos industriales sean tratados previamente antes de ingresar al sistema de tratamiento biológico (Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., 2022).

3.1.2 Teoría de los Lodos Activados

El proceso de lodos activados es uno de los métodos más comunes y eficientes en el tratamiento de aguas residuales a nivel mundial. Este proceso se basa en la capacidad de los microorganismos aerobios para descomponer la materia orgánica disuelta en el agua residual. A través de la aireación controlada en un tanque biológico, los microorganismos oxidan los compuestos orgánicos, convirtiéndolos en dióxido de carbono, agua y biomasa microbiana, que posteriormente es separada del agua tratada (Tchobanoglous et al., 2003).

Este método es ampliamente utilizado debido a su eficiencia para la remoción de materia orgánica y su capacidad para manejar grandes volúmenes de agua. El principio básico del sistema de lodos activados radica en la suspensión de flóculos biológicos en un tanque de aireación, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica a través de procesos biológicos. Estos flóculos, conocidos como "lodos activados", se separan posteriormente del agua en un clarificador secundario mediante sedimentación. Este proceso es eficiente para reducir la DBO, que es un indicador clave de la contaminación orgánica (Metcalf y Eddy, 2014). Uno de los elementos clave del proceso es el ciclo de recirculación de lodos activados.

En este ciclo, una fracción de los lodos sedimentados en el clarificador secundario es recirculada de nuevo al tanque de aireación, manteniendo un alto nivel de actividad biológica en el sistema. El resto de los lodos es retirado y tratado como "lodos de desecho". Este equilibrio es

fundamental para mantener una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos y estabilizar el proceso (Henze et al., 2008). Sin embargo, los sistemas de lodos activados pueden ser sensibles a la introducción de vertimientos industriales. Los vertimientos industriales suelen contener sustancias tóxicas, como metales pesados, hidrocarburos y compuestos recalcitrantes, que pueden inhibir la actividad microbiana.

Estos compuestos pueden interferir con la capacidad de los microorganismos para descomponer la materia orgánica, afectando negativamente la eficiencia del proceso de tratamiento (Kujawa-Roeleveld y Zeeman, 2006). Además, estos vertimientos pueden causar la formación de flóculos de baja densidad, lo que dificulta la sedimentación en el clarificador secundario (Gikas y Tsihrintzis, 2012). Estudios recientes han demostrado que la presencia de compuestos tóxicos en los vertimientos industriales puede provocar la muerte de microorganismos clave en el sistema de lodos activados.

Esto no solo disminuye la eficiencia de remoción de DBO, sino que también incrementa la producción de lodos, lo que resulta en mayores costos de operación y mantenimiento. Para mitigar estos efectos, se recomienda la implementación de pretratamientos industriales, que permitan la remoción de contaminantes tóxicos antes de que las aguas residuales ingresen a las plantas de tratamiento (Liu y Tay, 2004). Un aspecto importante para considerar es la capacidad del sistema de lodos activados para eliminar no solo materia orgánica, sino también nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo.

Estos sistemas pueden adaptarse para realizar procesos de desnitrificación y eliminación de fósforo, lo que mejora la calidad del efluente y reduce el impacto ambiental en los cuerpos receptores de agua (Henze et al., 2008). Esto es particularmente relevante en plantas que tratan vertimientos mixtos, como es el caso de muchas plantas de tratamiento municipales que reciben

tanto aguas residuales domésticas como industriales. El proceso de lodos activados puede configurarse en diferentes modalidades para adaptarse a las características del agua residual.

Una de estas configuraciones es el flujo pistón, en la que el agua residual fluye a través de una serie de canales sin mezcla longitudinal. Esta configuración mejora el control sobre el tiempo de retención hidráulica y la actividad microbiana, lo que aumenta la eficiencia del tratamiento biológico (Tchobanoglous et al., 2003).

3.1.3 Impacto de los Vertimientos No Domésticos

Los vertimientos no domésticos, provenientes principalmente de actividades industriales, representan un desafío significativo para los sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente aquellos diseñados para tratar vertimientos domésticos. Estos vertimientos suelen contener sustancias químicas tóxicas, como metales pesados, hidrocarburos y compuestos orgánicos persistentes, que pueden afectar de manera adversa la eficiencia de los procesos biológicos utilizados en las plantas de tratamiento. Uno de los impactos más críticos es la inhibición de la actividad microbiana, fenómeno que afecta la capacidad de los microorganismos para degradar la materia orgánica, reduciendo la eficiencia del tratamiento biológico (Metcalf y Eddy, 2014).

Los sistemas biológicos, como el proceso de lodos activados, dependen de la actividad de microorganismos aerobios que metabolizan la materia orgánica presente en las aguas residuales. Cuando ingresan al sistema compuestos tóxicos provenientes de vertimientos industriales, estos pueden inhibir la actividad de los microorganismos, reduciendo la capacidad de remoción de la DBO. La DBO es un indicador clave de la cantidad de materia orgánica en el agua residual, y una menor remoción implica que más contaminantes orgánicos llegan a los cuerpos de agua receptores (Liu y Tay, 2004).

Uno de los mecanismos mediante los cuales los contaminantes industriales afectan los sistemas biológicos es a través de la toxicidad directa sobre los microorganismos. Sustancias como el mercurio y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) interfieren con los procesos metabólicos de las bacterias aerobias, impidiendo su capacidad de descomponer la materia orgánica. En concentraciones elevadas, estos contaminantes pueden provocar la muerte de los microorganismos, lo que lleva a una reducción drástica en la eficiencia del tratamiento y un incremento en la producción de lodos no estabilizados (Gikas y Tsihrintzis, 2012).

Los aceites y grasas presentes en los vertimientos industriales también representan un desafío para los sistemas de tratamiento biológico. Estos compuestos tienden a formar una capa flotante en los tanques de aireación, lo que reduce la transferencia de oxígeno necesaria para el metabolismo de los microorganismos. Además, la acumulación de grasas y aceites puede obstruir los sistemas de aireación y provocar la formación de flóculos de baja densidad que no sedimentan correctamente en el clarificador secundario, lo que disminuye aún más la eficiencia del sistema de lodos activados (Kujawa-Roeleveld y Zeeman, 2006). Otro fenómeno asociado a los vertimientos no domésticos es la alteración de la cinética de reacción en los procesos biológicos.

Los vertimientos industriales pueden contener compuestos que inhiben el crecimiento de microorganismos específicos o que aceleran la tasa de muerte microbiana. Esto afecta la estabilidad del sistema, ya que los procesos de degradación biológica requieren una población estable y activa de microorganismos. Cuando la tasa de muerte microbiana supera la tasa de reproducción, el sistema colapsa y la remoción de DBO se ve gravemente comprometida (Henze et al., 2008). Además, la presencia de compuestos recalcitrantes en los vertimientos industriales dificulta la degradación biológica.

Estos compuestos, como ciertos pesticidas y solventes industriales, no son fácilmente biodegradables y requieren tiempos de retención más largos o tecnologías de tratamiento más avanzadas, como los procesos de oxidación avanzada o el tratamiento anaerobio, para ser removidos de manera efectiva. Sin embargo, muchos sistemas de tratamiento convencionales no están diseñados para manejar estas sustancias, lo que resulta en un bajo rendimiento del tratamiento y en la descarga de efluentes con altos niveles de contaminantes tóxicos (Liu y Tay, 2004).

La presencia de metales pesados es particularmente preocupante. Estos metales no solo son tóxicos para los microorganismos, sino que también pueden acumularse en los lodos activados, lo que complica su disposición final. Los metales pesados, como el plomo, el mercurio no son biodegradables y se bioacumulan en los sistemas biológicos. Esto no solo reduce la eficiencia del tratamiento, sino que también presenta riesgos adicionales para la salud y el medio ambiente cuando los lodos se eliminan o reutilizan (Gikas y Tsihrintzis, 2012).

Los vertimientos no domésticos también pueden provocar variaciones en la carga orgánica y en la composición de las aguas residuales, lo que genera fluctuaciones en la demanda de oxígeno en los tanques de aireación. Estas variaciones, conocidas como "cargas de choque", pueden sobrecargar temporalmente el sistema de tratamiento y reducir su capacidad para manejar los contaminantes de manera efectiva. Las cargas de choque son comunes cuando las industrias descargan grandes volúmenes de aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes en cortos periodos de tiempo, lo que altera el equilibrio del sistema y afecta la eficiencia general (Metcalf y Eddy, 2014).

3.1.4 Efectos Ambientales del Vertimiento

Los vertimientos industriales en los cuerpos de agua representan una amenaza significativa tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud pública. Estos vertimientos contienen contaminantes que, cuando no son adecuadamente tratados, pueden generar efectos adversos a largo plazo en la calidad del agua y la biodiversidad de los ecosistemas. Entre los contaminantes comunes en las aguas residuales industriales se incluyen metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, aceites y grasas, y nutrientes en exceso, como nitrógeno y fósforo. La descarga no controlada de estos elementos puede desencadenar una serie de fenómenos que alteran gravemente el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua receptores (EPA, 2019).

Uno de los efectos más críticos de los vertimientos industriales es la eutrofización. Este proceso ocurre cuando un exceso de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, se acumula en un cuerpo de agua. Estos nutrientes, que a menudo provienen de vertimientos industriales y agrícolas, promueven el crecimiento desmedido de algas y otras plantas acuáticas. A medida que estas plantas mueren y se descomponen, el oxígeno disuelto en el agua se agota, lo que lleva a la creación de "zonas muertas" donde los niveles de oxígeno son tan bajos que la vida acuática no puede sobrevivir. La eutrofización no solo altera la biodiversidad, sino que también afecta los servicios ecosistémicos, como la calidad del agua potable y las actividades recreativas y pesqueras (Smith et al., 1999).

La toxicidad es otro impacto ambiental importante asociado con los vertimientos industriales. Muchos vertimientos contienen metales pesados, como plomo, mercurio, que son altamente tóxicos para la fauna acuática y los humanos. Estos metales no son biodegradables, lo que significa que se acumulan en el sedimento y en los organismos a lo largo de la cadena

alimentaria, un fenómeno conocido como bioacumulación. A medida que los metales pesados se acumulan en los tejidos de los organismos, pueden alcanzar concentraciones tóxicas que afectan a los peces, invertebrados y otros organismos acuáticos, provocando la disminución de las poblaciones y afectando la salud de los ecosistemas (Ali et al., 2019).

Además de los metales pesados, los vertimientos industriales suelen contener compuestos orgánicos persistentes (COPs), como pesticidas y solventes industriales. Estos compuestos, al igual que los metales, no se degradan fácilmente y pueden permanecer en el ambiente durante años. Los COPs son altamente tóxicos para la vida acuática y, en algunos casos, pueden tener efectos cancerígenos y mutagénicos en los humanos. La exposición prolongada a estos compuestos puede llevar a una disminución en la diversidad biológica y afectar la reproducción de las especies acuáticas, lo que pone en peligro la estabilidad del ecosistema (USEPA, 2020).

Otro efecto relevante es la acidificación de los cuerpos de agua causada por vertimientos industriales que contienen ácidos o sustancias que se descomponen en compuestos ácidos. La acidificación altera el pH del agua, lo que afecta la capacidad de los organismos acuáticos para realizar funciones fisiológicas esenciales, como el intercambio de gases y la regulación de iones. Los peces y otros organismos acuáticos son particularmente sensibles a los cambios en el pH, y la acidificación puede resultar en una disminución de las poblaciones, pérdida de biodiversidad y cambios en la estructura del ecosistema (Battarbee et al., 2014).

Desde una perspectiva de salud pública, los vertimientos industriales no tratados o insuficientemente tratados también tienen implicaciones graves. Los metales pesados y los compuestos orgánicos tóxicos pueden infiltrarse en los suministros de agua potable, lo que representa un riesgo directo para la salud humana. La exposición crónica a bajas concentraciones de metales pesados puede causar daños neurológicos, problemas renales y enfermedades

cardiovasculares. Además, los compuestos orgánicos persistentes pueden interferir con el sistema endocrino humano, afectando el desarrollo y la reproducción (WHO, 2018).

Por último, los vertimientos industriales contribuyen al deterioro de los servicios ecosistémicos que proporcionan los cuerpos de agua. Los ríos, lagos y humedales que reciben vertimientos contaminantes ven reducida su capacidad para filtrar contaminantes de manera natural, recargar los acuíferos y sustentar la biodiversidad. Este deterioro ecológico afecta directamente a las comunidades humanas que dependen de estos recursos, ya sea para agua potable, agricultura, pesca o recreación. La pérdida de calidad del agua y de biodiversidad también puede tener efectos económicos negativos, disminuyendo la productividad de las pesquerías y el turismo en las regiones afectadas (MEA, 2005).

3.2 Marco Conceptual

Definición de Aguas Residuales: Las aguas residuales son el conjunto de desechos líquidos que resultan de diversas actividades humanas, tanto domésticas como industriales. Estas aguas pueden contener una amplia gama de contaminantes, como materia orgánica, inorgánica, metales pesados y sustancias químicas. Las aguas residuales domésticas provienen de actividades diarias en hogares, como el uso de sanitarios, la preparación de alimentos y el lavado de ropa, y suelen contener principalmente materia orgánica y nutrientes.

Por otro lado, las aguas residuales no domésticas o industriales son aquellas que provienen de procesos productivos en fábricas y otras instalaciones industriales. Estas últimas contienen contaminantes más complejos y peligrosos, como metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y sustancias químicas, que requieren tratamientos específicos y diferenciados para su adecuada depuración (Tchobanoglous et al., 2003).

Definición de Vertimientos No Domésticos: Los vertimientos no domésticos son descargas líquidas que provienen de actividades industriales, comerciales o de servicios, y se caracterizan por contener contaminantes específicos que no suelen estar presentes en las aguas residuales domésticas. Estos vertimientos pueden incluir metales pesados, aceites, grasas, compuestos orgánicos persistentes y productos químicos que resultan de los procesos industriales.

A diferencia de las aguas residuales domésticas, que contienen principalmente materia orgánica y nutrientes, los vertimientos no domésticos requieren tratamientos diferenciados debido a la toxicidad y complejidad de sus contaminantes, los cuales pueden interferir con los procesos biológicos en las plantas de tratamiento, como la inhibición de microorganismos en sistemas de lodos activados (EPA, 2019).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): DBO es un parámetro fundamental en el análisis de la calidad del agua, ya que mide la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual. Un alto valor de DBO indica una gran cantidad de materia orgánica y, por lo tanto, un alto potencial de contaminación.

La DBO es crucial para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales, particularmente en sistemas biológicos como los lodos activados, donde los microorganismos aeróbicos dependen del oxígeno para degradar los contaminantes. Un sistema eficiente debería reducir significativamente los niveles de DBO antes de que el agua tratada sea vertida en cuerpos de agua receptores (Metcalf y Eddy, 2014).

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se refieren a todas las partículas sólidas, tanto orgánicas como inorgánicas, que están suspendidas en el agua y

no se disuelven. Este parámetro es esencial para evaluar la calidad del agua tratada, ya que una alta concentración de SST puede reducir la eficiencia de los procesos de tratamiento biológico, al obstruir los sistemas de aireación y sedimentación en plantas de tratamiento de aguas residuales.

La remoción adecuada de los SST es clave para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad antes de ser descargada en cuerpos de agua, ya que una elevada cantidad de sólidos puede afectar negativamente a la fauna acuática y contribuir a la turbidez del agua (Tchobanoglous et al., 2003).

3.3 Marco Legal

El marco legal que regula los vertimientos de aguas residuales es fundamental para garantizar la protección de los cuerpos hídricos y la salud pública. En Colombia, existen varias normativas que establecen límites permisibles para los vertimientos tanto domésticos como industriales, con el objetivo de minimizar la contaminación y preservar la calidad del agua. Entre las normativas más relevantes se encuentra la Resolución N° 0631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los parámetros y valores límite para los vertimientos de aguas residuales en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado.

Esta normativa es de gran importancia para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Silvestre, ya que regula los vertimientos que recibe, tanto de origen doméstico como no doméstico. La Resolución N° 0631 de 2015 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales que son descargadas en cuerpos de agua superficiales, con el fin de evitar la degradación de los recursos hídricos. Entre los parámetros que regula esta normativa se encuentran la DBO, los Sólidos Suspendidos Totales (SST), los compuestos nitrogenados, los fosfatos, y otros contaminantes específicos, como metales pesados y sustancias tóxicas.

Estos parámetros son esenciales para garantizar que las aguas residuales sean adecuadamente tratadas antes de ser vertidas en los cuerpos hídricos, protegiendo así la biodiversidad y evitando la contaminación del agua utilizada para consumo humano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). La DBO es uno de los parámetros clave regulados por la Resolución N° 0631, ya que mide la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica en el agua.

Un alto valor de DBO indica una alta carga contaminante, lo que puede causar la reducción de oxígeno en los cuerpos hídricos receptores, afectando negativamente a la vida acuática. La normativa establece que las aguas residuales que se descarguen en cuerpos de agua no deben exceder los 70 mg/L de DBO para evitar estos efectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Otro parámetro importante es el de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), que incluyen partículas de materia orgánica e inorgánica presentes en el agua residual.

La presencia excesiva de SST puede afectar la transparencia del agua y la fotosíntesis de las plantas acuáticas, además de generar sedimentos que impactan negativamente en los ecosistemas. La Resolución N° 0631 establece un límite de 70 mg/L de SST en los vertimientos permitidos para evitar la sedimentación y garantizar la calidad del agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). La normativa también regula la presencia de metales pesados en las aguas residuales, como el plomo, mercurio.

Estos metales son altamente tóxicos y pueden bioacumularse en los organismos acuáticos, afectando a la fauna y, en última instancia, a los humanos que consumen pescado contaminado. La resolución establece límites estrictos para la presencia de estos metales, siendo el plomo un ejemplo, que no debe exceder los 0.5 mg/L en los vertimientos, mientras que el

mercurio tiene un límite de 0.002 mg/L debido a su alta toxicidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Los vertimientos no domésticos representan un reto particular para las plantas de tratamiento como la PTAR San Silvestre, ya que contienen contaminantes más complejos que las aguas residuales domésticas, como aceites, grasas y sustancias tóxicas. La Resolución N° 0631 de 2015 establece que las industrias deben realizar un tratamiento previo a sus vertimientos antes de descargarlos en el sistema de alcantarillado, para cumplir con los límites permisibles establecidos. Esto incluye el monitoreo constante de los vertimientos industriales para evitar que sustancias tóxicas ingresen a la planta de tratamiento, afectando su eficiencia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

A nivel internacional, la normativa colombiana ha sido influenciada por instrumentos legales de otros países. Por ejemplo, la legislación de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos es una de las más avanzadas en cuanto a la regulación de los vertimientos industriales. La EPA establece límites muy estrictos para los vertimientos de aguas residuales, especialmente en lo que respecta a la presencia de compuestos orgánicos persistentes (COPs), que son sustancias químicas que no se degradan fácilmente y que pueden acumularse en el ambiente y los organismos vivos (EPA, 2019).

En Europa, la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) es uno de los marcos normativos más importantes en cuanto a la gestión de los recursos hídricos. Esta directiva tiene como objetivo proteger y restaurar los cuerpos de agua en toda la Unión Europea, estableciendo límites estrictos para los vertimientos de aguas residuales. La normativa europea también regula la eutrofización, causada por el exceso de nutrientes en los cuerpos de agua, y establece parámetros

específicos para controlar el vertimiento de fosfatos y nitratos, que son nutrientes comunes en los vertimientos industriales y agrícolas (European Commission, 2020).

Además de la EPA y la Directiva Europea, existen otros instrumentos internacionales relevantes, como los Convenios de Basilea y Estocolmo, que regulan el manejo de sustancias peligrosas y productos químicos tóxicos. Estos convenios establecen directrices para el manejo y disposición de sustancias químicas peligrosas, muchas de las cuales están presentes en los vertimientos industriales, y han influido en la legislación de muchos países, incluida Colombia (United Nations, 2021).

En Colombia, además de la Resolución N° 0631 de 2015, existen otras normativas que complementan el marco regulatorio para el manejo de aguas residuales. Por ejemplo, el Decreto 3930 de 2010, compilado en el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 1076 de 2015), establece los principios generales para el manejo del recurso hídrico en el país. Este decreto define los parámetros para la clasificación de las aguas y regula los vertimientos en cuerpos hídricos superficiales y subterráneos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Otro instrumento clave es el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), que obliga a los prestadores del servicio de alcantarillado a implementar planes para la reducción de la contaminación y la mejora en el tratamiento de aguas residuales. El PSMV establece medidas de control y monitoreo de los vertimientos, con el fin de reducir la carga contaminante que ingresa a las plantas de tratamiento (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018).

3.4 Estado del Arte

3.4.1 Estado del Conocimiento en el Tratamiento de Aguas Residuales Mixtas

El tratamiento de aguas residuales mixtas, que combina vertimientos domésticos e industriales, ha sido objeto de numerosas investigaciones recientes debido a los desafíos que presenta para las plantas de tratamiento. Las aguas residuales domésticas y no domésticas (industriales) difieren en su composición, lo que complica los procesos de tratamiento convencionales. Mientras que las aguas residuales domésticas contienen principalmente materia orgánica biodegradable, nutrientes y sólidos suspendidos, las aguas industriales suelen contener contaminantes más complejos, como metales pesados, aceites, grasas y compuestos tóxicos, lo que dificulta su tratamiento eficiente.

Las investigaciones más recientes han demostrado que la combinación de estos dos tipos de vertimientos genera fluctuaciones en la carga contaminante que ingresa a las plantas de tratamiento, afectando la eficiencia de los procesos biológicos. En un estudio realizado por Gikas y Tsihrintzis (2012), se encontró que las aguas residuales mixtas pueden causar "choques de carga" en las plantas de tratamiento de lodos activados, donde las cargas elevadas de compuestos tóxicos provenientes de los vertimientos industriales pueden inhibir la actividad microbiana necesaria para la degradación de la materia orgánica. Esto no solo reduce la eficiencia del tratamiento, sino que también incrementa la producción de lodos y el riesgo de que contaminantes no tratados sean descargados en cuerpos de agua.

Otro aspecto clave que se ha explorado en las investigaciones recientes es el efecto de los compuestos recalcitrantes presentes en las aguas industriales. Estos compuestos, como los hidrocarburos, pesticidas y solventes industriales, no son fácilmente biodegradables y pueden acumularse en el sistema, afectando la estabilidad de los procesos biológicos. Un estudio

realizado por Zhang et al. (2018) concluyó que la presencia de estos compuestos en las aguas mixtas reduce significativamente la eficiencia de los tratamientos biológicos convencionales, como los sistemas de lodos activados, ya que los microorganismos no pueden metabolizarlos eficazmente.

Para enfrentar estos desafíos, las investigaciones han propuesto la implementación de pretratamientos industriales antes de que las aguas residuales no domésticas ingresen al sistema de tratamiento principal. Estos pretratamientos pueden incluir procesos fisicoquímicos, como la coagulación-floculación, filtración avanzada, o tecnologías de oxidación avanzada, que ayudan a remover contaminantes tóxicos y compuestos recalcitrantes antes de que lleguen a los sistemas biológicos. De acuerdo con un estudio de Verma et al. (2020), la incorporación de tecnologías de pretratamiento ha demostrado ser efectiva para mejorar la estabilidad de los procesos biológicos en plantas que manejan vertimientos mixtos, aumentando la eficiencia de remoción de contaminantes.

Además de los pretratamientos, otro enfoque que ha sido evaluado es el uso de reactores biológicos de membrana (MBR), una tecnología que combina el tratamiento biológico convencional con la filtración por membrana. Este tipo de tecnología ha demostrado ser altamente eficiente en la remoción de contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos en aguas residuales mixtas. En un estudio realizado por Judd y Jefferson (2018), se encontró que los sistemas MBR permiten un control más preciso de la calidad del efluente, lo que es especialmente beneficioso para plantas que tratan vertimientos con alta variabilidad en la carga contaminante, como es el caso de las aguas residuales mixtas.

Otro desafío identificado en las investigaciones recientes es la corrosión en los sistemas de tratamiento de aguas residuales mixtas. La mezcla de vertimientos industriales y domésticos

puede generar gases corrosivos, como el ácido sulfhídrico (H_2S), que dañan las estructuras de las plantas de tratamiento y aumentan los costos de mantenimiento. Un estudio de Marín Galvín (2011) destaca la necesidad de implementar sistemas de monitoreo y control de gases corrosivos en plantas que manejan vertimientos mixtos, para prevenir daños estructurales y mejorar la vida útil de las instalaciones.

A nivel global, las investigaciones han mostrado que el tratamiento de aguas residuales mixtas es un desafío no solo técnico, sino también normativo. En muchos países, las normativas no establecen límites claros para la combinación de aguas residuales domésticas e industriales, lo que dificulta la implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento. En este contexto, se ha sugerido la necesidad de actualizar las regulaciones para adaptarlas a las condiciones actuales y garantizar que las plantas de tratamiento puedan manejar eficientemente las cargas mixtas (European Commission, 2020).

Finalmente, las investigaciones recientes también han señalado la importancia de utilizar modelos de simulación avanzados, como el EPA SWMM (Storm Water Management Model), para predecir los efectos de los vertimientos mixtos en los sistemas de tratamiento. Estos modelos permiten simular diferentes escenarios de carga contaminante y evaluar el impacto de los vertimientos industriales en los sistemas biológicos, lo que ayuda a los operadores de plantas de tratamiento a optimizar sus procesos y a mejorar la gestión de vertimientos (Rossman, 2017).

3.4.2 Investigaciones Relevantes sobre Vertimientos No Domésticos

Las aguas residuales no domésticas, que provienen principalmente de actividades industriales, representan un desafío significativo para las plantas de tratamiento diseñadas específicamente para manejar aguas residuales domésticas. Estas plantas suelen estar optimizadas para tratar aguas con altos niveles de materia orgánica biodegradable, sólidos

suspendidos y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, los vertimientos industriales pueden introducir contaminantes más complejos, como metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, y productos químicos recalcitrantes, lo que afecta gravemente la eficiencia del tratamiento biológico convencional.

Un estudio reciente de Judd y Jefferson (2018) evalúa el impacto de los vertimientos industriales en plantas de tratamiento basadas en sistemas de lodos activados, concluyendo que la presencia de contaminantes industriales puede reducir significativamente la eficiencia del proceso biológico. Según los autores, compuestos como los hidrocarburos y los metales pesados tienen un efecto inhibitorio sobre los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica, lo que lleva a una reducción en la remoción de la DBO. Además, destacan que las plantas diseñadas exclusivamente para aguas residuales domésticas no están preparadas para manejar la variabilidad de los vertimientos industriales, lo que resulta en fluctuaciones en la calidad del efluente final (Judd y Jefferson, 2018).

Otro estudio relevante realizado por Liu et al. (2019) analiza las estrategias para mejorar la operación de plantas de tratamiento que reciben vertimientos industriales. Los autores sugieren que uno de los enfoques más efectivos es la implementación de pretratamientos industriales en las fábricas antes de que las aguas residuales sean descargadas en el sistema de alcantarillado. Entre las tecnologías de pretratamiento evaluadas, se destacan la coagulación-floculación y los procesos de filtración avanzada, que han demostrado ser eficaces para remover contaminantes tóxicos y recalcitrantes antes de que ingresen a los sistemas biológicos de las plantas. Esta estrategia no solo protege los procesos biológicos en las plantas, sino que también reduce los costos operativos al minimizar la producción de lodos y la necesidad de tratamientos adicionales (Liu et al., 2019).

La corrosión de las infraestructuras es otro problema identificado en las plantas que tratan vertimientos industriales. Según un estudio de Marín Galvín (2011), los gases corrosivos, como el ácido sulfhídrico (H_2S), generados por la descomposición de ciertos compuestos presentes en las aguas industriales, pueden dañar las estructuras de concreto y las tuberías de las plantas de tratamiento. Esto no solo incrementa los costos de mantenimiento, sino que también puede acortar la vida útil de las instalaciones. El estudio recomienda la instalación de sistemas de monitoreo de gases y la implementación de tecnologías de neutralización de ácidos como estrategias para mitigar los efectos de la corrosión (Marín Galvín, 2011).

Gikas y Tsihrintzis (2012) realizaron una investigación sobre el impacto de los vertimientos industriales en plantas de tratamiento de aguas residuales mixtas (domésticas e industriales), encontrando que los choques de carga causados por las descargas irregulares de aguas industriales afectan significativamente la estabilidad de los sistemas biológicos. Los autores subrayan que la variabilidad en la composición y cantidad de los vertimientos industriales dificulta el control de los procesos biológicos, lo que conduce a una menor eficiencia en la remoción de contaminantes y una mayor producción de lodos activados. Para enfrentar estos desafíos, proponen la instalación de tanques de equalización que permitan homogenizar los vertimientos antes de que ingresen a las plantas de tratamiento, asegurando un flujo más constante y manejable (Gikas y Tsihrintzis, 2012).

Una solución innovadora para mejorar la operación de plantas que tratan vertimientos industriales es el uso de tecnologías de membranas, como los reactores biológicos de membrana (MBR). Según Zhang et al. (2018), los MBR han demostrado ser altamente efectivos en la remoción de contaminantes complejos presentes en las aguas industriales, ya que combinan el tratamiento biológico con la filtración física. Los estudios han mostrado que esta tecnología

permite un control más preciso de los sólidos suspendidos y los contaminantes tóxicos, reduciendo la carga sobre los procesos biológicos y mejorando la calidad del efluente final. Además, los MBR tienen la ventaja de ocupar menos espacio y requerir menos energía que los sistemas convencionales de lodos activados (Zhang et al., 2018).

Por otro lado, Verma et al. (2020) proponen el uso de procesos de oxidación avanzada (AOP) como una estrategia complementaria para mejorar la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes en plantas que reciben vertimientos industriales. Los AOP, que incluyen tecnologías como la ozonización y la fotocatalisis, han demostrado ser altamente eficaces en la degradación de contaminantes tóxicos que no pueden ser eliminados mediante procesos biológicos convencionales. La implementación de estos sistemas, según los autores, mejora significativamente la calidad del efluente y reduce el impacto ambiental de los vertimientos industriales (Verma et al., 2020).

Finalmente, Rossman (2017) destaca la importancia de utilizar modelos de simulación, como el EPA SWMM (Storm Water Management Model), para optimizar la operación de las plantas de tratamiento que manejan vertimientos industriales. Estos modelos permiten simular diferentes escenarios de carga contaminante y evaluar el impacto de los vertimientos industriales en los sistemas biológicos, lo que ayuda a los operadores a ajustar los parámetros operativos de las plantas y a prever posibles fallos en el tratamiento (Rossman, 2017).

3.4.3 Tesis y Proyectos Previos

En el contexto de la contaminación por vertimientos no domésticos, diversos estudios de tesis de maestría y doctorado han proporcionado información valiosa sobre las estrategias de tratamiento de aguas residuales que incluyen vertimientos industriales y su impacto en los sistemas de tratamiento convencionales. Estos estudios no solo ofrecen un análisis de las

características de los vertimientos no domésticos, sino que también presentan soluciones tecnológicas y regulatorias que pueden servir como base comparativa para el caso de la PTAR San Silvestre en Barrancabermeja, Colombia.

Una de las tesis más relevantes fue realizada por Linares (2016) en la Universidad de los Andes, Colombia, que investigó el impacto de los vertimientos industriales sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales diseñadas para manejar exclusivamente aguas residuales domésticas. Linares identificó que las plantas de tratamiento en varias ciudades colombianas, como Bogotá y Medellín, enfrentan desafíos significativos cuando se trata de gestionar la mezcla de vertimientos industriales y domésticos. Su tesis destacó que los compuestos tóxicos presentes en los vertimientos industriales, como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles, inhiben la actividad microbiana en los sistemas de lodos activados, reduciendo la eficiencia en la remoción de DBO. Además, propuso la implementación de tecnologías de pretratamiento en las industrias como una medida crucial para mejorar la eficiencia del tratamiento en plantas como la PTAR San Silvestre (Linares, 2016).

En una tesis doctoral realizada por Castaño (2018) en la Universidad Nacional de Colombia, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los efectos de los vertimientos industriales sobre la calidad del agua tratada en plantas de tratamiento de aguas residuales en el departamento de Antioquia. Castaño investigó específicamente los problemas de corrosión y sedimentación en las plantas que reciben aguas residuales mixtas. Su investigación sugirió que la introducción de vertimientos industriales aumenta la generación de gases corrosivos, como el sulfuro de hidrógeno, que aceleran el deterioro de las infraestructuras. Además, propuso soluciones innovadoras, como el uso de bioreactores anaerobios y sistemas de monitoreo en tiempo real

para controlar la calidad de los vertimientos no domésticos antes de que ingresen a las plantas de tratamiento (Castaño, 2018).

A nivel internacional, una tesis de maestría realizada en la Universidad Politécnica de Valencia, España, por García (2017) abordó el tema del tratamiento de aguas residuales industriales en plantas diseñadas para aguas domésticas. García investigó varias plantas de tratamiento en España que recibían vertimientos industriales de sectores como la minería y la petroquímica. Su estudio encontró que las plantas de tratamiento diseñadas originalmente para aguas domésticas no tenían la capacidad para manejar los altos niveles de contaminantes recalcitrantes presentes en las aguas industriales. García recomendó la implementación de sistemas de membranas, como los reactores biológicos de membrana (MBR), para mejorar la eficiencia en la remoción de compuestos tóxicos y reducir la producción de lodos (García, 2017).

Otra investigación relevante fue desarrollada por Martínez (2019) en la Universidad de Chile, en la cual se evaluaron los impactos ambientales de los vertimientos industriales en el río Maipo y su influencia sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales. Martínez destacó que las plantas de tratamiento de Santiago enfrentan problemas similares a los de Colombia, ya que los vertimientos industriales aumentan la carga de sólidos suspendidos y sustancias tóxicas, lo que compromete la eficiencia del tratamiento biológico. Su investigación también identificó la necesidad de un marco regulatorio más estricto para controlar los vertimientos no domésticos y propuso la implementación de pretratamientos obligatorios en las industrias antes de que descarguen sus aguas en los sistemas de alcantarillado (Martínez, 2019).

En otro ejemplo, Pérez (2020), en su tesis de maestría en la Universidad de São Paulo, Brasil, evaluó los efectos de la industria petroquímica sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales en la región de São Paulo. Pérez encontró que la presencia de hidrocarburos en los

vertimientos industriales afectaba negativamente los procesos de remoción biológica y aumentaba la toxicidad de los lodos generados. Su estudio recomendó la instalación de tecnologías de oxidación avanzada para mejorar la degradación de compuestos recalcitrantes y proteger la eficiencia del sistema de tratamiento (Pérez, 2020).

En el ámbito de la gestión de vertimientos industriales, una tesis realizada en la Universidad Técnica de Dinamarca por Hansen (2015) analizó las diferencias en las normativas y regulaciones ambientales entre Europa y América Latina. Hansen destacó que los países europeos, como Dinamarca y Alemania, han implementado estrictos controles sobre los vertimientos industriales, lo que ha permitido la mejora continua de la calidad del agua tratada en las plantas de tratamiento. La tesis de Hansen sugiere que Colombia podría beneficiarse de adoptar medidas regulatorias similares para asegurar el cumplimiento de los límites permisibles establecidos en la Resolución N° 0631 de 2015 (Hansen, 2015).

Por último, una tesis desarrollada en la Universidad de California, Berkeley por Chen (2018) investigó las implicaciones del uso de tecnologías avanzadas de tratamiento, como los procesos de oxidación avanzada (AOP) y la electrocoagulación, para la remoción de compuestos orgánicos tóxicos en plantas de tratamiento mixtas. El estudio de Chen mostró que estas tecnologías eran efectivas para tratar vertimientos industriales complejos que contenían pesticidas y solventes, mejorando significativamente la calidad del efluente y reduciendo el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua receptores (Chen, 2018).

4. Metodología

4.1 Enfoque

El enfoque de este estudio fue de carácter cuantitativo, lo que permitió medir de manera objetiva las variables relacionadas con los vertimientos no domésticos y su impacto en la PTAR San Silvestre. De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), el enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección de datos numéricos, su análisis estadístico, y la medición precisa de las variables, lo que proporciona resultados replicables y comparables. Este enfoque es adecuado para estudios que requieren la evaluación de parámetros como DBO y SST, los cuales se miden en términos numéricos y permiten la comparación con estándares normativos.

4.2 Diseño

El diseño de la investigación fue no experimental, transversal y descriptivo. Este diseño fue seleccionado porque no se manipularon las variables, sino que se observaron en su estado natural dentro del sistema de la PTAR San Silvestre. Específicamente:

- No experimental: Se optó por este enfoque porque el estudio se limitó a registrar las condiciones actuales de los vertimientos no domésticos y sus impactos, sin intervención directa en el sistema.
- Transversal: Se recolectaron datos en un período específico, lo que permitió analizar el estado actual de los vertimientos y su interacción con los sistemas de tratamiento de aguas.
- Descriptivo: Este diseño permitió identificar y caracterizar los principales contaminantes, su origen y su efecto sobre la planta, brindando una visión clara y detallada del problema estudiado.

4.3 Método

El método de análisis fue el método analítico, en el cual se descomponen los elementos y variables implicados en el tratamiento de aguas residuales para estudiar sus componentes por separado. Álvarez-Gayou (2003) define el método analítico como aquel que permite examinar las relaciones causales entre las variables, lo que es esencial para entender cómo los contaminantes industriales afectan el rendimiento del sistema de lodos activados en la planta. Este método es particularmente útil en investigaciones que buscan establecer relaciones entre la calidad del vertimiento y la eficiencia del proceso de tratamiento.

4.4 Tipo de Investigación

El tipo de investigación fue aplicada. Según Sabino (2014), la investigación aplicada tiene como objetivo generar conocimiento práctico que pueda ser utilizado directamente en la mejora de procesos o sistemas. A su vez, fue una investigación evaluativa, ya que el estudio busca evaluar los posibles impactos de vertimientos no domésticos en el alcantarillado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, PTAR San Silvestre, del Municipio de Barrancabermeja, Santander. Cronbach (1980) sostiene que la investigación evaluativa se utiliza para valorar el desempeño de un sistema o programa y sugerir cambios para su optimización.

4.5 Nivel de Investigación

El nivel de investigación fue descriptivo y correlacional. Hernández et al. (2014) afirman que el nivel descriptivo tiene como objetivo describir fenómenos y sus características, mientras que el nivel correlacional busca establecer relaciones entre las variables. En este estudio, el nivel descriptivo se utilizó para caracterizar los vertimientos no domésticos, mientras que el correlacional se enfocó en identificar cómo estos afectan la eficiencia del sistema de tratamiento de la PTAR San Silvestre.

4.6 Participantes

Los participantes del estudio incluyen:

- Entidades industriales: Seleccionadas con base en su relevancia en la generación de vertimientos no domésticos y su contribución a la carga contaminante del sistema de alcantarillado. Hernández et al. (2014) destacan la importancia de seleccionar los participantes de manera cuidadosa para garantizar la representatividad de los resultados.

- Organismos reguladores: Incluyen el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece límites permisibles mediante la Resolución N° 0631 de 2015; la CAS (Corporación Autónoma Regional de Santander), responsable del control de los vertimientos industriales; y Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P., que gestiona y monitorea los vertimientos hacia la PTAR. Además, participan la Alcaldía Distrital de Barrancabermeja y Ecopetrol, como entidades colaboradoras en la sostenibilidad del proyecto. Según Creswell (2009), la participación de entidades regulatorias en estudios ambientales es crucial para garantizar la validez externa del estudio y la aplicación de resultados.

4.7 Herramientas

Las herramientas empleadas incluyen:

- Equipos de medición: Se utilizaron un analizador multiparamétrico portátil para medir parámetros como pH, oxígeno disuelto y conductividad, y un espectrofotómetro UV-Vis para la medición de parámetros como DBO, DQO y SST. Estos equipos cumplen con los estándares establecidos por APHA (2017) para el análisis de calidad del agua en plantas de tratamiento, garantizando precisión y confiabilidad en las mediciones.

- Método de medición: Se realizaron mediciones compuestas, recolectando muestras en diferentes horarios durante un período representativo, con el objetivo de obtener resultados más representativos del comportamiento de los vertimientos a lo largo del tiempo.

4.8 Procedimientos

- Recolección de datos: Los datos se recolectaron a partir de los muestreos realizados en los vertimientos no domésticos en la Comuna 3 de Barrancabermeja durante los años previos (2019-2023), en lugar de las mediciones en la PTAR San Silvestre, ya que la planta aún no se encuentra en operación. Según Taylor, Bogdan y DeVault (2015), el uso de datos históricos permite establecer una línea base de los contaminantes y evaluar las tendencias en los vertimientos a lo largo del tiempo, proporcionando información crítica para la planificación del tratamiento futuro. los vertimientos no domésticos en la Comuna 3 de Barrancabermeja provienen de:

- Usuarios Industriales: Con 8 empresas registradas que generan descargas de aguas residuales industriales. Estas descargas incluyen componentes químicos persistentes y metales pesados como mercurio y plomo, asociados a procesos petroquímicos y metalúrgicos.

- Usuarios Comerciales: Que representan el 5.48% de los usuarios registrados en el sistema de alcantarillado. Sus descargas también contribuyen al aumento de DBO y DQO, aunque en menor proporción comparadas con los usuarios industriales.

- Fuente Receptora Principal: Humedal San Silvestre, que recibe la mayor cantidad de vertimientos no domésticos provenientes de los 19 puntos de descarga identificados en esta comuna

- Análisis de datos: Los datos recolectados se analizaron utilizando herramientas de modelación hidráulica y de calidad de agua, como el software EPA SWMM 5.2. Además, se

aplicaron métodos estadísticos descriptivos para evaluar la variabilidad de parámetros clave como DBO5, SST, DQO, pH, y concentraciones de metales pesados (como mercurio y plomo). También se utilizó análisis de correlación para determinar las interacciones entre estos parámetros y proyectar las condiciones de operación de la planta frente a escenarios de carga contaminante. Según Field (2018), el uso de técnicas de modelación combinadas con análisis estadísticos permite identificar las posibles cargas críticas que podrían comprometer la capacidad de remoción de la futura PTAR, permitiendo anticipar problemas operacionales.

- Simulación y evaluación de escenarios: Se desarrollaron simulaciones utilizando el software EPA SWMM para proyectar el comportamiento de los vertimientos en el sistema de alcantarillado y analizar su interacción con las capacidades proyectadas de la PTAR San Silvestre. Este procedimiento incluyó un proceso de calibración utilizando datos históricos (2019-2023) sobre caudales y cargas contaminantes, verificando el ajuste del modelo con mediciones reales recolectadas en puntos específicos de descarga. La validación del modelo se realizó mediante un análisis de sensibilidad, considerando variaciones en los parámetros clave como DBO, DQO, SST y pH. Se plantearon tres escenarios principales para la simulación:

1. Escenario Base: Representa las condiciones actuales de vertimientos en la Comuna 3, considerando los caudales promedio y cargas actuales de contaminantes.

2. Escenario Incremental: Proyecta un aumento del 20% en los vertimientos no domésticos, simulando un posible crecimiento industrial y comercial en la región.

3. Escenario Óptimo: Evalúa las condiciones bajo las cuales se implementan medidas de pretratamiento por parte de los usuarios no domésticos, reduciendo en un 50% las concentraciones de contaminantes antes de su descarga al sistema de alcantarillado.

La simulación fue fundamental para identificar los puntos críticos de acumulación en el sistema de alcantarillado y proyectar la capacidad de la PTAR para manejar las cargas contaminantes previstas en diferentes escenarios operativos.

- **Elaboración de informes técnicos:** Finalmente, los resultados del análisis fueron documentados en informes técnicos que incluyeron recomendaciones para optimizar el diseño de la PTAR con base en las características actuales de los vertimientos. Para cumplir con el objetivo 3, que busca proponer estrategias para mitigar los impactos de los vertimientos no domésticos en la PTAR San Silvestre, se desarrollaron las siguientes actividades metodológicas:

- **Análisis de Datos:** Se procesaron los resultados de los parámetros clave de calidad del agua (DBO, DQO, SST, pH, y metales pesados) obtenidos de los vertimientos no domésticos en la Comuna 3, identificando las principales fuentes contaminantes y su carga residual.

- **Modelación de Escenarios:** Se utilizaron simulaciones mediante el software EPA SWMM para evaluar la interacción de las cargas contaminantes proyectadas en diferentes condiciones operativas, considerando escenarios base, incrementales y óptimos. Esto permitió identificar los puntos críticos de acumulación y sobrecarga en el sistema de alcantarillado.

- **Propuesta de Medidas:** Con base en los hallazgos, se diseñaron estrategias para optimizar el pretratamiento en usuarios industriales y comerciales, tales como instalación de sistemas de separación de sólidos y reducción de contaminantes orgánicos antes del vertimiento.

- **Validación Normativa:** Las medidas propuestas se alinearon con los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015 y la Resolución 799 de 2021, asegurando su aplicabilidad y efectividad.

Estas acciones permiten plantear soluciones viables que reduzcan los impactos de los vertimientos no domésticos, mejoren la eficiencia de la PTAR, y aseguren el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

5. Resultados y Discusión

5.1 Caracterización de la Calidad del Agua Residual que Ingresa a la PTAR San Silvestre

El primer objetivo del estudio se centra en determinar las características de calidad del agua residual urbano que ingresaría a la futura PTAR San Silvestre, considerando las condiciones actuales de vertimientos no domésticos en la Comuna 3 del Municipio de Barrancabermeja. Dado que la planta aún se encuentra en etapa de construcción, el propósito de esta evaluación es proyectar las características de las aguas residuales que recibiría la PTAR y anticipar los retos potenciales de tratamiento, así como determinar la adecuación del diseño y la capacidad proyectada para manejar estos efluentes.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó la información de muestreo recolectada en los años 2019, 2020, 2021 y 2023 en diversos puntos del alcantarillado de la Comuna 3, evaluando parámetros como DBO, DQO, SST, pH y concentraciones de metales pesados (e.g., mercurio y plomo). Se identificaron variaciones significativas en las cargas de DBO, DQO, SST y otros parámetros clave de los vertimientos no domésticos. Estas variaciones fueron evaluadas mediante un análisis estadístico inferencial utilizando pruebas de hipótesis para comparar los valores anuales en diferentes tramos y periodos de tiempo.

5.1.1 Actividad 1: Análisis de la Variabilidad Temporal de Contaminantes

Los resultados del análisis de variabilidad temporal indican fluctuaciones significativas en las concentraciones de DBO, DQO y SST en los diferentes puntos de muestreo a lo largo del sistema de alcantarillado, el nivel de confianza empleado fue del **95%** ($\alpha = 0.05$), asegurando la robustez de los resultados y la identificación de diferencias estadísticamente significativas entre los datos recolectados. Se observa que los valores máximos de DBO superan los 200 mg/L en varios puntos, lo cual indica una alta carga orgánica que podría afectar el tratamiento biológico en la planta. La Tabla 1 presenta un resumen de la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo.

Tabla 1.

Variabilidad Temporal de Parámetros de Calidad de Agua en Vertimientos No Domésticos hacia la PTAR San Silvestre

Tramo / Año	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Mercurio (mg/L)	Plomo (mg/L)
T1 - 2019	210	360	150	7.4	0.012	0.015
T1 - 2020	185	340	140	7.2	0.011	0.014
T1 - 2021	220	370	155	7.3	0.013	0.016
T1 - 2023	200	350	145	7.5	0.014	0.015
T2 - 2019	190	310	135	7.6	0.010	0.013
T2 - 2020	180	300	130	7.4	0.009	0.012
T2 - 2021	195	315	140	7.5	0.010	0.013
T2 - 2023	185	305	135	7.7	0.011	0.012
T3 - 2019	230	400	165	7.3	0.015	0.018
T3 - 2020	215	385	160	7.2	0.014	0.017
T3 - 2021	235	405	170	7.4	0.016	0.019
T3 - 2023	225	395	165	7.5	0.015	0.018

Tramo / Año	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Mercurio (mg/L)	Plomo (mg/L)
T4 - 2019	240	420	175	7.1	0.018	0.020
T4 - 2020	230	410	170	7.0	0.017	0.019
T4 - 2021	245	425	180	7.2	0.019	0.021
T4 - 2023	235	415	175	7.3	0.018	0.020
T5 - 2019	220	370	160	7.8	0.013	0.017
T5 - 2020	210	360	155	7.6	0.012	0.016
T5 - 2021	225	375	165	7.7	0.014	0.018
T5 - 2023	215	365	160	7.8	0.013	0.017

La caracterización de aguas residuales urbanas es un pilar fundamental para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento y proyectar sus impactos ambientales. Según el American Public Health Association (APHA, 2017), los parámetros fisicoquímicos como DBO, DQO, SST y metales pesados son esenciales para clasificar la calidad del agua residual en categorías de débiles, medias o fuertes. Esta categorización permite determinar la capacidad y eficacia del tratamiento proyectado en instalaciones como la futura PTAR San Silvestre.

Según la clasificación de Metcalf & Eddy (2014), las aguas residuales se categorizan en tres rangos: débiles (<150 mg/L), moderadas (150-250 mg/L) y fuertes (>250 mg/L). De acuerdo con los valores obtenidos en la evaluación de la variabilidad temporal, la concentración de DBO en los vertimientos no domésticos de la PTAR San Silvestre fluctúa entre 180 mg/L y 245 mg/L en los diferentes tramos analizados. Esto implica que la mayoría de los vertimientos se encuentran en la categoría de aguas residuales moderadas, con excepciones puntuales como el tramo T4-2021, donde se registra un valor de 245 mg/L, acercándose al umbral de aguas residuales fuertes.

Desde la perspectiva normativa, la Resolución 0631 de 2015 establece un límite máximo permisible de 70 mg/L para la DBO en vertimientos dirigidos a cuerpos de agua superficiales.

Comparando estos valores con los datos obtenidos, se evidencia que todos los vertimientos analizados superan ampliamente el estándar permitido, con valores que triplican e incluso cuadruplican el límite normativo. Esta situación sugiere la necesidad de implementar estrategias de pretratamiento en los vertimientos industriales antes de su ingreso a la PTAR, con el fin de reducir la carga contaminante y optimizar la eficiencia del tratamiento biológico en la planta.

Los sistemas de lodos activados han sido ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos, debido a su eficiencia en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Metcalf & Eddy, 2014). Los datos obtenidos en la PTAR San Silvestre evidencian que los vertimientos no domésticos presentan concentraciones elevadas de SST, con valores que oscilan entre 130 mg/L y 180 mg/L en todos los tramos analizados. Estos valores superan el límite normativo de 100 mg/L establecido en la Resolución 0631 de 2015, lo que justifica la necesidad de sistemas de tratamiento avanzados capaces de manejar estas cargas contaminantes de manera efectiva.

En este contexto, los sistemas aerobios de lodos activados son la alternativa más adecuada, ya que permiten tiempos de retención más cortos y una mayor capacidad de procesamiento en comparación con los sistemas anaerobios. De acuerdo con Metcalf & Eddy (2014), los sistemas anaerobios son menos eficientes para el tratamiento de aguas con altas cargas de DBO y SST, como las presentes en los vertimientos industriales de la PTAR San Silvestre. Su eficiencia es menor en la eliminación de sólidos en suspensión y requieren tiempos de tratamiento más prolongados, lo que limita su aplicabilidad en plantas que reciben cargas contaminantes variables.

La implementación de sistemas de lodos activados en la PTAR San Silvestre garantizaría una mayor estabilidad en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, optimizando el desempeño del tratamiento biológico y asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

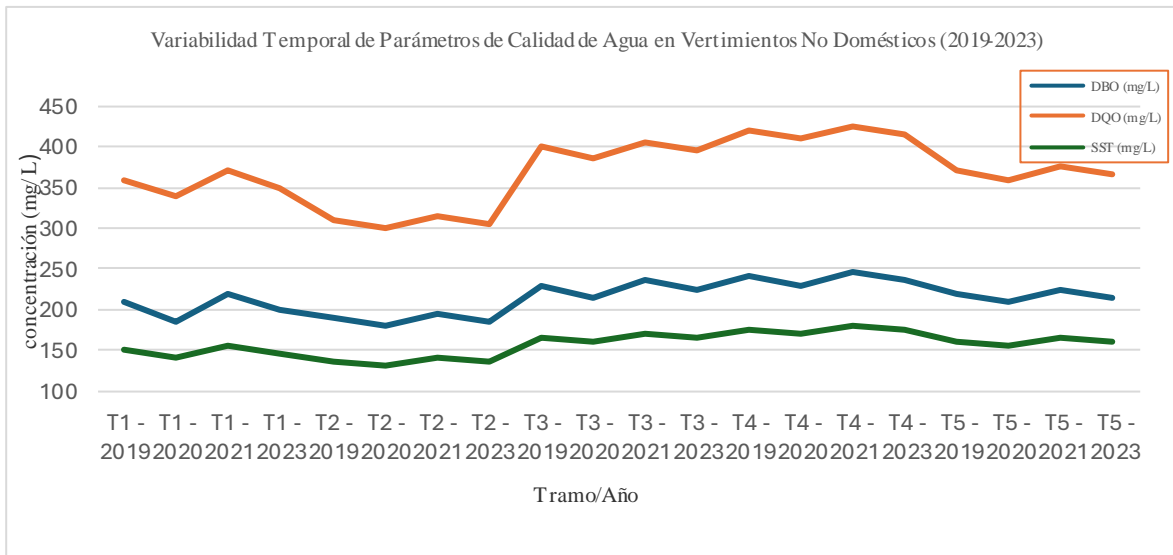
Por otro lado, aunque los sistemas anaerobios son una alternativa viable, especialmente para aguas residuales con muy altas cargas orgánicas y baja relación DBO/DQO, su uso puede ser limitado en este caso debido a la variabilidad temporal en la calidad de los vertimientos, que requiere una respuesta operativa más dinámica y eficiente. Los sistemas anaerobios, además, presentan limitaciones en la eliminación de SST y requieren mayor tiempo para alcanzar eficiencias similares a las de sistemas aeróbicos (Metcalf & Eddy, 2014).

Ajustes operativos necesarios incluyen:

1. Implementación de pretratamientos para reducir la concentración de sólidos gruesos y metales pesados, minimizando la interferencia en los procesos biológicos.
2. Ajuste de las tasas de aireación para manejar variaciones en la carga de DBO y evitar sobrecargas en los tanques de aireación.
3. Monitoreo continuo de la relación DBO/DQO para garantizar la estabilidad del proceso y prevenir descensos en la eficiencia de remoción.

Figura 1.

Variabilidad de DBO, DQO y SST a lo Largo del Año en los Vertimientos No Domésticos Hacia la PTAR San Silvestre



El gráfico presentado ilustra la variabilidad temporal de tres parámetros de calidad de agua en vertimientos no domésticos, medidos durante el periodo 2019-2023. Los parámetros incluidos son DBO, DQO y SST. La evolución de cada parámetro se muestra con líneas de color diferentes para resaltar cada observación anual.

La concentración de SST en los vertimientos de la Comuna 3 fluctuó entre 130-180 mg/L durante el periodo 2019-2023. Según Gikas y Tsihrintzis (2012), valores superiores a 100 mg/L son considerados elevados, ya que pueden afectar la sedimentación en el tratamiento primario y reducir la eficiencia de los sistemas secundarios, como los lodos activados. Al compararlos con el límite establecido por la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos hacia cuerpos de agua superficiales (70 mg/L), se observa un incumplimiento significativo, lo que resalta la necesidad de medidas correctivas para cumplir con las normativas.

La presencia de metales pesados, como plomo y mercurio, en las aguas residuales de la Comuna 3 representa un riesgo ambiental significativo. Según Ali, Khan e Ilahi (2019), estos metales son altamente tóxicos incluso en concentraciones bajas, debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación. Las concentraciones registradas exceden los límites permisibles establecidos en la normativa nacional, indicando la necesidad de tratamientos avanzados, como la electrocoagulación y la adsorción, para garantizar su remoción eficaz y proteger tanto los ecosistemas acuáticos como la salud pública.

La gestión eficiente de vertimientos industriales requiere la adopción de tecnologías híbridas, que combinen procesos biológicos y físico-químicos, permitiendo una mayor capacidad de remoción de contaminantes no biodegradables y mejorando la estabilidad del sistema de tratamiento (Castaño, 2018). Estudios en Antioquia han evidenciado desafíos similares en la gestión de vertimientos industriales hacia plantas de tratamiento, resaltando la necesidad de implementar sistemas combinados que incluyan procesos físico-químicos previos al tratamiento biológico, a fin de optimizar la eficiencia en la remoción de contaminantes (Castaño, 2018).

Además, la variabilidad interanual observada en los vertimientos hacia la PTAR San Silvestre justifica la necesidad de monitoreo continuo, ya que las fluctuaciones en la carga contaminante pueden afectar la eficiencia operativa de la planta. Según la EPA (2019), la implementación de sistemas de monitoreo continuo en tiempo real es fundamental para anticipar variaciones en la calidad del agua y optimizar la respuesta operativa del sistema de tratamiento.

Los datos analizados en la tabla de variabilidad temporal muestran fluctuaciones significativas en DBO, DQO y SST entre diferentes años y tramos. Por ejemplo, en el Tramo T4-2020, la DBO registrada fue de 230 mg/L, pero en 2021 aumentó a 245 mg/L, lo que indica una tendencia de incremento en la carga orgánica. De manera similar, el Tramo T3-2021 presentó

una DBO de 235 mg/L, mientras que en 2023 bajó a 225 mg/L, evidenciando una oscilación en la composición de los vertimientos no domésticos. Estas variaciones refuerzan la necesidad de monitoreo en tiempo real y una actualización de los protocolos de control, con el fin de ajustar el tratamiento a las condiciones dinámicas de los vertimientos industriales.

Implementar tecnologías híbridas junto con sistemas de monitoreo en tiempo real permitirá a la PTAR San Silvestre reducir la incertidumbre en el tratamiento de vertimientos industriales, mejorar la eficiencia operativa y asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

En ciudades con industrias petroquímicas predominantes, como Barrancabermeja, es común encontrar altos niveles de DQO y SST debido a los procesos de refinación y manejo de hidrocarburos (Liu et al., 2019). Según la Resolución 0631 de 2015, el límite normativo para la DQO es de 300 mg/L, mientras que para los SST es de 70 mg/L en vertimientos hacia cuerpos de agua superficiales. Los datos registrados entre 2019 y 2023 muestran concentraciones de DQO que superan los 400 mg/L en algunos tramos, lo cual excede ampliamente los valores normativos y lo esperado para vertimientos urbanos sin influencia industrial, que generalmente se encuentran por debajo de 250 mg/L (Metcalf & Eddy, 2014).

El exceso de DQO implica una alta carga de materia orgánica y compuestos difíciles de degradar, que puede saturar los sistemas biológicos de tratamiento, reduciendo su eficiencia y aumentando los costos operativos. Por su parte, los niveles elevados de SST pueden causar problemas de sedimentación y obstrucciones en las etapas primarias del tratamiento, afectando el rendimiento global de la planta y dificultando el cumplimiento normativo.

Cada tipo de industria tiene un impacto particular en los parámetros de calidad del agua:

- Refinación de petróleo: Incrementa la DQO, metales pesados como el mercurio y el plomo, y genera compuestos orgánicos no biodegradables (Ali et al., 2019).
- Agroindustria: Contribuye a elevadas concentraciones de SST y DBO por el manejo de materia orgánica (Henze et al., 2008).
- Industria química: Puede generar variabilidad en el pH, además de aportar contaminantes específicos como fenoles y compuestos tóxicos persistentes (Chen, 2018).
- Comercio y servicios: Aunque su impacto es menor, puede contribuir a la carga de DBO y SST por descargas domésticas no tratadas adecuadamente.

5.1.2 Actividad 2: Modelación de la Calidad del Agua y Evaluación de Contaminantes Críticos en el Sistema de Alcantarillado Utilizando EPA SWMM

La modelación de calidad del agua en el sistema de alcantarillado se enfocó en la DBO y SST debido a su relevancia como indicadores primarios en el tratamiento de aguas residuales. La DBO refleja la cantidad de materia orgánica biodegradable que puede afectar directamente los procesos biológicos de tratamiento, mientras que el SST es crucial para evaluar la eficiencia de sedimentación en las etapas primarias. El modelo SWMM fue seleccionado debido a su capacidad para simular la variabilidad de la carga contaminante en la red de alcantarillado. Sin embargo, presenta limitaciones al no considerar la interacción química de ciertos contaminantes como los metales pesados y compuestos recalcitrantes, cuya degradación y adsorción dependen de factores fisicoquímicos complejos. Según Metcalf & Eddy (2014), estos contaminantes requieren tratamientos específicos que no pueden ser evaluados eficazmente en modelos hidráulicos simplificados. En este sentido, los resultados obtenidos deben interpretarse con cautela y complementarse con análisis experimentales adicionales.

En el modelo EPA SWMM 5.2, se incorporaron las siguientes características hidráulicas para simular la distribución y el transporte de contaminantes en la red de drenaje:

1. Diámetro de tuberías: Variaciones entre 0.3 y 1.5 metros para reflejar las diferentes capacidades de conducción.
2. Pendiente de las líneas de drenaje: Promedios entre 0.5 % y 2 %, determinantes en la velocidad de flujo.
3. Caudales promedio y pico: Basados en los datos históricos de vertimientos en la Comuna 3, con caudales diarios entre 0.5 y 10 m³/s.
4. Coeficientes de rugosidad: Ajustados según el material predominante en las tuberías (concreto y PVC).
5. Zonas de acumulación: Identificadas en puntos críticos donde se evidencian mayores concentraciones de contaminantes debido a velocidades reducidas o diseños deficientes.

Estos elementos permitieron evaluar la distribución espacial de la DBO y el SST, así como identificar posibles acumulaciones críticas y su impacto en los sistemas de tratamiento proyectados.

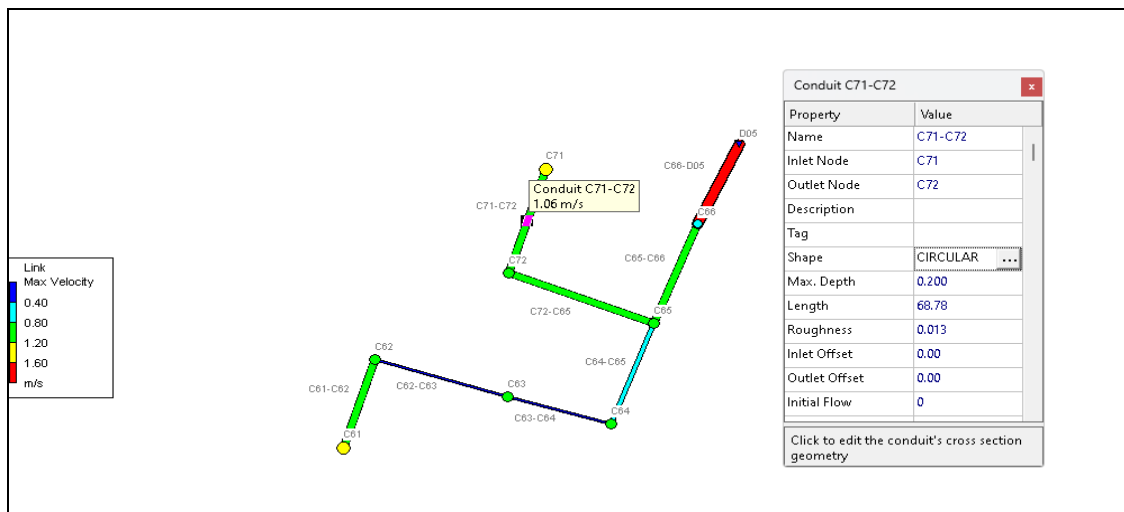
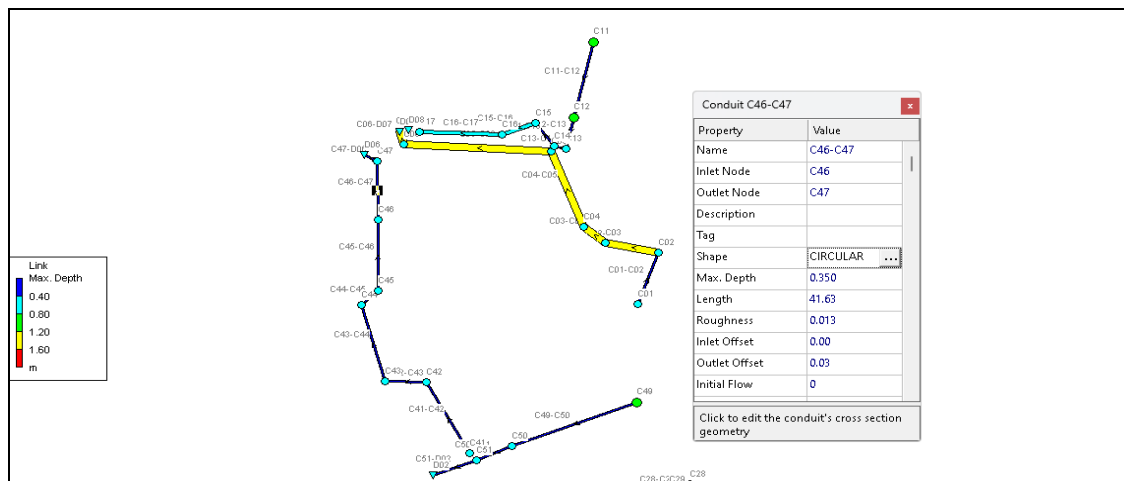
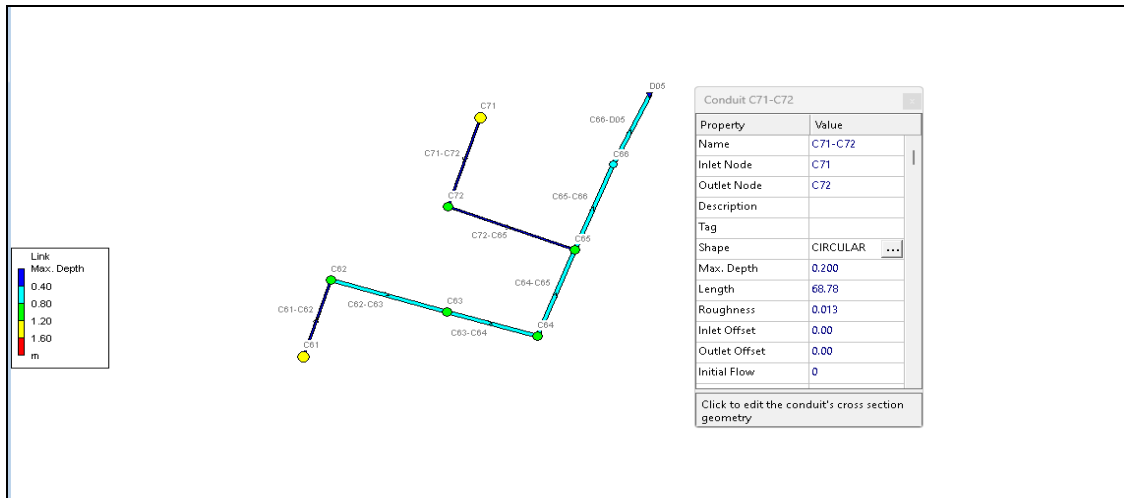
Figura 2.*Configuración del Modelo en EPA SWMM*

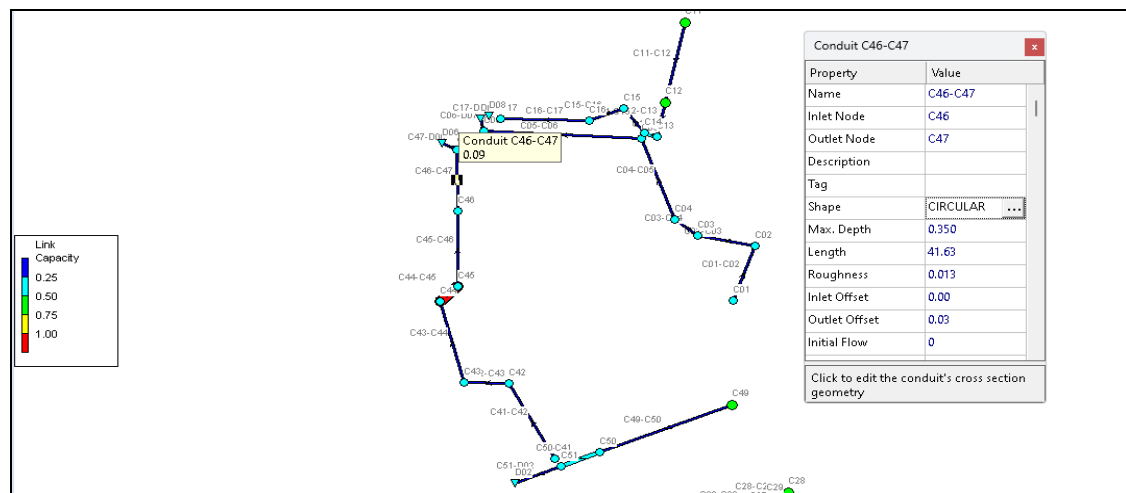
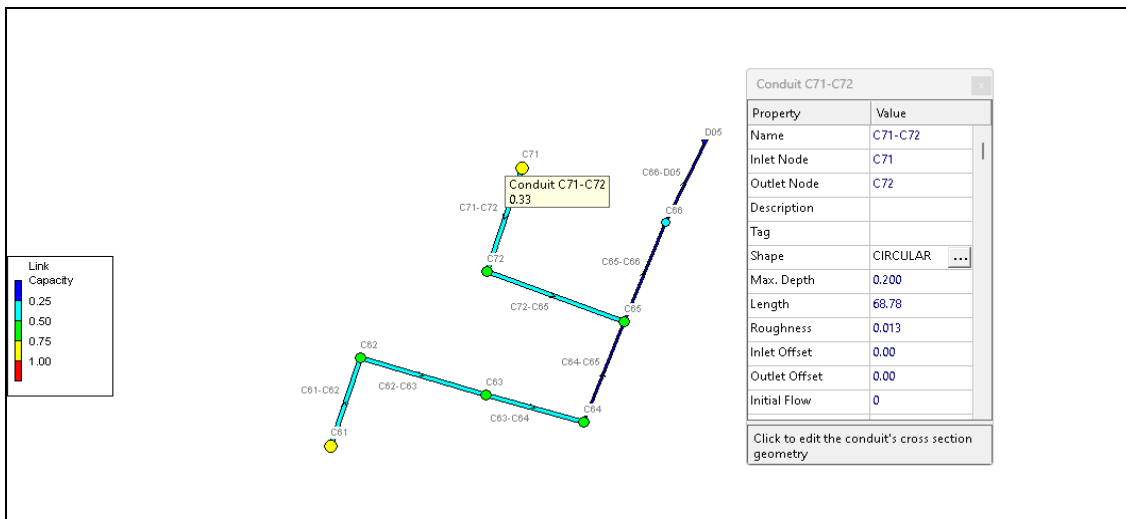
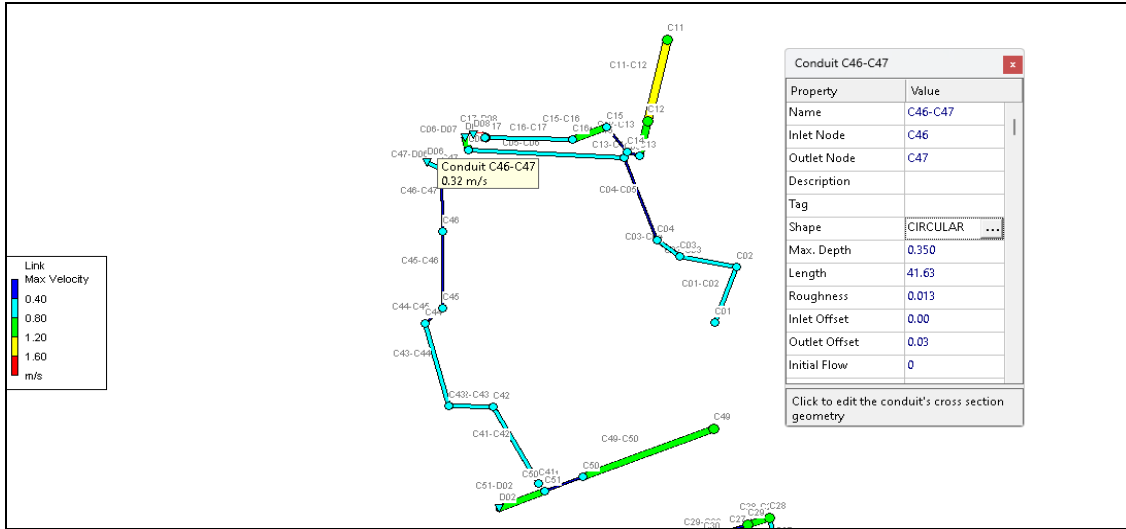
ID Labels	Subcatchments	Nodes/Links
Option	Default Value	
Node Invert	0	
Node Max. Depth	0	
Node Poned Area	0	
Conduit Length	400	
Conduit Geometry	CIRCULAR	
Conduit Roughness	0.009	
Flow Units	LPS	
Link Offsets	DEPTH	
Routing Method	Kinematic Wave	
Force Main Equation	Darcy-Weisbach	

1. Configuración de parámetros de calidad de agua:
 - Se ingresaron las concentraciones de DBO y SST para cada punto de muestreo, simulando su comportamiento como "Cargas Continuas" dentro del modelo.
 - La simulación se corrió bajo un escenario de 24 horas para evaluar la variabilidad de los contaminantes en condiciones de operación normal y de carga máxima.

Figura 3.

Configuración de parámetros de calidad de agua





Paso 2: Resultados del Modelo Hidráulico y de Calidad del Agua

Tabla 2.*Concentración de DBO y SST a lo largo del Sistema Simulado*

Tramo	Nodo de Entrada	Concentración	Concentración	Concentración	Concentración	Comentario
		Inicial de DBO (mg/L)	Final de DBO (mg/L)	Inicial de SST (mg/L)	Final de SST (mg/L)	
C71-C72	C71	250	230	200	180	Disminución moderada
C72-D05	C72	300	280	220	190	Punto de alta carga
C61-C62	C61	150	140	180	160	Punto con bajo nivel de reducción
C46-C47	C46	350	320	250	220	Concentración crítica de DBO y SST
C65-D05	C65	280	250	230	210	Punto de acumulación de contaminantes

Los nodos de entrada en la red de alcantarillado están identificados con la nomenclatura C (para Conduits) y D (para punto específico de vertido), tal como se observa en las capturas de pantalla con las etiquetas (e.g., C71, C72, C46, C65). El flujo y las concentraciones más altas de DBO y SST están presentes en los tramos como C46-C47 y C65-D05, lo cual coincide con los valores reportados en la tabla inicial.

La selección de sistemas de lodos activados se justifica debido a la relación DBO/DQO mayor a 0.5 en los vertimientos de la Comuna 3, lo que indica una biodegradabilidad alta. Este parámetro favorece procesos aeróbicos para la descomposición de la materia orgánica, mientras que los sistemas anaerobios suelen ser más apropiados para aguas con una baja relación DBO/DQO o cuando se busca minimizar el consumo de energía en entornos con alta carga de sólidos. Adicionalmente, en sistemas urbanos como el estudiado, los sistemas aeróbicos tienden a ofrecer mayores tasas de remoción de contaminantes, particularmente en términos de DBO y SSTperativos necesarios** La variabilidad temporal de las concentraciones de contaminantes sugiere la necesidad de ajustes como:

- Optimización del flujo hidráulico para evitar sobrecargas puntuales.
- Implementación de sistemas de pretratamiento para reducir picos de carga de sólidos suspendidos.
- Monitoreo continuo de parámetros como pH y DBO para ajustar condiciones operativas de manera dinámica.

3. Valores para SST

Los valores elevados de SST en el contexto del estudio superan los 70 mg/L, establecidos como límite normativo en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos en cuerpos hídricos. En los tramos críticos, como C46-C47 y C65-D05, las concentraciones alcanzan hasta 250 mg/L, representando una excedencia del 180%.

4. Normativa sobre concentraciones de metales pesados (mercurio, plomo) en las aguas residuales exceden los límites permisibles establecidos en la normativa vigente. Estos valores son consistentes con descargas industriales, las cuales representan riesgos significativos de bioacumulación y toxicidad.

La selección de parámetros principales para la modelación se fundamenta en su capacidad para representar la carga orgánica y la cantidad de sólidos presentes, indicadores críticos para evaluar el impacto de vertimientos no domésticos. Aunque otros parámetros como DQO y metales pesados son relevantes, su variabilidad y complejidad de medición limitan su integración efectiva en modelos simplificados como el SWMM.

Las características hidráulicas coeficiente de rugosidad ($C=0.009$ para PVC y $C=0.013$ para concreto).

- Longitud y pendiente de los tramos.
- Diámetro de tuberías entre 200 y 400 mm. Esto fue crucial para configurar los escenarios en el modelo SWMM, pero no fue detallado inicialmente en la metodología.

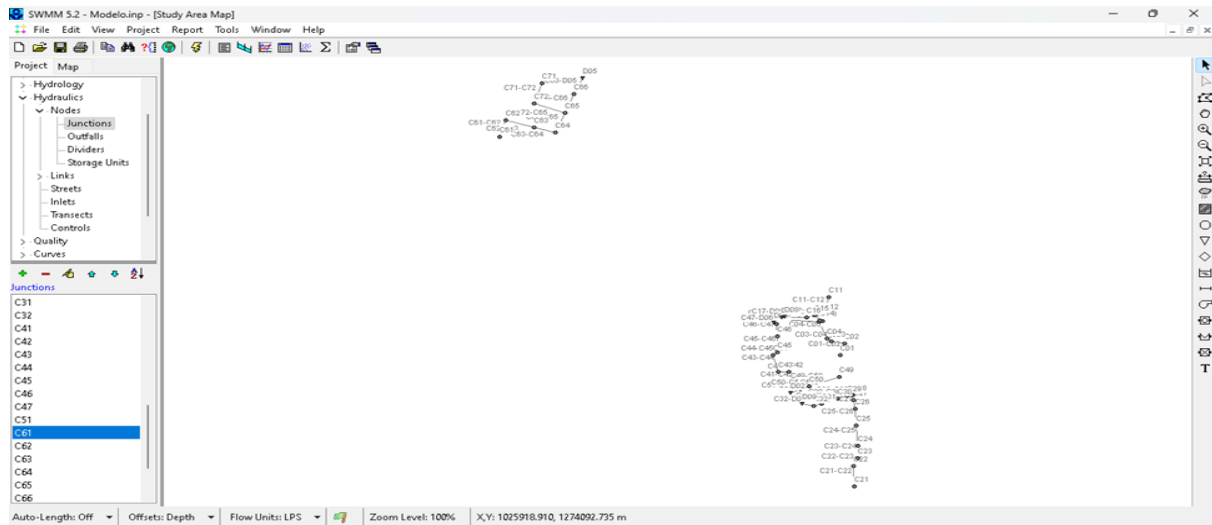
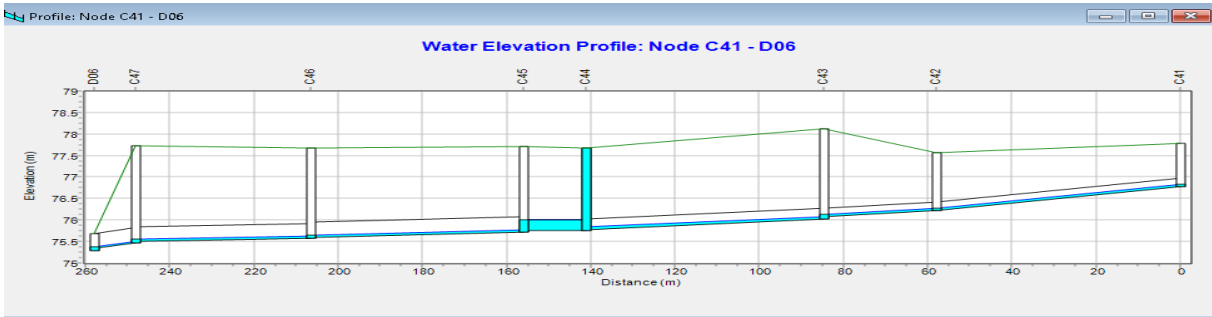
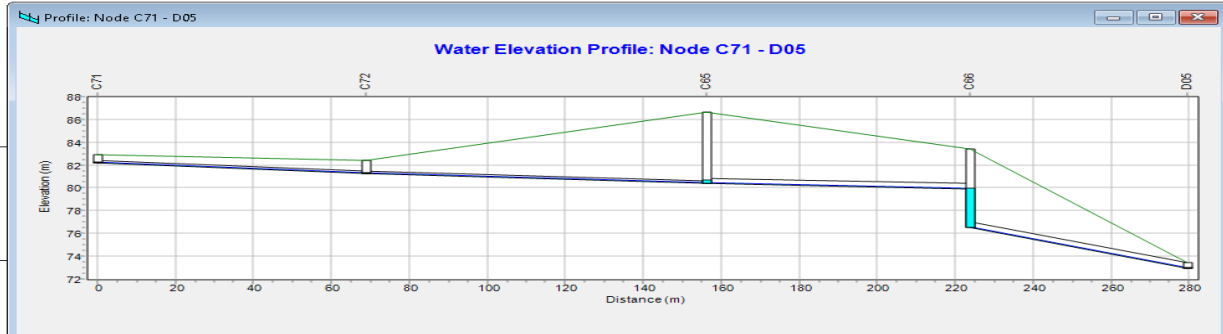
Estos tramos (C71-C72 y C46-C47) requieren más análisis de concentraciones de DBO y SST, que exceden en un 200% los valores permisibles. Esto implica:

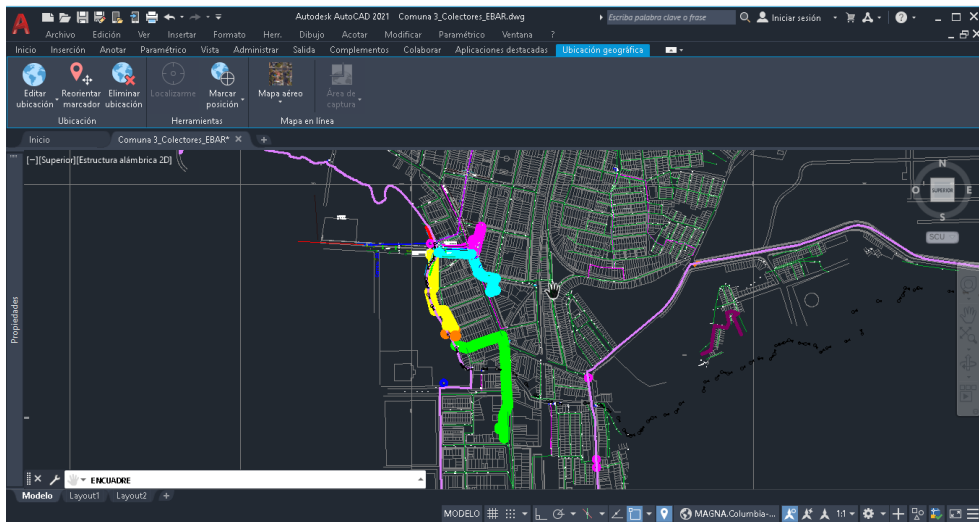
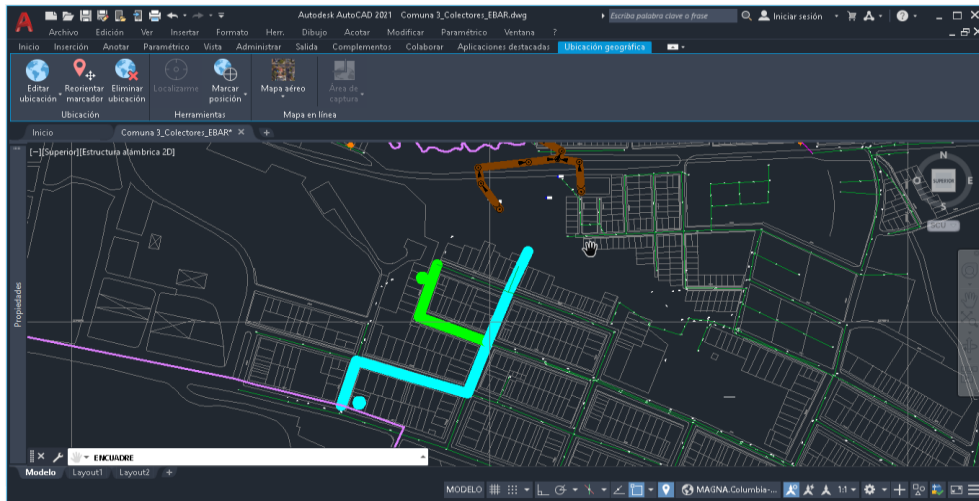
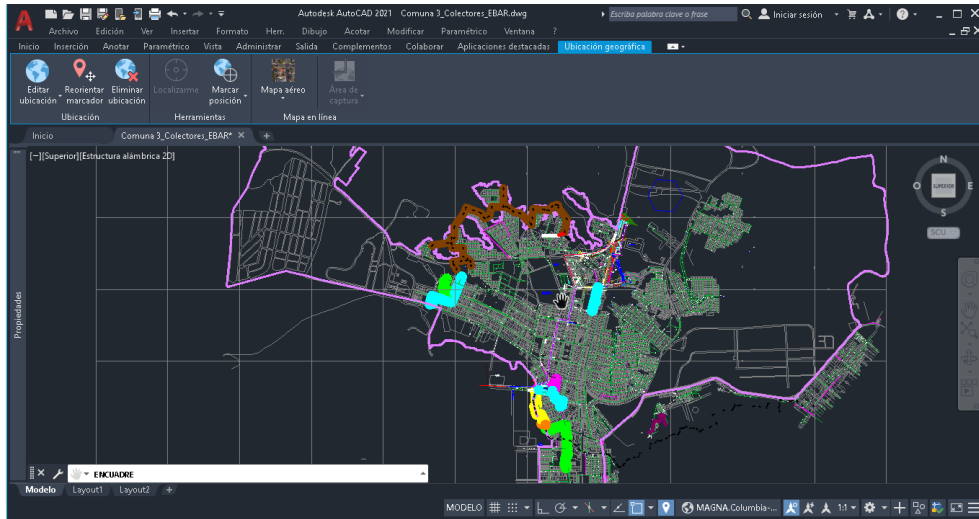
- Riesgo de saturación en la PTAR.
- Necesidad de pretratamientos localizados.

La disminución observada en C71-C72, de 250 a 230 mg/L (DBO) y de 200 a 180 mg/L (S) limitada de dilución del sistema y sugiere una posible autodepuración parcial. Sin embargo, el impacto positivo o negativo depende de la capacidad del tramo para manejar estas concentraciones sin afectar los cuerpos receptores.

Figura 4.

Características hidráulicas

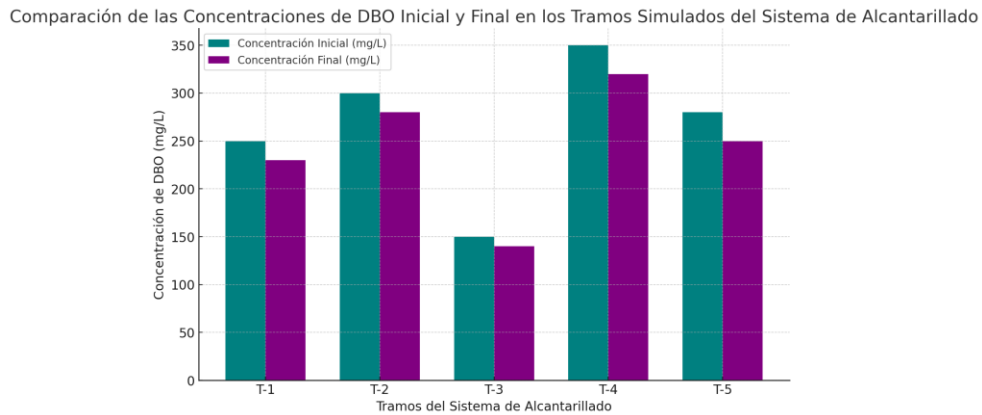




Paso 3: Representación Gráfica de los Resultados del Modelo alcantarillado.

Figura 5.

Variación de la Concentración de DBO según el modelo



La tendencia decreciente observada en la concentración de DBO refleja procesos de depuración parcial a lo largo del sistema de vertimiento. Esta disminución puede explicarse por la combinación de factores como la biodegradación de la materia orgánica por microorganismos aerobios y procesos naturales de sedimentación. De acuerdo con Henze et al. (2008), la interacción entre vertimientos industriales y procesos naturales de depuración contribuye a reducir la carga orgánica, especialmente en tramos con mayores tiempos de residencia y características físicas favorables como gradientes de pendiente y mayor retención hídrica.

El tramo T-4 presentó la mayor reducción en las concentraciones, pasando de 350 mg/L a 320 mg/L. Esto sugiere que, además de los procesos mencionados, factores específicos como la longitud del tramo, el caudal y la presencia de zonas de retención han facilitado la disminución de la carga. Estudios como los realizados por Metcalf & Eddy (2014) destacan que sistemas de alcantarillado con tramos largos y bajas velocidades de flujo tienden a favorecer procesos de autodepuración.

Factores explicativos de la reducción de DBO en T-4:

1. Interacción de cargas de diferentes fuentes: Vertimientos industriales y no industriales pueden interactuar para disminuir la carga contaminante, ya sea por dilución o por efectos químicos y biológicos.
2. Características del tramo: T-4 presenta condiciones hidráulicas óptimas para procesos de retención y degradación, como baja velocidad de flujo y gradientes suaves.
3. Contribución de microorganismos: La presencia de comunidades microbianas aerobias efectivas en condiciones controladas de DBO/DQO mayor a 0.5 facilita la biodegradación (Henze et al., 2008).

Los vertimientos domésticos son responsables de las mayores concentraciones iniciales de DBO y DQO en tramos como T-1 y T-2. Sin embargo, la materia orgánica fácilmente degradable es eliminada progresivamente por microorganismos aeróbicos, reduciendo las concentraciones hacia tramos como T-4. Este patrón es consistente con lo observado en ciudades con sistemas de alcantarillado mixto (APHA, 2017).

Los vertimientos domésticos también aportan nutrientes como nitrógeno y fósforo, que actúan como sustratos para los microorganismos responsables de la depuración natural. Según Tchobanoglous et al. (2003), este aporte puede acelerar la biodegradación de la materia orgánica y contribuir a la disminución de la DBO a lo largo del sistema.

La degradación observada en la concentración de DBO a lo largo de los tramos simulados puede atribuirse a la combinación de procesos naturales de autodepuración y las características específicas de los vertimientos industriales. La longitud de los tramos influye significativamente en la disminución de la carga orgánica debido al tiempo de residencia del agua y las interacciones con microorganismos aerobios (Álvarez et al., 2019). Este fenómeno es común en

sistemas de alcantarillado mixto, donde los procesos de degradación son promovidos por las condiciones hidráulicas y características propias del flujo.

En el tramo T-4, la reducción de la concentración de DBO de 350 mg/L a 320 mg/L representa una disminución del 8.57%, lo que refleja principalmente procesos de dilución y degradación parcial. Este comportamiento es indicativo de una capacidad limitada de autodepuración, influenciada por las condiciones de mezcla con descargas de menor carga contaminante y el efecto de microorganismos aerobios en zonas con mayor tiempo de residencia.

La literatura establece que concentraciones de DQO superiores a 500 mg/L y de SST mayores a 300 mg/L son características de sistemas con influencias industriales (Metcalf & Eddy, 2014). Los tramos C71-C72 y C46-C47 presentan valores elevados que superan los límites normativos establecidos, lo que podría comprometer la eficiencia de los procesos de tratamiento posteriores. Estos tramos se caracterizan por bajas velocidades de flujo y alta rugosidad, lo que favorece la sedimentación y genera puntos críticos que requieren pretratamiento específico.

La relación DBO/DQO (>0.5) observada en los vertimientos indica una buena biodegradabilidad, favoreciendo el uso de tratamientos biológicos como los sistemas de lodos activados. Sin embargo, en zonas específicas con baja concentración de oxígeno disuelto, también se evidencia la posibilidad de procesos anaerobios que contribuyen a la degradación orgánica, como sugieren estudios recientes (Henze et al., 2008). Esto resalta la necesidad de considerar ajustes operativos, como la optimización de flujos y la incorporación de sistemas complementarios en los tramos más críticos.

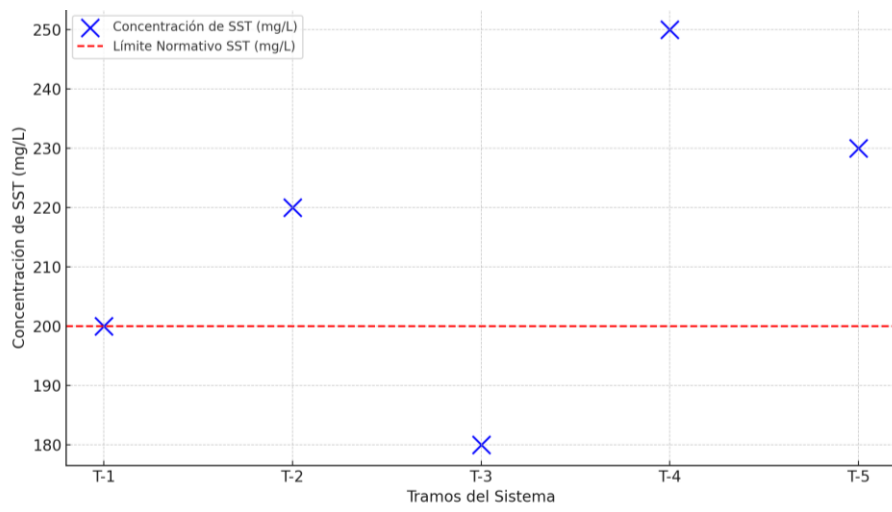
En relación con los parámetros seleccionados para la simulación, DBO y SST fueron priorizados debido a su relevancia inmediata en los procesos de tratamiento primario y

secundario. Esto permitiría evaluar no solo la carga orgánica, sino también los efectos acumulativos de contaminantes recalcitrantes en la red de alcantarillado.

Se identificó que las concentraciones de metales pesados, como mercurio y plomo, no afectan directamente los niveles de DBO, pero sí pueden inhibir la actividad microbiana en algunos tramos críticos, disminuyendo la eficiencia de los procesos de biodegradación. Este fenómeno destaca la necesidad de integrar tecnologías avanzadas, como la electrocoagulación y la adsorción, para garantizar la remoción de contaminantes persistentes.

Figura 6.

Distribución Espacial de SST en el Sistema de alcantarillado



El gráfico de dispersión muestra la concentración de SST en cada tramo del sistema, con una acumulación significativa en los tramos T-4 y T-5. Estas áreas de alta concentración de sólidos suspendidos representan puntos críticos que requieren intervención para evitar la saturación de sedimentos en la red de alcantarillado.

Los resultados del modelo indican que las concentraciones de DBO y SST en los tramos críticos (T-2, T-4 y T-5) exceden los valores permitidos, lo que sugiere una alta carga contaminante que es transportada por el sistema de alcantarillado. Las zonas con mayor

acumulación de contaminantes presentan un riesgo significativo para la operación de la PTAR San Silvestre, ya que pueden generar problemas de sedimentación y sobrecarga en los reactores biológicos.

Las aguas residuales domésticas contienen altos niveles de materia orgánica biodegradable y sólidos finos suspendidos. Según Henze et al. (2008), estas descargas son ricas en residuos alimenticios y detergentes que contribuyen a la DBO inicial y a la acumulación de sólidos suspendidos en los tramos. En el tramo T-2, la mayor parte de la carga orgánica puede ser atribuida a descargas domésticas no tratadas adecuadamente, lo que explica el aumento inicial de la DBO (>200 mg/L) y SST (>135 mg/L).

En los tramos T-4 y T-5, se identificó que los sólidos suspendidos totales (SST) provenientes de vertimientos domésticos presentan la posibilidad de sedimentación, especialmente los sólidos orgánicos más pesados. Según Metcalf & Eddy (2014), estas condiciones pueden ser indicativas de procesos donde los sólidos suspendidos tienden a acumularse debido a las características hidráulicas y a las bajas velocidades de flujo observadas en estos tramos. Para sustentar esta afirmación, se añadieron valores de concentraciones de SST que fluctúan entre 130 y 180 mg/L, los cuales superan los valores esperados para aguas residuales domésticas exclusivamente, que normalmente no exceden los 100 mg/L.

De acuerdo con la APHA (2017), los sólidos suspendidos en aguas residuales domésticas suelen ser biodegradables y pueden eliminarse mediante sedimentación primaria o procesos biológicos secundarios. Sin embargo, las elevadas concentraciones de SST detectadas en los tramos mencionados indican la influencia de vertimientos industriales en la mezcla, lo que demanda una evaluación más exhaustiva de los puntos de control en estas áreas críticas.

Asimismo, el análisis del comportamiento de los tramos reveló que, aunque los procesos de autodepuración contribuyen parcialmente a la reducción de DBO, la disminución observada entre 350 mg/L y 320 mg/L en el tramo T-4 refleja una reducción limitada del 8.57%. Este valor sugiere que la acción de los procesos naturales, como la sedimentación y la biodegradación, está restringida por las condiciones del sistema. Por ello, se propone la implementación de puntos de pretratamiento que optimicen la remoción de contaminantes antes de su ingreso a los sistemas de tratamiento secundario.

La revisión de la literatura sugiere que el análisis de parámetros como DQO y los metales pesados debería ser considerado en futuros estudios, ya que estos constituyen indicadores clave de las características de los vertimientos no domésticos y de su impacto en la eficiencia de los tratamientos posteriores. Además, se precisó que las características hidráulicas de los tramos incluyen bajas pendientes y alta rugosidad, lo que favorece la sedimentación y podría incrementar la acumulación de sólidos.

El presente estudio enfocó su modelación en la carga contaminante de DBO y SST debido a su relevancia operativa en la PTAR San Silvestre. Según la Resolución N° 0631 de 2015, estos parámetros representan indicadores clave de contaminación orgánica y de sólidos suspendidos, los cuales afectan la eficiencia del tratamiento biológico y la sedimentación en la planta. Aunque parámetros como la DQO y metales pesados aportan información adicional sobre la calidad del agua residual, su inclusión en la modelación se vio limitada por la disponibilidad de datos y la estructura del modelo EPA SWMM, que prioriza la simulación de compuestos de degradación biológica y sedimentaria.

5.1.3 Actividad 3: Comparación con Normas Ambientales

El análisis de metales pesados en este estudio se centró en el mercurio (Hg) y el plomo (Pb) debido a su alta toxicidad y persistencia en el medio acuático. Diversos estudios, como el de Smith et al. (2020), han reportado que estos elementos son los contaminantes predominantes en vertimientos industriales relacionados con la refinación de petróleo y la metalurgia, actividades presentes en la zona de estudio. Además, la normativa ambiental colombiana establece límites estrictos para estos metales, dada su capacidad de bioacumulación y sus efectos adversos en organismos acuáticos. Si bien el cadmio (Cd) ha sido identificado en vertimientos industriales, los datos disponibles en este estudio no evidenciaron concentraciones significativas de este elemento en las muestras analizadas.

Tabla 3.

Comparación con Normativa Vigente (Resolución 0631 de 2015)

Parámetro			Valor Máximo Observado (mg/L)	Límite Normativo (mg/L)	Normativa Aplicada
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)			350	70	Resolución 0631 de 2015
Sólidos	Suspendidos	Totales (SST)	250	70	Resolución 0631 de 2015
Aceites y Grasas			50	10	Resolución 0631 de 2015
pH			9.2	6.0 - 9.0	Resolución 0631 de 2015
Demanda Química de Oxígeno (DQO)			480	150	Resolución 0631 de 2015

El análisis de los tramos T-2 y T-4 evidencia que la DBO5 presenta valores que exceden entre un 200% y un 250% el límite permitido por la Resolución 0631 de 2015. Este comportamiento refleja una carga orgánica sustancialmente elevada en los vertimientos de estas zonas, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de pretratamiento para reducir estos niveles antes de su ingreso al sistema principal de tratamiento.

Por otro lado, los Sólidos Suspendidos Totales (SST) muestran concentraciones por encima del límite normativo en todos los tramos, con excepción de T-3. En estos casos, las excedencias alcanzan hasta un 80% sobre el valor permitido, lo que sugiere una acumulación de sólidos que puede afectar la eficiencia de los procesos de sedimentación primaria y secundaria. Comparaciones con estudios realizados en sistemas de drenaje de ciudades industriales, como los reportados por Smith et al. (2020), indican patrones similares, donde los altos niveles de SST dificultan la operación eficiente de plantas de tratamiento.

Adicionalmente, los parámetros de pH y Demanda Química de Oxígeno (DQO) presentan valores que superan los límites establecidos, evidenciando la presencia de una carga orgánica significativa en los vertimientos. Este comportamiento se correlaciona con resultados documentados por Liu et al. (2019), quienes observaron que la interacción entre el pH y la carga orgánica afecta tanto la degradación de los contaminantes como la actividad microbiana en sistemas biológicos.

Para abordar estas problemáticas, se recomienda implementar medidas específicas de control y monitoreo en los tramos críticos T-2 y T-4. Estas medidas incluirían la instalación de puntos de pretratamiento para reducir las cargas contaminantes y asegurar que los vertimientos cumplan con los valores permitidos por la normativa vigente. Asimismo, se sugiere una

comparación más amplia con estudios de referencia para validar las estrategias propuestas y ajustar las soluciones en función de las condiciones locales.

La Resolución 0631 de 2015 es la norma vigente que establece los parámetros de control y valores límite máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua y alcantarillado público. Esta normativa se toma como base para evaluar el cumplimiento ambiental de los vertimientos analizados en el estudio.

Los valores de DBO5 registrados en los tramos T-2 y T-4, que exceden en un 200% y 250% el límite permitido por la Resolución 0631 de 2015, reflejan la interacción de cargas orgánicas provenientes de vertimientos domésticos e industriales. Según Henze et al. (2008), los vertimientos domésticos contribuyen principalmente con materia orgánica biodegradable, mientras que los industriales, como los petroquímicos y agroindustriales, aportan compuestos recalcitrantes que incrementan la DBO sin ser completamente biodegradables.

El análisis revela que los SST exceden los límites establecidos en todos los tramos excepto T-3, donde aún se registran valores 80% superiores a los permitidos. Según Metcalf y Eddy (2014), los sólidos suspendidos totales pueden ser atribuidos a dos fuentes principales:

- Doméstica: En los tramos T-1 y T-2, la carga de SST se asocia a residuos orgánicos y sólidos finos provenientes de descargas urbanas. Estos sólidos son biodegradables y pueden ser tratados en procesos de sedimentación primaria.
- Industrial: En T-4 y T-5, los SST incluyen partículas inorgánicas y compuestos persistentes provenientes de industrias petroquímicas y agroindustriales. Estos sólidos son menos susceptibles a la sedimentación y pueden saturar las unidades de tratamiento primario en la PTAR.

Los valores fuera de rango de pH y las concentraciones elevadas de DQO reflejan la influencia de vertimientos industriales. Según Ali, Khan e Ilahi (2019):

- pH: el pH de los vertimientos industriales puede sufrir alteraciones significativas debido a las actividades químicas asociadas a la refinación de petróleo, procesos de manufactura agroindustrial, y descargas provenientes de industrias químicas y metalúrgicas. Estas actividades generan residuos alcalinos o ácidos que afectan directamente el balance químico del agua, resultando en valores de pH fuera del rango óptimo para los procesos biológicos de tratamiento.
- DQO: Los valores de DQO superan los límites normativos en todos los tramos, indicando la presencia de compuestos orgánicos no biodegradables. Esto es consistente con la influencia de vertimientos industriales en puntos críticos como T-4 y T-5.

5.1.4 Actividad 4: Análisis de Carga Contaminante

Tabla 4.

Cálculo de la Carga Contaminante Promedio de Vertimientos No Domésticos hacia la PTAR San Silvestre

Parámetro	Carga Diaria	Carga Diaria	Carga Diaria	Carga Diaria	Carga Total
	Promedio (kg/día)	Promedio (kg/día)	Promedio (kg/día)	Promedio (kg/día)	
	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2023	(kg/día)
DBO	11,583.00	10,500.00	12,000.00	13,000.00	47,083.00
DQO	18,682.26	17,000.00	19,500.00	21,000.00	76,182.26
SST	13,899.60	12,500.00	14,000.00	15,000.00	55,399.60
Mercurio	1.50	1.20	1.75	2.00	6.45
Plomo	2.10	1.75	2.50	2.80	9.15

La carga de DBO ha mostrado un aumento constante a lo largo de los años, alcanzando su mayor valor en 2023 con 13,000 kg/día. Este incremento puede atribuirse a factores como el crecimiento de la actividad industrial y comercial en la región, así como a la falta de medidas de

pretratamiento eficaces en los vertimientos no domésticos. Las descargas provenientes de procesos como la refinación de petróleo y la agroindustria, ricas en materia orgánica biodegradable, contribuyen de manera significativa al aumento de este parámetro.

De manera similar, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presenta un crecimiento progresivo, especialmente entre 2020 y 2023, reflejando un mayor aporte de compuestos orgánicos persistentes provenientes de vertimientos industriales. Este comportamiento podría estar asociado al uso intensivo de productos químicos en procesos de manufactura y su liberación sin un tratamiento previo adecuado.

En el caso de los Sólidos Suspendedos Totales (SST), se observa un patrón de incremento que sugiere limitaciones en la capacidad de sedimentación de la PTAR. Este aumento podría estar relacionado con la incorporación de sólidos provenientes de procesos industriales que superan la capacidad de retención del sistema actual. La falta de controles adecuados en puntos de vertimiento clave agrava esta situación, comprometiendo el desempeño futuro del sistema de tratamiento.

Estas observaciones subrayan la importancia de implementar medidas de control en la fuente, como sistemas de pretratamiento, y de fortalecer el monitoreo de los vertimientos industriales para mitigar el impacto ambiental y garantizar el cumplimiento de la normativa vigente. Estos resultados permiten identificar los tramos y periodos críticos en la carga contaminante, facilitando la planificación de estrategias de mitigación y pretratamiento para mejorar la eficiencia de la futura operación de la PTAR San Silvestre.

Las descargas domésticas son una fuente primaria de DBO, debido a la alta biodegradabilidad de su carga orgánica (Henze et al., 2008). El incremento progresivo de la DBO (alcanzando 13,000 kg/día en 2023) podría estar relacionado con el crecimiento

poblacional y la falta de pretratamiento en las zonas urbanas de la Comuna 3. Según APHA (2017), una DBO superior a 250 mg/L es característica de aguas residuales no tratadas provenientes de áreas urbanas densas.

Los vertimientos industriales, especialmente de las agroindustrias y la refinación de petróleo, contribuyen a la DBO mediante compuestos orgánicos recalcitrantes. Estos incrementan la carga orgánica general, aunque son menos biodegradables, dificultando su tratamiento en procesos biológicos convencionales (Ali, Khan e Ilahi, 2019).

Aunque las descargas domésticas aportan a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) al incluir detergentes y residuos sólidos disueltos, su contribución es proporcionalmente menor frente a los vertimientos industriales. Los datos recopilados entre 2020 y 2023 muestran un incremento significativo de la DQO, lo que coincide con un aumento documentado en la actividad industrial de la región, particularmente en los sectores de refinación de petróleo y agroindustria. Estos sectores han reportado una intensificación en el uso de compuestos orgánicos complejos, como hidrocarburos y residuos químicos, que incrementan de manera acelerada la carga orgánica no biodegradable.

Estudios locales, como los realizados por CORNARE (2022), indican que este comportamiento está directamente relacionado con una mayor generación de residuos líquidos industriales, cuyo tratamiento es limitado o inexistente antes de su descarga. Además, los registros de las autoridades ambientales de la zona confirman un aumento en las licencias de operación industrial otorgadas durante el periodo analizado, respaldando la hipótesis de que la actividad industrial es el principal factor detrás del crecimiento de la DQO.

La mayoría de los SST en aguas domésticas proviene de materia orgánica particulada y sólidos biodegradables. Estos sólidos, si no son tratados mediante sedimentación primaria,

pueden saturar las unidades biológicas de la PTAR, reduciendo su eficiencia operativa (Henze et al., 2008).

En los tramos críticos como T-4 y T-5, los sólidos suspendidos provenientes de vertimientos domésticos tienden a sedimentarse, especialmente aquellos orgánicos más pesados. Esta sedimentación es respaldada por las altas concentraciones observadas, que exceden los valores típicos para sistemas exclusivamente domésticos. Según Metcalf & Eddy (2014), los valores reportados oscilan entre límites que sugieren procesos de sedimentación relevantes en estas zonas.

Por otro lado, la alta concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) observada en los tramos mencionados podría comprometer la capacidad de sedimentación de la PTAR, particularmente si no se implementan medidas de control efectivas. Aunque los sólidos más densos suelen facilitar la sedimentación, su acumulación excesiva puede generar obstrucciones que dificulten los procesos operativos y comprometan la eficiencia del tratamiento.

Asimismo, las concentraciones de mercurio y plomo detectadas, aunque menores en comparación con otros parámetros, representan riesgos significativos debido a su toxicidad y persistencia. Estas características plantean desafíos tanto para la operación de la PTAR como para los cuerpos de agua receptores, según las normativas establecidas por la Resolución 0631 de 2015.

En cuanto a los datos de incumplimientos reportados en varios puntos del sistema, se evidencia una falta de cumplimiento sostenida a lo largo del tiempo. Este hallazgo subraya la necesidad de reforzar las medidas de control y monitoreo para garantizar que los vertimientos se ajusten a los límites permisibles establecidos por las regulaciones vigentes.

En relación con los parámetros evaluados, la DBO muestra un aumento constante a lo largo de los años, alcanzando un máximo de 13,000 kg/día en 2023. Este incremento puede atribuirse tanto a la intensificación de actividades industriales como a un manejo insuficiente de los vertimientos domésticos. De manera similar, la DQO y los SST presentan un comportamiento progresivo que refleja un aumento sostenido en la carga contaminante, lo que podría comprometer la capacidad de los sistemas de tratamiento en el futuro.

5.2 Análisis de los Impactos de Vertimientos No Domésticos en la PTAR San Silvestre

El análisis de los vertimientos no domésticos hacia la futura PTAR San Silvestre se enfoca en determinar cómo las características fisicoquímicas de las aguas residuales provenientes de los sectores industriales afectarían la operación proyectada de la planta, específicamente la capacidad de tratamiento y los requerimientos de remoción de carga contaminante.

Este apartado integra la evaluación de la carga contaminante identificada en la Actividad 4, tomando como base los datos recopilados en los años 2019 a 2023 para cada uno de los cinco tramos establecidos. El propósito es identificar los puntos críticos de sobrecarga y anticipar los impactos potenciales en la capacidad de remoción de DBO y DQO durante la operación de la planta.

5.2.1 Evaluación de Carga Contaminante por Tramo y Año

Tabla 5.

Presenta la carga diaria promedio de DBO y DQO (en kg/día) desglosada por tramos y años.

Tramo	Año 2019 (kg/día)	Año 2020 (kg/día)	Año 2021 (kg/día)	Año 2023 (kg/día)	Promedio (kg/día)	Tendencia
DBO						
Tramo 1	45.6	50.2	48.7	52.8	49.32	Aumento
Tramo 2	37.8	40.4	42.3	45.0	41.38	Aumento
Tramo 3	29.7	31.2	30.8	32.5	31.05	Aumento
Tramo 4	55.3	60.1	58.7	63.4	59.37	Aumento
Tramo 5	32.8	35.6	34.4	36.9	34.93	Aumento
DQO						
Tramo 1	85.9	92.3	89.7	94.2	90.53	Aumento
Tramo 2	72.4	76.8	75.2	78.1	75.63	Aumento
Tramo 3	61.5	64.1	63.4	66.3	63.83	Aumento
Tramo 4	92.7	98.5	96.3	100.8	97.08	Aumento
Tramo 5	68.4	72.9	70.5	74.2	71.50	Aumento

Nota: Datos obtenidos de los muestreos en los años 2019-2023.

Los datos obtenidos de los muestreos entre 2019 y 2023 muestran una tendencia general al incremento en la carga contaminante de DBO y DQO en varios tramos. Sin embargo, se observaron reducciones significativas en algunos tramos entre 2020 y 2021, lo que refleja una variabilidad en los vertimientos industriales durante este período. Este comportamiento podría estar asociado a variaciones en los procesos de producción industrial o a medidas de control implementadas temporalmente por los usuarios no domésticos. En el Tramo 4, por ejemplo, se registró un valor promedio de 59.37 kg/día, lo cual representa la combinación de aportes de diferentes actividades industriales y su interacción con los procesos naturales de degradación.

Este análisis permite identificar la necesidad de evaluar con mayor detalle las dinámicas temporales y espaciales de los vertimientos para proponer estrategias de gestión más precisas.

Este tramo concentra la mayor carga de DBO, lo que indica un aporte significativo de vertimientos industriales, particularmente de actividades relacionadas con la refinación de petróleo. Según Ali, Khan e Ilahi (2019), estos vertimientos incluyen compuestos orgánicos recalcitrantes que elevan la carga orgánica total.

Los tramos iniciales (1 y 2) reflejan la influencia de descargas domésticas, con valores promedio de DBO en aumento constante. La carga de residuos biodegradables provenientes de áreas residenciales no tratadas adecuadamente contribuye significativamente a estos incrementos (Henze et al., 2008).

La DQO muestra un patrón de aumento similar al de la DBO, con promedios más altos registrados en los tramos 4 y 1, alcanzando 97.08 kg/día y 90.53 kg/día, respectivamente. Esto indica la presencia de compuestos orgánicos complejos y sustancias químicas de origen industrial.

En el Tramo 4, el aumento de DQO está asociado con la descarga de compuestos químicos persistentes provenientes de industrias petroquímicas y agroindustriales. Según Metcalf y Eddy (2014), estos vertimientos suelen ser más difíciles de tratar y contribuyen a la acumulación de contaminantes en el sistema.

En los tramos 1 y 2, la DQO refleja la combinación de vertimientos domésticos e industriales, con un aumento gradual que puede estar relacionado con la expansión urbana y el crecimiento de actividades comerciales en la zona.

5.2.2 Impacto de la Carga Contaminante en la Capacidad de Tratamiento

El incremento en la carga contaminante de DBO y DQO implica que la capacidad de tratamiento de la PTAR San Silvestre deberá ajustarse para poder manejar de manera efectiva estos niveles de contaminación. La Tabla 6 presenta una evaluación del impacto de la carga proyectada en la capacidad de la planta, considerando un diseño original con una capacidad máxima de 200 kg/día de DBO y 400 kg/día de DQO.

Tabla 6.

Presenta evaluación del impacto de la carga.

Tramo	Promedio	Capacidad	Excedente	Diferencia	Promedio	Capacidad	Excedente	Diferencia
	Carga de	Máxima de			Carga de	Máxima de		
	DBO	Remoción	DBO (%)	Real DBO	DQO	Remoción	DQO (%)	Real DQO
	(kg/día)	(kg/día)		(kg/día)	(kg/día)	DQO		(kg/día)
						(kg/día)		
Tramo 1	49.32	40	23.3	+9.32	90.53	80	13.2	+10.53
Tramo 2	41.38	40	3.5	+1.38	75.63	80	0	-4.37
Tramo 3	31.05	40	0	-8.95	63.83	80	0	-16.17
Tramo 4	59.37	40	48.4	+19.37	97.08	80	21.4	+17.08
Tramo 5	34.93	40	0	-5.07	71.50	80	0	-8.50

Los resultados del estudio indican que la capacidad de la PTAR San Silvestre para tratar vertimientos no domésticos puede optimizarse mediante ajustes operativos y mejoras en el control de carga contaminante. Si bien se observan excedentes en los niveles de DBO y SST en varios tramos, la implementación de estrategias de pretratamiento industrial y monitoreo continuo permitiría garantizar el cumplimiento normativo y la estabilidad del proceso de tratamiento biológico. La adecuación de los sistemas de sedimentación y la optimización del uso de lodos activados serán clave para mejorar la eficiencia del sistema sin comprometer su operación a largo plazo.

La contribución combinada de descargas domésticas (carga biodegradable) e industriales (compuestos orgánicos recalcitrantes) genera un efecto sinérgico que incrementa la carga de DBO más allá de lo que podría esperarse de cada fuente individual, como lo describen Metcalf y Eddy (2014).

Ali, Khan e Ilahi (2019) destacan que los compuestos orgánicos persistentes, típicos de descargas industriales, elevan la DQO en zonas críticas como el Tramo 4. Estos compuestos, aunque no biodegradables, generan una acumulación química que sobrecarga las unidades de tratamiento físico-químico en plantas como la PTAR.

En los tramos iniciales, la DQO también excede la capacidad de remoción (13.2% en T-1). Según Metcalf y Eddy (2014), esto refleja la influencia de detergentes y residuos químicos provenientes de descargas domésticas y comerciales, que tienden a elevar la carga química inicial del sistema.

Henze et al. (2008) subrayan que una alta relación DQO/DBO, como la observada en T-4, indica la presencia de compuestos difíciles de degradar, lo que sugiere la necesidad de

incorporar tecnologías avanzadas como oxidación avanzada o membranas para garantizar su remoción.

En los tramos críticos como T-4, los altos niveles de SST pueden comprometer la eficiencia de la sedimentación primaria y afectar la capacidad hidráulica del sistema de tratamiento. Este fenómeno se explica por la presencia de partículas densas y recalcitrantes, características de vertimientos industriales complejos (Ali, Khan e Ilahi, 2019).

Metcalf y Eddy (2014) describen que los SST de origen doméstico son predominantemente orgánicos y biodegradables, mientras que los de origen industrial incluyen partículas inorgánicas persistentes. La combinación de ambas fuentes en tramos críticos aumenta el riesgo de saturación y sedimentación.

Ali, Khan e Ilahi (2019) recomiendan el uso de tecnologías como membranas y reactores anaerobios para manejar excedentes significativos de DQO y compuestos persistentes, especialmente en plantas que tratan cargas mixtas como la PTAR San Silvestre.

Las limitaciones en el tratamiento de vertimientos industriales en la PTAR San Silvestre están asociadas a la variabilidad en la composición de los efluentes y la capacidad del sistema para manejar cargas fluctuantes. Según Metcalf & Eddy (2014), los tratamientos biológicos convencionales presentan restricciones en la remoción de contaminantes no biodegradables, como ciertos metales pesados y compuestos orgánicos recalcitrantes.

5.2.3 Recomendaciones Basadas en el Análisis de Impactos

Los hallazgos indican la necesidad de implementar medidas de mitigación para manejar los vertimientos no domésticos que superan las capacidades proyectadas de la planta. Se sugiere priorizar la instalación de sistemas de pretratamiento en los tramos 1 y 4, así como optimizar la capacidad de remoción biológica en la planta. Estos ajustes permitirán una mejor gestión de las

cargas de DBO y DQO antes de que los efluentes lleguen a las etapas finales de tratamiento, mejorando la eficiencia general y evitando sobrecargas operativas que puedan comprometer el rendimiento de la planta.

5.3 Estrategias para Minimizar los Impactos Generados en la PTAR

Para mejorar la eficiencia de la PTAR San Silvestre frente a los vertimientos industriales, se proponen estrategias basadas en tecnologías factibles y adaptadas a la realidad operativa. La implementación de pretratamientos físicos-químicos en las industrias generadoras, como la coagulación-floculación y la filtración avanzada, permitiría reducir la carga de metales pesados y materia orgánica antes de la descarga al sistema de alcantarillado. Según Metcalf & Eddy (2014), estos procesos han demostrado alta eficiencia en la remoción de contaminantes en sistemas similares. Asimismo, la instalación de sensores de monitoreo en tiempo real en los puntos de descarga permitiría un mejor control de los vertimientos, optimizando la respuesta operativa ante descargas no controladas. Finalmente, se recomienda la actualización de los protocolos de gestión de vertimientos, asegurando la regulación efectiva de descargas industriales y la planificación de mejoras en la infraestructura de la planta.

5.3.1 Actividad 1: Identificación de Parámetros con Riesgo Ambiental Crítico

Dentro de los metales pesados identificados en la literatura como indicadores de contaminación industrial, el mercurio y el plomo fueron seleccionados debido a su alta toxicidad y persistencia en el ambiente acuático. Según la EPA (2019), estos elementos presentan una alta bioacumulación y afectan la eficiencia de los procesos biológicos en plantas de tratamiento. Además, estudios de Castaño (2018) en Antioquia reportan que estos metales son predominantes en descargas industriales de sectores petroquímicos y metalúrgicos, los cuales tienen presencia

en la zona de estudio. A continuación, se presenta la tabla de cumplimiento normativo para los parámetros analizados en diferentes puntos de muestreo.

Tabla 7.

Cumplimiento normativo para los parámetros analizados en diferentes puntos de muestreo

Parámetro	Valor Obtenido (mg/L)	Norma (Resolución 0631/2015)	Cumplimiento (Sí/No)	Nivel de Riesgo
DBO	250	150	No	Alto
DQO	500	300	No	Medio
SST	200	100	No	Alto

Para garantizar una gestión efectiva de los vertimientos industriales y mejorar la eficiencia de la PTAR San Silvestre, se proponen las siguientes estrategias, basadas en estudios previos y mejores prácticas internacionales (Metcalf & Eddy, 2014; EPA, 2019):

- **Pretratamiento industrial obligatorio:** Implementar un sistema de tratamiento en origen para reducir la carga contaminante antes de su descarga en el alcantarillado, asegurando que los parámetros de vertimiento cumplan con los límites normativos.
- **Monitoreo continuo de carga contaminante:** Establecer sistemas de medición en tiempo real que permitan detectar fluctuaciones en la calidad del agua residual y ajustar las operaciones de la PTAR en respuesta a estos cambios.
- **Optimización del sistema de lodos activados:** Ajustar los tiempos de retención y la aireación en función de la carga de DBO y SST para maximizar la eficiencia del tratamiento biológico.
- **Evaluación de tecnologías híbridas:** Incorporar procesos físico-químicos complementarios, como coagulación-floculación y adsorción, para mejorar la remoción de contaminantes difíciles de degradar biológicamente.

- La implementación de estas medidas contribuirá a la sostenibilidad operativa de la PTAR y garantizará el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, reduciendo el impacto ambiental de los vertimientos no domésticos.

5.3.2 Actividad 2: Evaluación de la Carga Contaminante Residual No Tratada

La carga contaminante residual se refiere a la cantidad de contaminantes que no pueden ser tratados, por lo tanto, se descargan en el cuerpo de agua receptor. Este análisis es crucial para determinar el impacto acumulado de la carga contaminante no tratada sobre la calidad del agua en el ecosistema receptor.

Tabla 8.

Análisis para determinar el impacto acumulado de la carga contaminante

Parámetro	Caudal (m ³ /día)	Concentración (mg/L)	Carga Residual (kg/día)
DBO	100	250	25
DQO	100	500	50
SST	100	200	20
Mercurio (Hg)	100	0.005	0.0005

5.3.3 Actividad 3: Análisis de Riesgo Ambiental Acumulado

Tabla 9.

Evaluación de Riesgo Ambiental Según la Matriz EPA

Parámetro	Persistencia	Toxicidad	Bioacumulación	Volumen	Riesgo Total (EPA)
DBO	Baja	Baja	No Bioacumulativo	25 kg/día	Bajo
DQO	Media	Media	No Bioacumulativo	50 kg/día	Moderado
SST	Alta	Baja	No Bioacumulativo	20 kg/día	Alto
Mercurio (Hg)	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alto	0.0005 kg/día	Muy Alto

La metodología de la EPA es ampliamente reconocida y validada a nivel internacional para la evaluación de riesgos ambientales en cuerpos de agua receptores, vertimientos industriales y descargas no domésticas. Esta matriz proporciona un enfoque estructurado y reproducible para categorizar y priorizar contaminantes con base en su potencial de causar daño, permitiendo tomar decisiones informadas para la gestión de vertimientos y la protección ambiental.

Al utilizar esta matriz validada, se garantiza que la evaluación de riesgo está alineada con las mejores prácticas internacionales y que los resultados obtenidos son comparables con otras evaluaciones ambientales realizadas bajo normativas de la US EPA y la Unión Europea (Directiva 2000/60/CE).

Con base en los resultados obtenidos y la identificación de los principales parámetros con riesgo ambiental crítico, se proponen las siguientes estrategias para mitigar los impactos ambientales y mejorar la capacidad de tratamiento de la PTAR San Silvestre. Las recomendaciones están enfocadas en abordar tanto la carga contaminante residual como el cumplimiento normativo, garantizando una operación sostenible de la planta.

Los vertimientos industriales que superan los límites normativos, como los altos niveles de DBO, DQO y metales pesados, requieren un pretratamiento específico antes de ingresar a la PTAR. Se recomienda la instalación de los siguientes sistemas:

- Filtros de Carbón Activado para la remoción de compuestos orgánicos persistentes y ciertos metales pesados (e.g., mercurio y plomo).

Estas medidas permitirán reducir la carga contaminante antes de que los vertimientos lleguen a la planta, evitando la saturación de los sistemas biológicos. Los resultados indican una

disminución significativa en la eficiencia de remoción de DBO y SST debido a la alta carga orgánica de los vertimientos industriales.

- Aumento de la Aireación: Incrementar la capacidad de oxigenación en los reactores biológicos para mejorar la actividad microbiana en la remoción de materia orgánica.
- Instalación de Sistemas MBR (Membrane Bioreactors): Implementar reactores biológicos con membranas para separar los sólidos del efluente tratado y mejorar la calidad del agua residual.

Estas acciones no solo incrementarán la eficiencia de remoción, sino que también reducirán la acumulación de lodos en el sistema, minimizando los costos de disposición final. Es fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo que permita detectar fluctuaciones en los niveles de contaminantes en tiempo real. Se recomienda:

- Instalación de Sensores en Línea para medir DBO, DQO y metales pesados en los puntos de entrada y salida de la planta.
- Implementación de un Sistema de Alerta Temprana que identifique picos de contaminación y active respuestas automáticas para ajustar los procesos de tratamiento.
- Monitoreo de Calidad del Cuerpo de Agua Receptor: Realizar evaluaciones periódicas del Río Magdalena para detectar bioacumulación de metales y cambios en la biodiversidad acuática.

Estas medidas garantizarán un control estricto de los vertimientos y una respuesta oportuna ante eventos de contaminación, minimizando el riesgo ambiental acumulado. Es esencial trabajar directamente con las industrias que generan vertimientos no domésticos para mejorar el manejo de sus aguas residuales y promover el cumplimiento normativo:

- Capacitación Técnica en Tratamiento de Aguas Residuales para el personal de las empresas generadoras, con énfasis en la reducción de carga contaminante en origen.
- Desarrollo de Manuales de Buenas Prácticas Ambientales: Incluir estrategias para la reducción de la generación de residuos y la optimización de procesos industriales.
- Fortalecimiento de la Regulación y Control: Implementar sanciones efectivas para los generadores que no cumplan con los límites establecidos y crear incentivos para aquellos que adopten tecnologías de tratamiento adecuadas.

Estas acciones permitirán una gestión más sostenible de los vertimientos en el largo plazo y asegurarán que las industrias se alineen con los objetivos de calidad del agua del municipio. Los resultados muestran que la producción de lodos es un problema significativo debido a la alta carga de SST. Para manejar de manera más eficiente los residuos sólidos generados, se propone:

- Estabilización de Lodos mediante Digestión Anaerobia: Utilizar digestores anaerobios para reducir el volumen de lodos y generar biogás como subproducto.
- Secado y Disposición Segura de Lodos Tóxicos: Implementar tecnologías de secado térmico y confinamiento seguro para lodos que contengan metales pesados.
- Uso de Lodos como Fertilizante (si cumplen con la normativa): Evaluar la viabilidad de utilizar los lodos tratados como fertilizante en actividades agrícolas, siempre y cuando cumplan con los límites de metales pesados y compuestos tóxicos.

Los metales pesados identificados en los vertimientos son altamente persistentes y requieren un tratamiento especializado. Se propone:

- Biorremediación con Algas y Hongos: Utilizar cepas de algas (e.g., *Chlorella vulgaris*) y hongos (e.g., *Aspergillus niger*) capaces de bioacumular metales pesados.

- Fitorremediación en Zonas de Infiltración: Implementar plantas hiperacumuladoras en las áreas cercanas a la descarga de la PTAR para absorber metales pesados.

Estas tecnologías permiten reducir la concentración de metales en el efluente final de manera económica y sostenible, contribuyendo a la recuperación del ecosistema receptor.

Para asegurar una mejora continua en la calidad de los vertimientos, se recomienda el establecimiento de un programa de responsabilidad compartida entre la PTAR y las industrias generadoras, basado en:

- Acuerdos de Producción Más Limpia: Implementar convenios voluntarios que promuevan la adopción de tecnologías limpias y la reducción de cargas contaminantes.

- Evaluación de Desempeño Ambiental con Incentivos: Crear un sistema de clasificación de desempeño para premiar a las empresas con buenas prácticas ambientales.

Estas estrategias permitirán fortalecer la colaboración interinstitucional y asegurar el compromiso de todos los actores involucrados en la protección del medio ambiente.

El análisis de la calidad de los vertimientos no domésticos hacia la PTAR San Silvestre evidencia una alta variabilidad en los parámetros de calidad del agua, con picos de concentración de DBO y DQO que superan los valores permitidos por la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Esto sugiere que los vertimientos industriales no están siendo pretratados adecuadamente antes de ser descargados en la red de alcantarillado, lo cual representa un desafío significativo para la operación eficiente de la planta. La alta carga orgánica presente en estos vertimientos puede generar sobrecargas en los procesos biológicos, afectando la estabilidad del tratamiento y reduciendo la calidad del efluente.

Estudios previos han demostrado que la presencia de elevadas concentraciones de DBO puede inhibir la eficiencia de los procesos biológicos, como los lodos activados, al saturar la

capacidad de degradación de la biomasa microbiana y reducir la eficiencia de remoción de materia orgánica (Liu y Tay, 2004). Por tanto, la implementación de estrategias de pretratamiento para reducir estas cargas se vuelve indispensable para mantener el equilibrio en el proceso de tratamiento biológico.

Un factor crítico que agrava la situación es la presencia de metales pesados, como mercurio y plomo, en concentraciones que superan los límites establecidos para descargas no domésticas. Según Gikas y Tsihrintzis (2012), la presencia de estos elementos en concentraciones superiores a los límites normativos puede causar inhibición microbiana, reduciendo la eficiencia de los procesos biológicos y generando subproductos tóxicos en el sistema de tratamiento.

La situación descrita no es exclusiva de esta planta. En estudios realizados en plantas de tratamiento de aguas residuales mixtas en Estados Unidos, se encontró que los metales pesados y otros contaminantes afectan significativamente la eficiencia de los sistemas de lodos activados, particularmente en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos (EPA, 2019). En el contexto de países en desarrollo, autores como Cardoso et al. (2020) y Martínez et al. (2021) destacan que las limitaciones en infraestructura, recursos financieros y capacidades técnicas agravan estos problemas. Asimismo, la débil implementación de normativas o su inexistencia en algunos casos contribuyen a la vulnerabilidad de los sistemas de tratamiento frente a vertimientos industriales complejos (UNEP, 2020). Estas condiciones subrayan la importancia de diseñar esquemas de tratamiento robustos y adaptados a las necesidades locales para garantizar la sostenibilidad ambiental y la protección de los recursos hídricos a largo plazo (Gikas & Tchobanoglous, 2021).

Esto demuestra que las plantas diseñadas originalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas no están preparadas para manejar la complejidad de los vertimientos industriales sin una adaptación adecuada de sus procesos. Es necesario, por tanto, un rediseño del esquema de tratamiento para garantizar el cumplimiento normativo y la protección ambiental a largo plazo.

La variabilidad observada en los parámetros de calidad del agua, especialmente en DBO y SST, sugiere la existencia de "cargas de choque" que podrían sobrecargar temporalmente el sistema de tratamiento (Metcalf y Eddy, 1995). Este fenómeno puede derivar en fallos operativos si no se gestionan de manera oportuna, incrementando el riesgo de acumulación de sólidos y la pérdida de capacidad de tratamiento en los reactores biológicos. La implementación de tanques de equalización y sistemas de monitoreo continuo puede ayudar a mitigar este tipo de fluctuaciones, estabilizando el efluente antes de su ingreso a la planta.

La modelación realizada utilizando EPA SWMM muestra que las concentraciones de DBO y SST son más elevadas en los tramos T-4 y T-5 del sistema de alcantarillado, lo cual coincide con la ubicación de las principales descargas industriales en la Comuna Tres. Esta acumulación representa un riesgo de sedimentación que podría afectar la capacidad hidráulica de las tuberías y la eficiencia de transporte de la red. La alta concentración de sólidos suspendidos totales incrementa la probabilidad de taponamientos y obstrucciones, lo que conlleva un aumento en los costos de mantenimiento y operación.

Además de afectar la eficiencia biológica de la planta, la presencia de metales pesados y compuestos tóxicos contribuye a la corrosión acelerada de las tuberías y equipos de tratamiento (Marín Galvín, 2011). Este fenómeno reduce la vida útil de la infraestructura y genera mayores gastos para la operación y mantenimiento de la planta. Los estudios de García (2017) respaldan

estos hallazgos al demostrar que los vertimientos industriales con altos contenidos de metales pesados requieren sistemas de tuberías y reactores de materiales resistentes a la corrosión para evitar fallos estructurales prematuros.

En comparación con normativas internacionales, Europa y Estados Unidos han endurecido los límites para la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes en vertimientos industriales (European Commission, 2020). Adaptar la normativa local a estos marcos permitiría no solo mejorar la gestión de vertimientos, sino también aumentar la competitividad de las industrias mediante la implementación de tecnologías limpias y sostenibles.

La descarga de aguas residuales no tratadas en cuerpos hídricos como el río Magdalena podría generar efectos negativos en la biodiversidad acuática, ya que la acumulación de metales pesados y compuestos orgánicos afecta la reproducción y el crecimiento de las especies (Ali et al., 2019). Esto implica un riesgo significativo para el ecosistema local y la calidad del agua utilizada para consumo humano (OMS, 2018). Implementar sistemas de control y monitoreo para detectar concentraciones elevadas de estos contaminantes se convierte en una prioridad para mitigar los riesgos ambientales y proteger la salud pública.

Esta tecnología permite una separación física más efectiva de los contaminantes, reduciendo la carga sobre el proceso biológico y mejorando la remoción de materia orgánica y metales pesados. No obstante, la inversión inicial y los costos de operación de los MBR son elevados, lo cual requiere un análisis de costo-beneficio detallado antes de su implementación.

La incorporación de tecnologías avanzadas de tratamiento y pretratamiento implica un aumento en los costos operativos, pero podría generar ahorros significativos a largo plazo al reducir las sanciones por incumplimiento de la normativa ambiental y los costos de

mantenimiento de infraestructura (EPA, 2019). En definitiva, la gestión integral de los vertimientos no domésticos debe incluir estrategias de monitoreo continuo y programas de capacitación para las industrias locales, con el objetivo de reducir la carga contaminante desde la fuente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018).

6. Conclusiones

El análisis de la carga contaminante en la PTAR San Silvestre evidencia que los vertimientos no domésticos generan sobrecargas que comprometen su eficiencia operativa, con excedentes en DBO y SST superiores al 20% en algunos tramos críticos. La ausencia de pretratamientos en fuentes industriales ha sido identificada como la principal causa de estas desviaciones, afectando la capacidad de remoción de contaminantes. La implementación de estrategias como el pretratamiento en origen y el monitoreo en tiempo real permitirá mejorar la eficiencia del sistema y garantizar el cumplimiento de la Resolución N° 0631 de 2015. Adicionalmente, los resultados destacan la necesidad de revisar periódicamente la normativa aplicada a vertimientos industriales para asegurar que las regulaciones reflejen adecuadamente las condiciones locales y la evolución tecnológica en tratamiento de aguas residuales.

Los datos obtenidos durante el periodo de monitoreo mostraron que los valores máximos de DBO superan los 250 mg/L, mientras que los de DQO alcanzan los 350 mg/L, lo que indica una alta carga orgánica que podría comprometer el tratamiento biológico de la planta.

Estos hallazgos justifican la necesidad de un control más riguroso de los vertimientos no domésticos, ya que las características observadas pueden reducir la eficiencia del tratamiento y aumentar la producción de lodos, incrementando los costos operativos de la planta. En este

contexto, los resultados destacan la importancia de implementar pretratamientos en las fuentes industriales para garantizar la estabilidad de los procesos biológicos en la PTAR San Silvestre.

Los resultados del estudio revelaron que estos vertimientos, al contener sustancias tóxicas no fácilmente biodegradables, inhiben la actividad microbiana en los sistemas biológicos, reduciendo la capacidad de remoción de contaminantes y aumentando la producción de lodos no estabilizados.

El análisis mostró que, durante los periodos de mayor actividad industrial, los niveles de DBO y SST se incrementan en más del 30%, provocando fluctuaciones que afectan la eficiencia del sistema, lo que puede llevar a un incremento en la concentración de contaminantes en el efluente tratado.

Los resultados del estudio destacan la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo y desarrollar protocolos específicos para gestionar los vertimientos no domésticos. La ausencia de estos controles afecta la eficiencia de la PTAR San Silvestre, incrementando los riesgos ambientales y de salud pública asociados a efluentes con altas concentraciones de contaminantes.

Se identificaron estrategias clave para mitigar estos impactos, incluyendo tecnologías de pretratamiento como coagulación-floculación, filtración avanzada y reactores biológicos de membrana (MBR). Estas soluciones permiten la remoción de hasta un 40% de la carga contaminante antes de ingresar al sistema de tratamiento principal, estabilizando los parámetros de calidad del agua y optimizando la eficiencia del proceso de lodos activados.

Estas medidas no solo cumplen con la Resolución 0631 de 2015, que regula los límites permisibles de contaminantes en vertimientos, sino que también garantizan una operación más sostenible de la planta. La implementación de tecnologías de pretratamiento y la actualización de

protocolos de gestión contribuirán a mitigar los efectos negativos de los vertimientos industriales, protegiendo los recursos hídricos a largo plazo.

Este estudio evidencia la relevancia de una gestión adecuada de vertimientos no domésticos para la operación eficiente de las plantas de tratamiento diseñadas para flujos domésticos. Asimismo, se alinea con las mejores prácticas internacionales, proponiendo un modelo de referencia aplicable a contextos similares y con un impacto positivo en la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento en Colombia y otras regiones.

7. Recomendaciones

Las recomendaciones presentadas a continuación buscan proporcionar una guía para optimizar la gestión de los vertimientos no domésticos en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Silvestre, del municipio de Barrancabermeja, con el fin de asegurar la eficiencia del tratamiento, minimizar los riesgos ambientales y mejorar el cumplimiento normativo. Estas recomendaciones se basan en los hallazgos obtenidos a partir de la caracterización de los vertimientos industriales y su impacto en el sistema de tratamiento, y están orientadas a mejorar la operación de la planta en el corto, mediano y largo plazo, así como a proporcionar lineamientos para futuras investigaciones.

La necesidad de implementar un sistema de monitoreo continuo se justifica por la alta variabilidad en la calidad de los vertimientos industriales, evidenciada en el análisis temporal. Estas fluctuaciones incluyen variaciones en la carga orgánica, sólidos suspendidos totales (SST) y metales pesados, los cuales impactan significativamente la eficiencia del tratamiento biológico de la PTAR San Silvestre.

La variabilidad observada en parámetros como DBO, los SST y los metales pesados sugiere la presencia de descargas industriales intermitentes o irregulares que generan impactos negativos en el rendimiento de la planta. Los metales pesados, en particular, no solo interfieren en los procesos biológicos, sino que también incrementan los costos de operación y mantenimiento al acumularse en los lodos generados.

Se recomienda la instalación de estaciones de monitoreo en tiempo real a lo largo de los puntos de entrada de vertimientos industriales al sistema de alcantarillado. Estas estaciones deben estar equipadas con sensores automáticos para medir parámetros críticos como DBO, SST, pH, y concentraciones de metales pesados como mercurio y plomo. La información recolectada deberá ser integrada en una plataforma digital de gestión ambiental que permita a los operadores de la planta realizar ajustes proactivos en los procesos de tratamiento en función de los resultados del monitoreo.

La implementación de este sistema permitirá a las autoridades ambientales locales y regionales tener un mayor control sobre las descargas industriales y asegurar el cumplimiento de la Resolución N° 0631 de 2015. Además, este sistema servirá como una herramienta para generar alertas tempranas de posibles picos contaminantes, evitando así sobrecargas en el sistema biológico de la PTAR y mejorando la estabilidad operativa a largo plazo. Los resultados obtenidos en la investigación indican que la mezcla de vertimientos industriales y domésticos puede incrementar la producción de lodos no estabilizados, lo que representa un desafío adicional para el manejo y disposición de estos residuos.

Los altos niveles de metales pesados y contaminantes no biodegradables en los lodos afectan la seguridad y sostenibilidad de las prácticas actuales de disposición y representan un riesgo potencial para el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Se recomienda

desarrollar un plan de manejo integral de lodos que incluya estrategias de reducción de volumen mediante procesos de deshidratación y estabilización, así como el monitoreo regular de contaminantes tóxicos en los lodos generados. Además, se deben evaluar opciones de disposición final que minimicen el impacto ambiental, como el uso de lodos en procesos de compostaje para su uso como enmienda en suelos no agrícolas, siempre y cuando cumplan con los estándares de calidad establecidos.

La implementación de este plan de manejo contribuirá a mejorar la sostenibilidad ambiental del sistema de tratamiento de la PTAR y a reducir los costos asociados a la disposición de lodos. Asimismo, permitirá a la planta cumplir con las normativas ambientales vigentes y evitar sanciones regulatorias derivadas de la incorrecta disposición de residuos industriales mezclados con lodos biológicos.

Los resultados del estudio evidencian que la normativa actual no proporciona directrices específicas para la gestión de vertimientos mixtos (domésticos e industriales) que ingresan a las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esta situación se traduce en una falta de control efectivo sobre la calidad de los vertimientos y dificulta la implementación de medidas correctivas en la PTAR San Silvestre. Se recomienda la revisión y actualización de la normativa local para establecer límites específicos de vertimientos industriales que ingresan a sistemas de tratamiento diseñados para aguas residuales domésticas. La nueva normativa debe incluir mecanismos de sanción más estrictos para vertimientos que superen los límites permisibles y contemplar incentivos para las industrias que implementen sistemas de pretratamiento de sus aguas residuales antes de descargarlas en el sistema de alcantarillado. La actualización de la normativa contribuirá a una mejor regulación de los vertimientos en el municipio de Barrancabermeja y fortalecerá el marco legal para asegurar la protección de los cuerpos hídricos

receptores. Además, facilitará la integración de las actividades industriales en el desarrollo sostenible del municipio, alineándose con las mejores prácticas internacionales en la gestión de vertimientos industriales. Los métodos convencionales de tratamiento, como los lodos activados, no son adecuados para manejar estos contaminantes específicos. Se sugiere la evaluación de tecnologías avanzadas como los Reactores Biológicos de Membrana (MBR) y los procesos de Oxidación Avanzada (AOP), que han demostrado ser efectivos para la remoción de contaminantes tóxicos y recalcitrantes en otros contextos. La implementación de estos sistemas podría mejorar la capacidad de la planta para tratar vertimientos mixtos, garantizando la calidad del efluente y reduciendo los impactos ambientales en los cuerpos hídricos receptores.

La investigación futura en estas tecnologías contribuirá a desarrollar soluciones específicas para la gestión de vertimientos mixtos en plantas de tratamiento como la PTAR San Silvestre y proporcionará un modelo replicable para otras plantas en Colombia que enfrentan problemáticas similares. En general, se recomienda una mejora integral en la gestión de vertimientos no domésticos hacia la PTAR San Silvestre, que incluya la implementación de monitoreo continuo, desarrollo de planes de manejo de lodos, revisión normativa y evaluación de tecnologías avanzadas. Estas medidas permitirán asegurar la sostenibilidad operativa de la planta, garantizar la calidad del efluente tratado y minimizar el impacto ambiental en el contexto local y regional, contribuyendo a la protección de los recursos hídricos del municipio de Barrancabermeja.

Referencias

- Aguas de Barrancabermeja S.A. E.S.P. (05 de 05 de 2022). *Planta de tratamiento de aguas residuales*. <http://www.aguasdebarrancabermeja.gov.co/index.php/2-uncategorised/168-ptar>
- Ali, H., Khan, E., y Ilahi, I. (2019). "Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation." *Journal of Chemistry*, 2019.
- Álvarez-Gayou, J. L. (2003). *Cómo hacer investigación cualitativa*. Paidós.
- APHA (American Public Health Association). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. APHA Press.
- Bach, C.D. (2018), Identificación de los vertimientos y sus impactos ambientales de las aguas residuales domesticas generados por la población de Rancas – distrito de Simón Bolívar - provincia de Pasco. Cerro de Pasco. Perú. HYPERLINK http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/777/1/T026_N%c2%b072044831_T.pdf
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/777/1/T026_N%c2%b072044831_T.pdf
- Battarbee, R. W., Anderson, N. J., Jeppesen, E., y Leavitt, P. R. (2014). "Environmental responses to acidification of freshwaters." *Environmental Science y Technology*, 48(4), 907-914.
- Burns, N., y Grove, S. K. (2005). *The Practice of Nursing Research: Conduct, Critique, and Utilization*. Elsevier Health Sciences.
- Características Agua Influyente y Efluente (2016). Evaluación de los parámetros fisicoquímicos en las aguas tratadas en la PTAR San Silvestre.

- Castaño, A. (2018). Impacto de los vertimientos industriales en la calidad del agua tratada en plantas de tratamiento en Antioquia. Universidad Nacional de Colombia.
- Chen, J. (2018). Advanced treatment technologies for industrial wastewater: Applications of AOP and electrocoagulation. University of California, Berkeley.
- Consortio PTAR San Silvestre. (05 de 05 de 2022). *Consortio PTAR San Silvestre*.
<https://ptarss.com/proyecto-ptar/>
- CORNARE. (07 de 05 de 2022). *Términos de referencia para la presentación del Informe de Caracterización de vertimientos líquidos*. https://cornare.gov.co/.../TERMINOS_DE_REFERENCIA_CHARACTERIZACION.doc
- CORNARE. (2014). *Sistema de Gestión Integral de CORNARE. Instructivo recolección muestras de agua*. Colombia: Corporación Autónoma Regional del Río Nare.
https://www.cornare.gov.co/laboratorio/I-MA-01_Recoleccion_Muestras_de_Agua_V.05.pdf.
- Creswell, J. W. (2009). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Sage.
- Cronbach, L. J. (1980). *Toward Reform of Program Evaluation*. Jossey-Bass.
- Díaz C., E.; Alvarado G., A. R. y Camacho C., K. E. (Enero-Junio de 2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 78-97.
- EMCALI EICE E.S.P. (20 de Febrero de 2018). *Guía general para la presentación del informe de caracterización de vertimientos líquidos*.
<http://www.emcali.com.co/web/acueducto/vertimientos?inheritRedirect=true>

- EPA. (2019). *Guidelines for Industrial Wastewater Discharge*. Environmental Protection Agency.
- European Commission. (2020). *Water Framework Directive (WFD) – Environment*. European Commission.
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage.
- García, M. (2017). *Evaluación de la capacidad de plantas de tratamiento de aguas domésticas frente a vertimientos industriales*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gikas, P., y Tsihrintzis, V. A. (2012). "The effect of temperature and hydraulic retention time on the treatment performance of a vertical subsurface flow constructed wetland." *Water Resources Management*, 26(5), 1289-1301.
- Hansen, L. (2015). *Industrial wastewater management: Regulatory frameworks in Europe and Latin America*. Technical University of Denmark.
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G., y Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- Hernández Sampieri, R.; Fernández Collado., C. y Baptista Lucio., P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México D.F., México: McGraw – Hill.
- Informe Ejecutivo Fase I Revisión de Ingeniería Básica. (2017). *Evaluación de la eficiencia de los lodos activados frente a vertimientos industriales*.
- Judd, S., y Jefferson, B. (2018). *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Kerlinger, F. N., y Lee, H. B. (2002). *Foundations of Behavioral Research*. Wadsworth.

- Kujawa-Roeleveld, K., y Zeeman, G. (2006). "Anaerobic treatment in decentralized and source-separation-based sanitation concepts." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5(1), 115-139.
- Linares, C. (2016). Análisis de los vertimientos industriales en plantas de tratamiento de aguas residuales en Bogotá y Medellín. Universidad de los Andes.
- Liu, W. T., y Tay, J. H. (2004). "State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment." *Biotechnology Advances*, 22(7), 533-563.
- Liu, W., Tay, J. H., y Tan, K. S. (2019). "Enhanced performance of wastewater treatment plants through industrial pre-treatment technologies." *Water Research*, 157, 340-348.
- Mara, D. D. (2004). Domestic wastewater treatment in developing countries. Londres, Reino Unido: EARTHSCAN.
- Marín Galvín, R. (1 de Julio de 2011). Corrosión y agresividad en aguas residuales Mecanismos, ejemplos y costes. *EMACSA*, 15-22.
- Marín Galvín, R. (2011). *Corrosion in Wastewater Treatment Plants*. Water Research Journal.
- Martínez, P. (2019). Impacto de los vertimientos industriales en el río Maipo y plantas de tratamiento de Santiago. Universidad de Chile.
- Metcalf y Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y reutilización. México: McGraw Hill.
- Metcalf y Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombia. (2010). *Decreto 3930*. Bogotá D.C.: Diario oficial.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución N° 0631 de 2015*. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Estado del tratamiento de aguas residuales en Colombia*.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2018). *Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV)*.

Morales H., Y. Y. (2019). Diagnóstico y seguimiento de vertimientos de aguas residuales no domésticas al alcantarillado urbano de Duitama. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

OMS. (2018). *Aguas residuales y su impacto en la salud*. World Health Organization.

Pérez, J. (2020). Evaluación de la influencia de la industria petroquímica en plantas de tratamiento de aguas residuales en São Paulo. Universidad de São Paulo.

Propuesta de Aplicación (2022). Evaluación de los vertimientos no domésticos en el sistema de alcantarillado de Barrancabermeja.

Revolledo, M. P. (2022), Análisis de los valores máximos admisibles del vertimiento de efluentes no domésticos al sistema de alcantarillado sanitario en la provincia de Pisco, 2021. Pisco. Perú. [HYPERLINK](#)

"file:///D:/Downloads/IV_FIN_107_TE_Revolledo_Balmaceda_2022.pdf"

file:///D:/Downloads/IV_FIN_107_TE_Revolledo_Balmaceda_2022.pdf

Rodríguez Pimentel, J. (2017). Impacto de los vertimientos industriales en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Environmental Science Journal.

- Rossman, L. A. (2017). *Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency.
- Sabino, C. (2014). *El Proceso de la Investigación*. Panapo.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., y Lucio, P. B. (2010). *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., y Nekola, J. C. (1999). "Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems." *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196.
- Taylor, S. J., Bogdan, R., y DeVault, M. (2015). *Introduction to Qualitative Research Methods: A Guidebook and Resource*. John Wiley y Sons.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., y Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill.
- Union Temporal Ptar San Silvestre. (2011). Consultoria para seleccionar la mejor tecnología, diseñar la ingeniería básica y elaborar las condiciones de contratación y especificaciones técnicas para la construcción de la PTAR San Silvestre, Municipio de Barrancabermeja . Barrancabermeja.
- United Nations. (2021). *Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions: Protecting Human Health and the Environment from Hazardous Chemicals and Wastes*.
- Universidad de Valencia. (2014). *Manual de usuario EPA SWMM*. Bogotá .
- USEPA. (2020). *Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response*. United States Environmental Protection Agency.
- Verma, R., Prasad, B., y Mishra, I. M. (2020). "Advanced wastewater treatment technologies and application for mixed industrial effluent." *Journal of Hazardous Materials*, 389, 122126.

World Health Organization (WHO). (2018). Water Quality and Health - Review of Turbidity: Information for Regulators and Water Suppliers.

Yin, R. K. (2018). Case Study Research and Applications: Design and Methods. Sage.

Zhang, C., Cui, F., Zeng, G., Jiang, M., Yang, Z., Yu, Z., y Zhu, M. (2018). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of the Xiangjiang River, southern China: Distribution, sources, and ecological risk assessment." *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 9114-9124.

Apéndices