



Análisis de la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua por acción de un vertimiento a partir de la modelación hidrodinámica y de calidad en un tramo de la quebrada el medio en el municipio Titiribí – Antioquia

Jamer Yadir Carabali Camacho

Hermes Manuel Pineda Blanco

Trabajo de monografía como requisito para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua

Asesor

Álvaro Wills Toro, PhD(c) en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería - Escuela Ambiental

Especialización en Manejo y Gestión del Agua

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita

(Carabali Camacho & Pineda Blanco, 2022)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Carabali Camacho, J. Y., & Pineda Blanco, H. M. (2022). *Análisis de la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua por acción de un vertimiento a partir de la modelación hidrodinámica y de calidad en un tramo de la quebrada el medio en el municipio Titiribí – Antioquia*. Trabajo de Monografía. Universidad de Antioquia, Medellín-Antioquia.



Especialización en Manejo y Gestión del Agua, Cohorte 11.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Hermes Manuel Pineda Blanco, dedica este trabajo a sus padres, Hermes Pineda Román y Dalgy Blanco Blanco de los cuales ha recibido durante 24 años y de forma incondicional todo su conocimiento, apoyo, y amor, por motivarme a seguir mis sueños a pesar de las realidades y adversidades que vive el país.

A la Universidad de Antioquia por ser ese espacio de aprendizaje donde convergen personas, sueños, conocimientos y experiencias que me definen como profesional, con convicciones y la disposición para generar cambios en el marco del bienestar social.

Jamer Yadir Carabali Camacho, dedica este trabajo a sus padres por darle la vida, velar por su salud, estar siempre presente en todo momento, otorgándole su apoyo y confianza incondicional, además de ser una guía en la formación como persona y vigorizar la realización de sus sueños.

A su hermano Carlos Carabali por compartir todos esos secretos y aventuras que solo se pueden vivir entre hermanos.

A los profesores que transmitieron su conocimiento para una formación técnico-científica, idónea para seguir ejerciendo la profesión.

Y finalmente a Dios por demostrarme tantas veces su existencia, al darle la oportunidad de vivir y concederle una familia y compañía maravillosas, además de otorgar las fuerzas necesarias para no dejarlo sucumbir ante cada tropiezo y darle fortaleza para cumplir todas las metas propuestas.

Tabla de contenido

<i>Resumen</i>	9
<i>Abstract</i>	10
<i>Introducción</i>	11
<i>Planteamiento del problema</i>	13
<i>Justificación</i>	16
<i>Objetivos</i>	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos.....	17
<i>Marco teórico</i>	18
<i>Metodología</i>	25
Muestra y documentación	25
Descripción de la Zona de Estudio:.....	25
Recopilación de información:	28
Depuración	28
Modelación.....	29
Resultados y análisis	30
<i>Resultados</i>	31
Simulación Escenario 1	42
Simulación Escenario 2.....	49
<i>Conclusiones</i>	60
<i>Recomendaciones</i>	62
<i>Referencias</i>	64
<i>Anexos</i>	66

Lista de tablas

Tabla 1. Normatividad colombiana referente al tema de vertimientos	22
Tabla 2. Tiempo de simulación incluyendo el ingreso del vertimiento.	30
Tabla 3. Constantes cinéticas implementadas en IBER vs las calibradas en Q2Kw en el PSMV del 2018.	34
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados para alimentar el modelo.	34
Tabla 5. <i>Caudales medios, mínimos y máximos representativos en la cuenca de interés.</i>	36
Tabla 6. Caudales medios y mínimos para la quebrada El Medio.	36
Tabla 7. Coordenadas del vertimiento.	37
Tabla 8. Coordenadas de los puntos de análisis.	38

Lista de figuras

Figura 1. Proyección de la ubicación de la nueva PTAR del municipio de Titiribí - Antioquia con un punto de descarga en la quebrada El Medio.....	15
Figura 2. Integración del módulo IberWQ en el paquete de software Iber, y datos de entrada necesarios para ejecutar cada módulo (Cea et al., 2016).	19
Figura 3. Estructura de IberWQ las variables dentro de las cajas negras son calculadas por el modelo. Las flechas continuas indican interacciones entre variables. Las líneas discontinuas indican dependencia de constantes cinéticas de reacción en las variables del modelo (Cea et al., 2016).....	21
Figura 4. <i>Desarrollo de la metodología.</i>	25
Figura 5. Mapa de coberturas de la cuenca del río Amagá tomado de: (Corantioquia, 2018b)....	27
Figura 6. Topografía quebrada El Medio.	31
Figura 7. <i>Asignación coeficiente de rugosidad de Manning</i> (TE CHOW, 2005).	32
Figura 8. <i>Especialización de los puntos de análisis (evolución del punto) y los perfiles.</i>	39
Figura 9. <i>Resultado multitemporal del parámetro DBOC.</i>	40
Figura 10. Perfil 1 sección transversal del cuerpo de agua.	40
Figura 11. Perfil 2 sección transversal del cuerpo de agua.	41
Figura 12. Perfil 3 sección transversal del cuerpo de agua.	41
Figura 13. Perfil 4 sección transversal del cuerpo de agua.	41
Figura 14. Perfil 5 sección transversal del cuerpo de agua.	41
Figura 15. Perfil 6 sección transversal del cuerpo de agua.	42
Figura 16. Comportamiento de la DBOC sin tratamiento.....	43
Figura 17. Perfil longitudinal de la DBOC sin tratamiento	43
Figura 18. Comportamiento del oxígeno disuelto sin tratamiento	44
Figura 19. Perfil longitudinal del oxígeno disuelto sin tratamiento.....	44
Figura 20. Comportamiento del amonio sin tratamiento	45
Figura 21. Perfil longitudinal del amonio sin tratamiento	45

Figura 22. Comportamiento del nitrato sin tratamiento	46
Figura 23. Perfil longitudinal del nitrato sin tratamiento	46
Figura 24. Comportamiento del nitrógeno orgánico sin tratamiento	47
Figura 25. Perfil longitudinal del nitrógeno orgánico sin tratamiento	47
Figura 26. Comportamiento de la temperatura T °C sin tratamiento.....	48
Figura 27. Interacción entre la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento.....	48
Figura 28. Interacción entre los nitratos y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento....	49
Figura 29. Interacción entre NH ₃ , Norg y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento. ..	49
Figura 30. Comportamiento de la DBOC con tratamiento	50
Figura 31. Perfil longitudinal de la DBOC con tratamiento	51
Figura 32. Comportamiento del oxígeno disuelto con tratamiento.....	51
Figura 33. Perfil longitudinal del oxígeno disuelto con tratamiento.....	52
Figura 34. Comportamiento del amonio con tratamiento	52
Figura 35. Perfil longitudinal del amonio con tratamiento	53
Figura 36. Comportamiento del nitrato con tratamiento	53
Figura 37. Perfil longitudinal del nitrato con tratamiento.....	54
Figura 38. Comportamiento del nitrógeno orgánico con tratamiento	54
Figura 39. Perfil longitudinal del nitrógeno orgánico con tratamiento	55
Figura 40. Comportamiento de la temperatura T °C con tratamiento.....	55
Figura 41. Interacción entre la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento.....	56
Figura 42. Interacción entre los nitratos y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento. .	56
Figura 43. Interacción entre NH ₃ , Norg y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento. .	57
Figura 44. Comportamiento del calado para los puntos de análisis	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

A.A.S. S.A	Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A.
ARD	Aguas residuales domésticas
ARnD	Aguas residuales no domésticas
Corantioquia	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
FIB	Bacterias indicadoras fecales
IBER	Modelo matemático de dos dimensiones (ríos y estuarios)
NH₃	Nitrógeno amoniacal
NMP	Número más probable
NO₃	Nitratos
OD	Oxígeno disuelto
ODC	Objetivos de calidad
pH	Potencial de hidrógeno
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PMAA	Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
s.n.m.	Sobre el nivel del mar
UFC	Unidades formadoras de colonias

Resumen

El estudio comprende la modelación de dos escenarios para la proyección del vertimiento de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) en el municipio de Titiribí Antioquia, para establecer el grado de asimilación del cuerpo de agua receptor (quebrada El Medio), tomando como herramienta de predicción el programa IBER y datos para la alimentación de la simulación a partir de información secundaria como los parámetros fisicoquímicos y topográficos; los dos eventos detallados corresponden al vertimiento con y sin tratamiento, analizando los parámetros de oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DBO), Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃) y Nitratos (N-NO₃).

Para lograr el objetivo de estimación o representación simplificada, se desarrollan los módulos hidrodinámico para los cálculos hidrológicos y de calidad del agua, con el propósito de efectuar el proceso y postproceso y con ello poder visualizar los resultados para su posterior análisis sobre comportamiento a través de la sección longitudinal del cauce, el estudio permiten dar cuenta de las ventajas y limitaciones de IBER como herramienta para la modelación hidráulica y evaluación de la evolución espacio - temporal de contaminantes, así como, la posibilidad de analizar el efectos de las descargas de efluentes tratados en los cuerpos de agua natural.

Palabras clave: IBER, modelación, evaluación del vertimiento, proceso y postproceso.

Abstract

The study includes the modeling of two scenarios for the projection of the discharge of a wastewater treatment plant (WWTP) in the municipality of Titiribí Antioquia, to establish the degree of assimilation of the receiving water body (Q. El Medio), taking as a prediction tool, the IBER program and data to feed the simulation from secondary information such as physicochemical and topographic parameters; the two detailed events correspond to the dumping with and without treatment, analyzing the parameters of dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (BOD), Organic Nitrogen, Ammoniacal Nitrogen (N-NH₃) and Nitrates (N-NO₃).

In order to achieve the objective of estimation or simplified representation, hydrodynamic modules are developed for hydrological and water quality calculations, with the purpose of carrying out the process and post-processing and thus being able to visualize the results for later analysis on behavior through the longitudinal section of the riverbed, the study allows to account for the advantages and limitations of IBER as a tool for hydraulic modeling and evaluation of the space-time evolution of pollutants, as well as the possibility of analyzing the effects of discharges of treated effluents in natural water bodies.

Keywords: IBER, modeling, dumping evaluation, process and post-process.

Introducción

De todos los recursos naturales, el agua es el más esencial. La vida comenzó en el agua, se nutre con agua. Hay organismos que pueden sobrevivir sin oxígeno, pero ninguno podría sobrevivir durante mucho tiempo sin agua. Es un recurso básico para garantizar la vida de los seres vivos en el planeta. En Colombia, muchos habitantes tienen un acceso deficiente al agua potable dado el aislamiento geográfico al cual están expuestas algunas comunidades. En consecuencia, usan las fuentes de agua disponibles en su entorno, lo cual representa un riesgo para la salud porque los recursos hídricos que utilizan pueden estar contaminados. El crecimiento demográfico ha contribuido en la disminución de la calidad del recurso debido a los altos índices de uso del agua y al desconocimiento de los usuarios de la normativa de vertimiento de aguas residuales a los cuerpos de aguas superficiales (Pineda Blanco, 2022).

La política del sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia tiene una expresión muy concreta sobre la adecuada prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado, buscando que se garantice la calidad, cobertura y continuidad del acceso de agua potable, así como la adecuada disposición de las aguas residuales. En consecuencia, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - Corantioquia, dentro de su plan de acción 2020-2023 contribuye a la sostenibilidad del agua mediante el programa: “Agua para vida”, con el cual busca cofinanciar anualmente, en los 80 municipios de su jurisdicción (entre ellos Titiribí - Antioquia), infraestructura de saneamiento hídrico tales como colectores, plantas de tratamiento de aguas residuales e instalación de sistemas sépticos, con el fin de mitigar la contaminación vertida a los cuerpos de agua (Duque Guarín, 2021).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con la Resolución 631 de 2015 (normativa de vertimientos) reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984, con la cual se realiza el control de las sustancias contaminantes vertidas a los cuerpos de agua por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país. Además, las autoridades ambientales regionales establecen unos compromisos de calidad de la cuenca principal de su región, con el fin de preservar el recurso y reducir los conflictos por uso. Es imperativo mencionar que el artículo 43 del Decreto 3930 del 2010 evaluación ambiental del vertimiento, establece, la predicción a través de modelos de simulación de los impactos que cause el vertimiento en el cuerpo de agua receptor y/o al suelo, en función de su capacidad de asimilación

y dilución, así como de los usos del mismo. Por esta razón, se propone realizar la modelación hidrodinámica y de calidad mediante la herramienta de simulación IBER, a partir de información secundaria, para el efluente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR a la quebrada El Medio en el municipio de Titiribí – Antioquia, con el fin de determinar si la ubicación del vertimiento es óptima como punto de descarga de acuerdo con la capacidad de asimilación del cuerpo de agua.

Planteamiento del problema

La mayoría de los cuerpos de agua natural reciben los vertimientos de cargas contaminantes provenientes de las zonas urbanas y rurales de los municipios, representadas en los sólidos suspendidos totales y la materia orgánica, los altos valores de estos parámetros son considerados indicadores de la mala calidad del agua. La Constitución Política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado, “(...) planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución, debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental (...)”. Le corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y los demás usos permitidos, requiriendo aplicar los instrumentos que prevengan y controlen los vertimientos contaminantes. En consecuencia, se debe realizar seguimiento y control de los vertimientos de aguas residuales con el objetivo de mantener condiciones apropiadas en los ecosistemas acuáticos, evitar alteraciones sobre la calidad de vida de los habitantes de las zonas limítrofes al cuerpo de agua y afectaciones a las comunidades aguas abajo del vertimiento.

El constante deterioro ambiental que vienen sufriendo las fuentes hídricas debido a las dinámicas poblacionales, las malas prácticas y acciones en torno a las actividades económicas que se desarrollan en el territorio, han limitado gradualmente la calidad y por ende la disponibilidad del recurso.

Como alternativa para subsanar las problemáticas ambientales, Corantioquia establece dentro de sus políticas, la cofinanciación de proyectos de infraestructura que tengan como finalidad descontaminar las fuentes hídricas, bien sea mediante la instalación de sistemas sépticos individuales en las zonas rurales o la construcción de colectores y plantas de tratamiento de aguas residuales en las cabeceras municipales (Duque Guarín, 2021).

El municipio de Titiribí se localiza en la región del suroeste de Antioquia, tiene una extensión de 142 km², entre los cuales la cabecera municipal ocupa aproximadamente 3 km². A partir de la información reportada en el Censo Nacional de Población y Vivienda – CNPV 2018 del DANE tomando como base una población urbana de 4,591 habitantes y 1,649 unidades de viviendas, se obtiene una densidad poblacional de 2,78 habitantes/vivienda acorde a las dinámicas del municipio. Con base en lo anterior y teniendo una tasa crecimiento urbana del 1,57% presentada

en el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado del 2014, se proyecta una población aproximada de 4886 personas para el 2022 y de 7558 personas para el 2050; para el presente informe se toma el caudal del vertimiento para la población establecida en el año 2050.

Hoy en día el municipio de Titiribí cuenta con un sistema de alcantarillado con cobertura del servicio del 100% y con 2 plantas de tratamiento de aguas residuales. La PTAR Occidental tiene un 15% de cobertura con un caudal promedio de 1,10 l/s y descarga sus aguas a la quebrada El Medio; la PTAR Oriental con un 10% de cobertura con un caudal promedio de 0,80 l/s, descarga sus aguas a la quebrada Las Juntas; y el resto de cobertura vierte sus aguas directamente a las cuerpos de agua receptores, el vertimiento Central y el vertimiento la Bomboná con caudales promedio de 27,84 l/s y 0,32 l/s respectivamente, vierten en la quebrada San Antonio; y el vertimiento La Milagrosa descarga sus aguas a la quebrada El Medio (AASSA, 2018), en el **Anexo 1** se muestran los vertimientos puntuales que cuentan con alcantarillado. En ese orden de ideas, el incremento de la población y la creciente demanda del recurso hídrico, no solo para el consumo humano sino también para la producción agrícola, ha ocasionado una serie de problemáticas entorno a él, entre ellas su contaminación, que junto a la falta de infraestructura de saneamiento básico y sus deficiencias, indirectamente puede ocasionar la carencia y escasez del líquido vital.

Corantioquia presenta una priorización de veredas para la instalación de PTAR y sistemas sépticos de acuerdo con sus Objetivos De Calidad – ODC. Titiribí se encuentra entre los municipios a priorizar que cuentan con PTAR pero que no cumplen con los ODC (Duque Guarín, 2021). Al trazar el área aferente del sector a recolectar con la proyección de la PTAR Principal se obtiene que un 84% de área entregará las aguas al sistema de tratamiento, teniendo en cuentas las zonas de expansión paralela hacia el lote de la PTAR con un trazado vial desde el casco urbano sector El Hoyo ingresando por la Calle 22, el diseño de la vía de acceso es de aproximadamente 800 m. En la fase diagnóstico para la construcción de la PTAR se inspeccionaron siete cámaras de alcantarillado, se evaluaron 11 tramos teniendo en cuenta la información del PMAA del 2014, las redes son de tipo combinadas, en diámetro de 18 pulgadas, material PVC, de acuerdo con los resultados de la revisión de capacidad hidráulica, se presenta un tramo con insuficiencia (MHC1 – MHC2), debido a que la relación q/Q para aguas combinadas es mayor a 0.93 (1.15 adm). La conexión con la red de alcantarillado se realizará con un colector que direccionará las aguas residuales a la PTAR.

Por lo tanto, debido al crecimiento demográfico del municipio y los problemas de contaminación del recurso hídrico, se proyecta la construcción de una nueva PTAR capaz de recibir aproximadamente el 84% de las aguas residuales del municipio con un punto de descarga en un tramo de la quebrada El Medio como se muestra en la **Figura 1**. En consecuencia, se hace necesario implementar un modelo de simulación que evalúe los impactos que pueda causar el vertimiento en el cuerpo de agua receptor, en función de su capacidad de asimilación, el cual podría servir de base para la toma de decisiones, planificación y gestión del recurso hídrico.

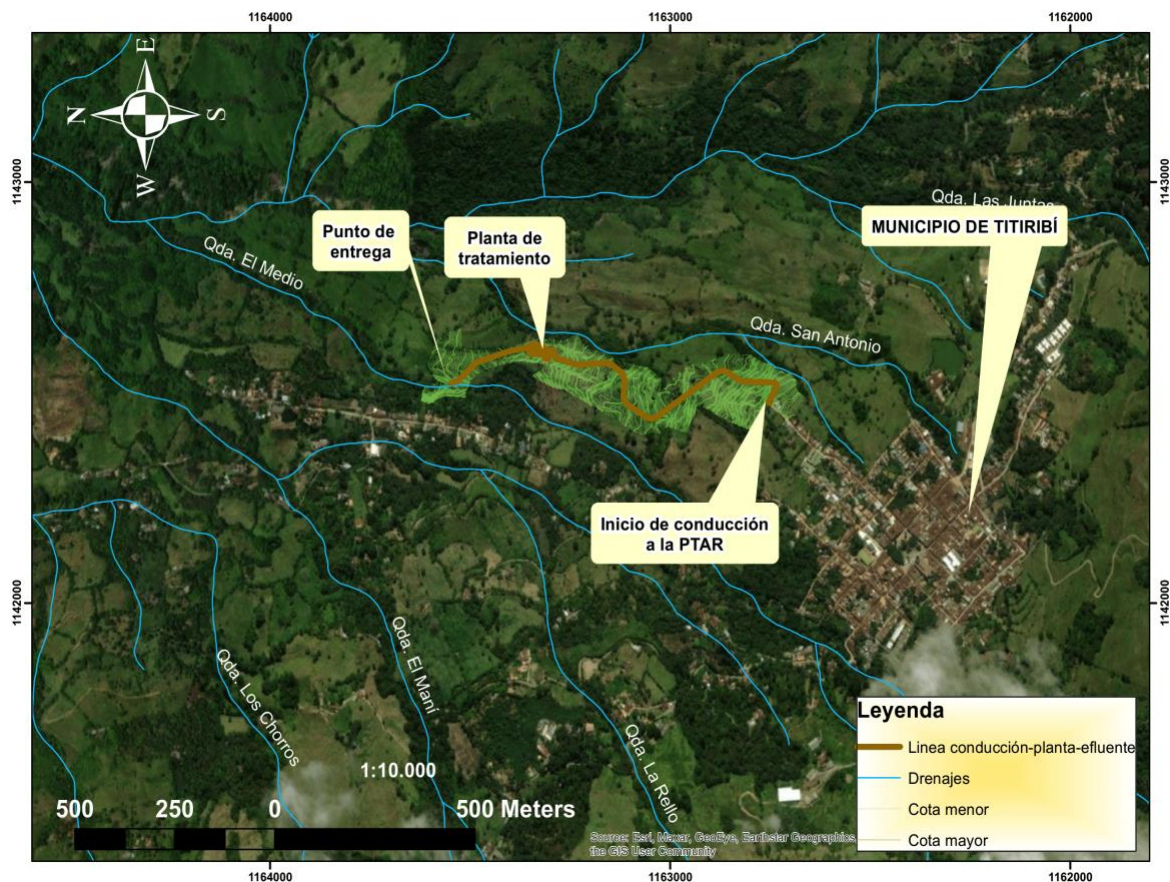


Figura 1. Proyección de la ubicación de la nueva PTAR del municipio de Titiribí - Antioquia con un punto de descarga en la quebrada El Medio.

Justificación

La contaminación de los cuerpos de agua superficial debido a los vertimientos de agua residual doméstica es una problemática ambiental que se va incrementando con el aumento de la población, ocasionando de esta manera afectación en la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. Los vertimientos de agua residual doméstica aportan altas concentraciones de materia orgánica, sólidos, grasas - aceites y microorganismos, que a pesar de ser tratados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR aun cumpliendo con los valores máximos permisibles dispuestos en la resolución 0631 de 2015, presentan una carga contaminante que podría no ser asimilada ¹ por el cuerpo de agua receptor, debido al caudal, condiciones climáticas, cantidad de vertimientos realizados a la misma fuente, entre otros factores (Rubio Giraldo et al., 2017).

Debido a la alteración constante de los cuerpos de agua, es apremiante detener el deterioro de la calidad de los mismos, por eso es importante realizar un análisis sobre el efecto que realiza el accionar de un vertimiento, además de evaluar la seguridad hídrica entorno a la calidad y el grado de detrimento de los recursos hídricos, mediante el uso de algoritmos de cálculo, con los cuales se logre esbozar las dimensiones que están asociadas al problema del agua, ayudando a mejorar las medidas de control de la contaminación y conservación de los ecosistemas hídricos. El alcance de este estudio estará definido por la sección longitudinal del cauce en un tramo de la quebrada El Medio del municipio de Titiribí - Antioquia, que va a presentar un vertimiento puntual, para posteriormente analizar su grado de asimilación con respecto a los parámetros modelados.

A través del uso del software IBER se pretende predecir la dilución, transporte, circulación y dinámica del cuerpo de agua. Por medio de esa herramienta se evalúa la dispersión de contaminantes con una aproximación o acercamiento a la realidad. Si la calidad de la información está a la altura de los requerimientos del modelo y se realizan las operaciones de calibración y validación de manera adecuada, los resultados de la simulación pueden ser un insumo indispensable para la toma de decisiones antes de iniciar cualquier proyecto obra o actividad, además de establecer y experimentar el comportamiento y el grado de afectación de las condiciones naturales del medio alterado y con ello analizar qué tan apropiado puede ser el punto de descarga del efluente.

1. El numeral 10 del artículo 2.2.3.3.1.3 del decreto 1076 del 2015 define la capacidad de asimilación como la capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias o formas de energía, a través de procesos físicos, químicos y biológicos.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la capacidad de asimilación por acción de un vertimiento en un tramo de la quebrada El Medio en el municipio de Titiribí – Antioquia, mediante un modelo hidrodinámico y de calidad en el software IBER

Objetivos específicos

Recopilar información secundaria de parámetros topográficos, hidrológicos y fisicoquímicos de la zona de estudio como base de entrada para el modelo hidrodinámico y de calidad del agua.

Implementar un modelo hidrodinámico y de calidad del agua que simule el comportamiento de la quebrada El Medio.

Analizar los posibles escenarios de contaminación y la capacidad de asimilación por la descarga de un vertimiento en la quebrada El Medio, en función de las concentraciones de los constituyentes de la calidad del agua.

Marco teórico

Colombia es un país con gran riqueza hídrica, impactada considerablemente por la intervención antrópica. En la actualidad existen centros poblados que aún no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, por consiguiente los sistemas de alcantarillado descargan a los cuerpos de agua natural aportando una carga contaminante importante, adicionalmente, los municipios que cuentan con una PTAR, no ven la importancia de indagar si el cauce receptor es capaz de asimilar el vertimiento aun cumpliendo con lo descrito en la normativa; lo cual puede impactar alterando las condiciones naturales de calidad de los cuerpos de agua, ya sea de forma química, física, microbiológica e hidrobiológica, adicionalmente en ocasiones las fuentes de agua donde se realizan los vertimientos son las mismas empleadas aguas abajo para la producción de agua para el consumo humano.

Una de las herramientas más usadas para evaluar la calidad del recurso hídrico son los modelos matemáticos. Los modelos de calidad del agua de los ríos buscan describir los cambios espaciales y temporales de los constituyentes de interés. A través de los años, los modelos se han actualizado incorporando gradualmente parámetros siguiendo la evolución de los problemas de la calidad del agua. La elección del modelo depende de muchos factores diferentes, como los objetivos del análisis o la disponibilidad de datos y tiempo. Entre los objetivos se suelen distinguir dos grandes categorías: comprensión/investigación y gestión/práctica (Rauch et al., 1998). Los modelos hidráulicos y de calidad del agua son herramientas que ayudan a representar escenarios con el fin de contar con supuestos para la toma de decisiones.

La simulación es la técnica disponible más económica, práctica y fácil para analizar el comportamiento de un sistema. Con la simulación se logra: entender la relación causa-efecto en el mundo real, generar una serie de hipótesis relacionadas con la información, simplificar el problema para hacerlo más entendible, realizar una serie de simulaciones bajo diferentes condiciones con el propósito de verificar que los supuestos y simplificaciones sean válidos, analizar los resultados para sacar conclusiones. La simulación de la calidad del agua involucra el planteamiento y solución de un centenar de ecuaciones diferenciales parciales no lineales que no tienen solución analítica por lo que se requiere utilizar métodos numéricos para resolverlas. Los algoritmos que poseen los programas de computador realizan esta tarea utilizando un lenguaje de programación (Sierra Ramírez, 2011).

Para el desarrollo de este trabajo se emplea el programa de simulación llamado IBER, un software de modelación numérica que cuenta con el módulo de hidrodinámica y calidad de agua, el primero desarrollado para el cálculo bidimensional de flujo en lámina libre poco profundas para ríos y estuarios con ecuaciones fundamentales de Saint Venant en 2D, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento y el segundo para calcular la evolución espacio-temporal de sustancias contaminantes (Escherichia Coli - E. Coli, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno carbonácea, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitratos-nitritos, temperatura, salinidad) mediante ecuaciones de transporte por convección-difusión 2D (Iber, 2015). IBER fue desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA (Universidade da Coruña), Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya, Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela) y Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria – CIMNE, además promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Jiménez Ramos, 2018).

La **Figura 2** muestra los datos de entrada que necesita IberWQ y su relación con los demás módulos del paquete IBER.

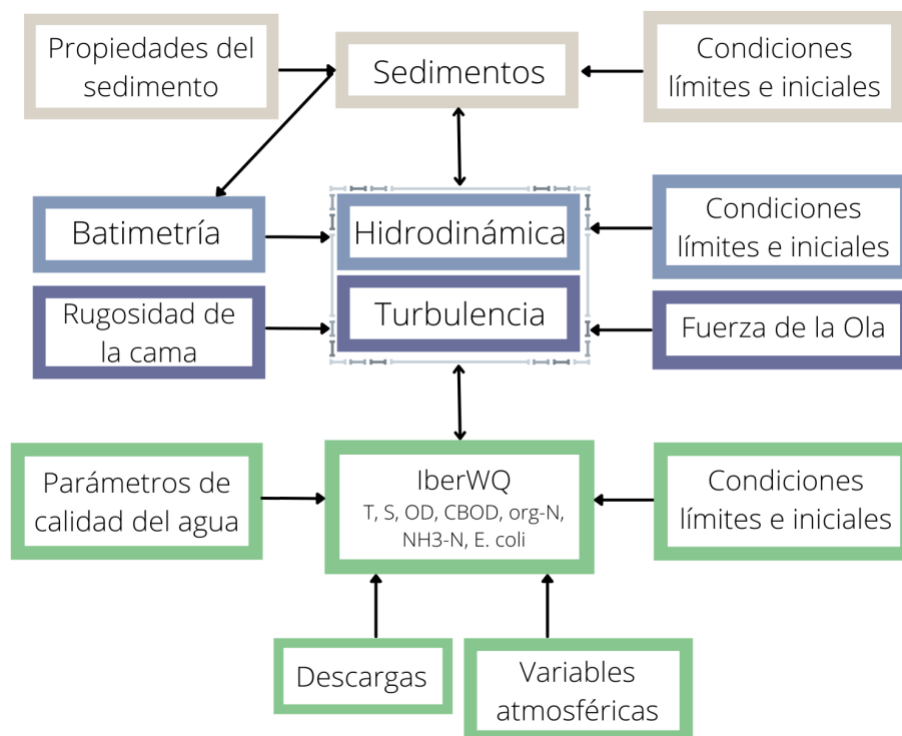


Figura 2. Integración del módulo IberWQ en el paquete de software Iber, y datos de entrada necesarios para ejecutar cada módulo (Cea et al., 2016).

En términos generales cuando se desea modelar la calidad del agua, entre las principales variables usadas para representar la hidrodinámica, el transporte y las condiciones de calidad de un cuerpo de agua se encuentran: la temperatura del agua, el campo de velocidad, el volumen o la profundidad, el flujo e intercambio de sustancias en la interfase sedimento-agua en el fondo del cuerpo de agua, los organismos patógenos (por lo general, mediante la modelación de coliformes totales y/o fecales como indicadores), el pH y la alcalinidad, las sustancias tóxicas, el oxígeno disuelto, la materia orgánica carbonácea, el ciclo biológico de las algas (suspendidas, flotantes y ligadas al fondo) y los nutrientes (ciclos del nitrógeno y fósforo, principalmente) (MADS, 2018).

IberWQ se basa en los resultados de la profundidad del agua, la velocidad promedio en profundidad y la viscosidad turbulenta del módulo hidrodinámico para resolver la ecuación de convección-difusión para cada especie. Incluye además las cinéticas de transformación química y bioquímica de los deferentes constituyentes. Dado que todos los módulos están integrados en la misma interfaz gráfica de Windows y comparten la misma malla de volumen finito no estructurada para resolver sus respectivas ecuaciones de transporte, el acoplamiento entre módulos se maneja automáticamente (Cea et al., 2016). La real aproximación de las profundidades y de los campos de velocidad dependen de la adecuada caracterización geométrica de secciones transversales y perfiles longitudinales, granulometrías y rugosidades. Si se pretende una aproximación bidimensional, más precisa se debe contar con la caracterización batimétrica. Si no se puede ofrecer una representación precisa, resulta más conveniente por optar por alternativas más simples, pero más cercanas conceptual y operativamente a la caracterización de los procesos.

Los estudios de calidad del agua permiten determinar los modelos de transporte y las transformaciones bioquímicas que están controlando la calidad. Por ejemplo, se puede determinar a partir de la descomposición de la materia orgánica, la reaireación o la demanda béntica, cuál es el proceso que está agotando el oxígeno disuelto en el agua. Asimismo, se puede establecer si las fuentes puntuales son más importantes o contaminantes que las distribuidas. En ese orden de ideas, determinar la carga permisible de un contaminante (Sierra Ramírez, 2011). En el software IBER los parámetros de calidad del agua que deben ser definidos como datos de entrada por el usuario, son las constantes de reacción - k_i y las velocidades de sedimentación - W_s , definidas en la **Figura 3**.

La estructura del módulo de calidad del agua y las reacciones bioquímicas entre las diferentes especies consideradas se muestran en la **Figura 3**, la mayor parte de la cinética de la

reacción depende de la temperatura y la salinidad del agua, que el modelo puede calcular o que el usuario puede introducir como datos de entrada. En el caso de que el campo de temperatura sea calculado por el modelo, el usuario debe introducir datos atmosféricos adicionales (series temporales de radiación solar y atmosférica neta, temperatura del aire, humedad relativa atmosférica y velocidad del viento). Las diferentes especies consideradas en el modelo pueden ser activadas o desactivadas de acuerdo con el problema específico que se está resolviendo. La única restricción es que las tres especies de nitrógeno deben resolverse siempre juntas. Se supone que la concentración de las especies que no se activan es nula excepto el oxígeno disuelto, que en caso de no calcularse se supone igual a su valor de saturación, y la temperatura del agua, que se fija en 20°C si su valor no está especificado por el usuario (Cea et al., 2016).

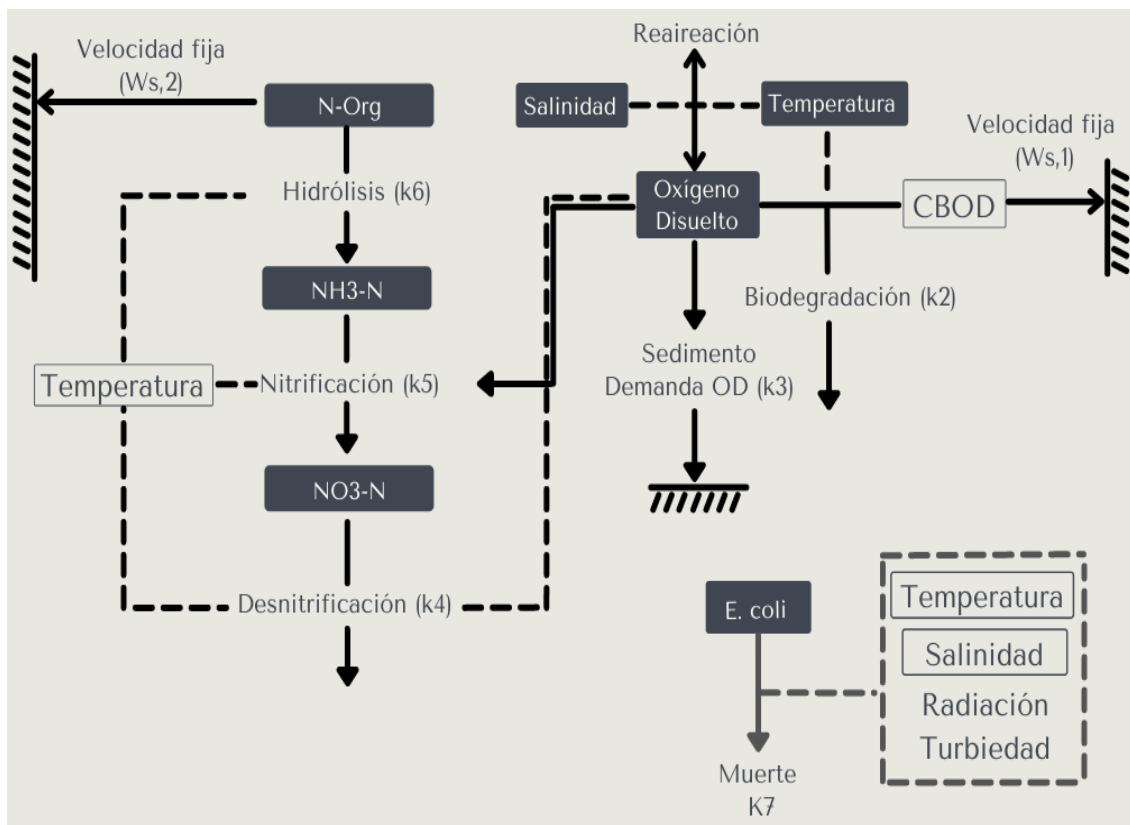


Figura 3. Estructura de IberWQ las variables dentro de las cajas negras son calculadas por el modelo. Las flechas continuas indican interacciones entre variables. Las líneas discontinuas indican dependencia de constantes cinéticas de reacción en las variables del modelo (Cea et al., 2016).

Las ecuaciones y correspondientes modelos de cálculo se describen en el manual de referencia hidráulico y el artículo de la herramienta de simulación numérica del flujo en ríos (Bladé et al, 2014), así como en el manual de referencia del módulo de calidad de aguas (Módulo de calidad del agua, 2016).

En Colombia se han realizado diversos estudios empleando modelos de simulación matemática con QUAL2K o IBER, cuya finalidad ha sido de determinar ya sea la calidad del medio o la influencia que tiene los vertimientos sobre los cuerpos de agua con características lóxicas y lénticas, esto indica que hay un creciente interés por modelos matemáticos, puesto que con estas herramientas computacionales se facilita el análisis. Entre las investigaciones se encuentran: “Programa de Saneamiento del Río Medellín, proyecto adelantado por EPM, utilizando el programa QUAL2K, estableció como meta Remover 160 ton/d de DBO5 para llevar el oxígeno disuelto en el río a mínimo 5 mg/L, bajo condiciones promedio, para el 2010” (Sierra Ramírez, 2011). “Análisis de riesgo por inundación frente a escenarios de cambio climático a partir de la modelación hidrodinámica y de calidad de agua en IBER - 2D de un tramo de la microcuenca quebrada Resaca - Palestina del barrio Duitama, Usme” donde se buscó establecer el grado de vulnerabilidad de las poblaciones que se encuentran cercanas al cuerpo de agua (Bolívar et al., 2019), y “modelación hidrodinámica y de calidad del agua en dos dimensiones del cuerpo hídrico léntico zona sur del humedal Capellanía, localidad de Fontibón, Bogotá D.C. Colombia con el software IBER”, con la cual los investigadores buscaron evaluar el grado de contaminación del cuerpo de agua de estudio (García y Ruiz, 2018).

Para la modelación del cuerpo de agua receptor el programa necesita que lo alimenten con una serie de información correspondiente a la topografía de la zona de estudio, caudales, caracterización fisicoquímica, condiciones internas, condiciones de contorno, condiciones de frontera, usos del suelo, todo esto correspondiente a información secundaria con la que cuenta el municipio de Titiribí - Antioquia.

El marco normativo colombiano que atañe el tema de vertimientos se muestra en la **Tabla 1.**

Tabla 1.. Normatividad colombiana referente al tema de vertimientos

Normatividad	Descripción
--------------	-------------

Decreto 1594 de 1984	Vertimientos/usos del agua. Derogado por el artículo 79. Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los artículos 20 y 21.
Decreto 901 de 1997	Se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de éstas.
Resolución 273 de 1997	Se fijan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos para los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).
Resolución 0372 de 1998	Se actualizan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos.
Resolución 1096 de 2000	Se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Modificado por: Res 668 de 2003, Res 1447 de 2005, Res 1459 de 2005, Resolución 2320 de 2009.
Decreto 3100 de 2003	Reglamentación sobre tasas retributivas. El Decreto 3440 de 2004 modifica algunos artículos del Decreto 3100 de 2003.
Resolución 1433 de 2004	Reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV. Modificado por: Res 2145 de 2005.
Resolución 2145 de 2005	Se modifica parcialmente la Resolución 1433 de 2004 sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV.
Resolución 2320 de 2009	Se modifica parcialmente la Resolución número 1096 de 2000 que adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS.
Decreto 3930 de 2010	Usos del agua, residuos líquidos y ordenamiento del territorio/vertimientos. Modificado por: Decreto 4728 de 2010
Resolución 1514 de 2012	Se adoptan los Términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión de Riesgo para el Manejo de Vertimientos – PGRMV.
Resolución 1207 de 2014	Se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
Resolución 631 de 2015	Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales a los sistemas de alcantarillado público.

Decreto 1076 de 2015	Se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
----------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Normatividad colombiana

En Colombia se tiene normatividad que regula las condiciones de entrega a los cuerpos de agua receptores y dichos parámetros se encuentran en la Resolución 0631 de 2015; los límites de esta norma establecen las condiciones de los parámetros de entrega del vertimiento a la quebrada, con el supuesto de que el tren de tratamiento cumpla con lo establecido en la normativa.

Metodología

La metodología que se propuso para el desarrollo del estudio contempla las siguientes cuatro fases: muestra y documentación, depuración de la información, modelación y análisis de resultados. En la **Figura 4** se exponen los pasos que se desarrollaron de la metodología.

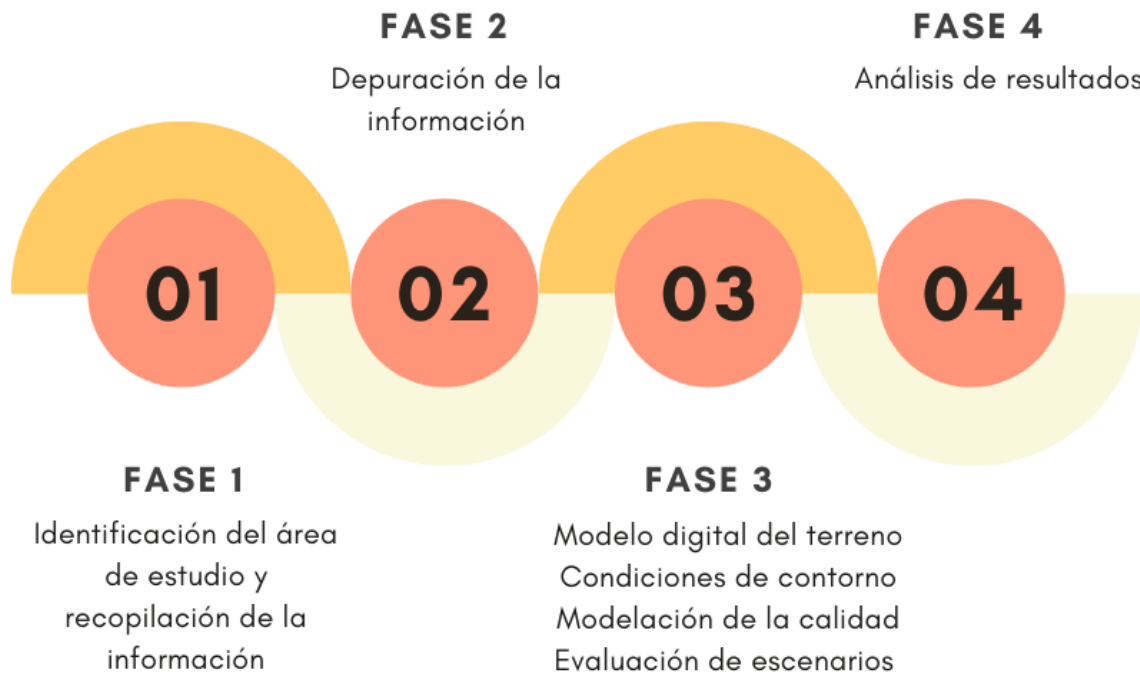


Figura 4. Desarrollo de la metodología.

Muestra y documentación

Para el presente estudio se toma como muestra un cuerpo de agua con características lóxicas, que se denomina quebrada El Medio y se encuentra en jurisdicción del municipio de Titiribí Antioquia; en dicha fuente hídrica se proyecta realizar el vertimiento proveniente de una planta de tratamiento que se planea construir.

Descripción de la Zona de Estudio:

El municipio de Titiribí se encuentra ubicado al Suroeste del departamento de Antioquia, posee varios sistemas de acueducto como son: Las Isazas, El Aljibe y La Milagrosa, este último es

operado por la empresa de servicios públicos Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. - A.A.S. S.A. La información general del municipio de Titiribí se extrae el PMAA y del esquema de ordenamiento territorial, la cabecera municipal se ubica a 1.550 m. s.n.m. El municipio de Titiribí pertenece a la cuenca hidrográfica del río Cauca, lo rodean la subcuenca de la quebrada Sinifaná y la subcuenca de la quebrada Amagá, se encuentra en una franja que se puede señalar como la transición entre el bosque húmedo premontano y el bosque húmedo montano bajo, que es una franja entre los 1.950 y 2.250 m.s.n.m.

El Municipio de Titiribí presenta una topografía quebrada, de acuerdo con su ubicación en el flanco occidental de la Cordillera Central, presenta geoformas variadas que generan un relieve montañoso y escarpado donde se pueden observar cuchillas alargadas, cerros aislados, laderas alargadas, zonas de pendientes bajas y depresiones. En la zona de estudio, predominan las pendientes mayores al 30% (HYDRA, 2003).

El acueducto municipal es administrado por A.A.S. S.A., cuenta con una planta de tratamiento, donde se realizan análisis físico-químicos, turbiedad, color, pH y alcalinidad, además se le adicionan dosificadores como Alumbre y Cloro; los procesos realizados son cloración, floculación y sedimentación, y cada tres meses se hacen estudios microbiológicos y físico-químicos. La cobertura del servicio es del 100% teniendo en cuenta el servicio que prestan los acueductos independientes conocidos como el Aljibe y Los Isaza (AASSA, 2018).

El acueducto municipal se abastece de las fuentes hídricas de las microcuencas de la quebrada La Zulia también conocida como Las Juntas y la quebrada El Retiro. Esta última compuesta por las quebradas Los Amayas, El Medio, El Retiro y Charco Hondo.

El municipio de Titiribí cuenta con sistema de alcantarillado y con 2 plantas de tratamiento de aguas residuales. La cobertura en el servicio de alcantarillado es del 100 %, y cuenta con la PTAR Oriental y la PTAR Occidental con un 10% y un 15% de Cobertura, respectivamente; el resto de cobertura vierte sus aguas directamente a los cuerpos de agua receptores en las quebradas El Medio y la San Antonio.

Como se observa en la **Figura 5** la mayor parte de las coberturas que se encuentran en el municipio de Titiribí corresponden a áreas agrícolas heterogéneas (mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales).

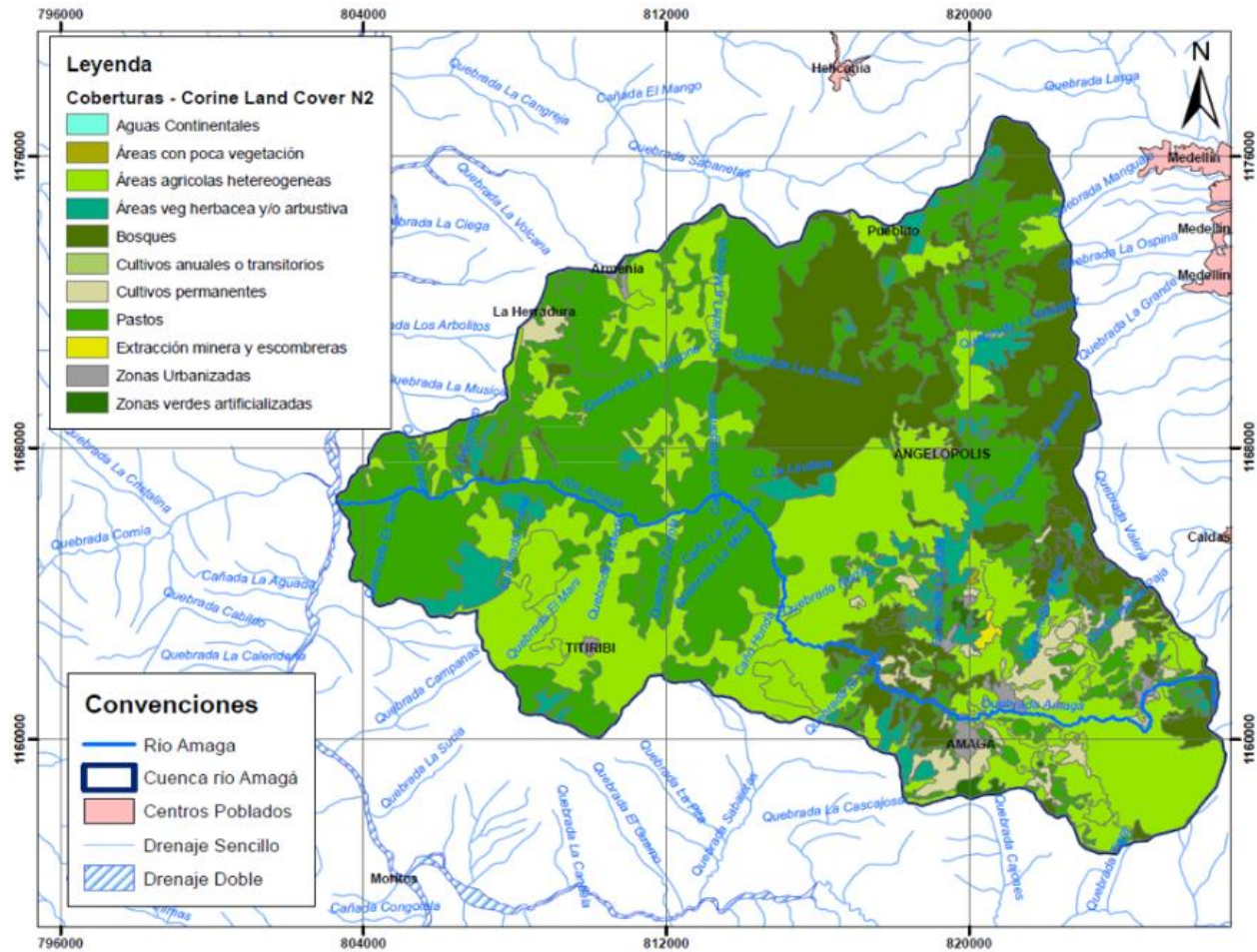


Figura 5. Mapa de coberturas de la cuenca del río Amagá tomado de: (Corantioquia, 2018b).

El tramo de la quebrada El Medio objeto de estudio cuenta con una extensión aproximada de 1.055 km, y comprende el trayecto desde aguas abajo de la cabecera municipal (Coordenadas 1142507.61E y 1163476.23N), hasta el punto de confluencia de las quebradas Las Juntas y El Medio (Coordenadas 1142906.73E y 1164311.32N). La quebrada el Medio a lo largo del tramo a modelar presenta una cobertura que corresponde áreas agrícolas heterogéneas (mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales), adicionalmente, y como resultado de la visita ocular se observa muy poca presencia de actividades de pastoreo, por lo que se desprecia el efecto de cargas contaminantes distribuidas sobre el cuerpo de agua, en consecuencia, solo se evalúa la carga puntual del vertimiento.

Recopilación de información:

Se realiza la identificación, revisión, organización y clasificación de información derivada de insumos e instrumentos de planificación, administración, evaluación y seguimiento del recurso hídrico existentes que incluían el cuerpo de agua objeto de estudio. Se solicitó información a la entidad regional Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - Corantioquia. Asimismo, se obtiene información a partir de salidas de campo realizadas a la zona de estudio, las caracterizaciones fisicoquímicas de estudios realizados por el municipio y del diagnóstico realizado por la Empresa Proyectos de Inversión Vial del Pacífico.

La información conseguida corresponde a la caracterización fisicoquímica del cuerpo de agua y de la red de alcantarillado que vierte actualmente a la quebrada San Antonio; también se tomaron datos del Plan de Saneamiento y Manejo del Vertimiento (PSMV) del municipio de Titiribí. Con respecto a la hidrología se toma el dato de caudal medido que se encuentra en el estudio de diagnóstico para la PTAR y finalmente las cualidades de la superficie de las zonas lindantes a la quebrada se obtienen a partir de una ortofoto y se asocian con los coeficientes de rugosidad con los que cuenta IBER dentro de su plataforma.

Depuración

Para poder abordar el modelo hidrodinámico y de calidad del agua se realiza un reconocimiento en campo del área de interés y con ello se logra evaluar el alcance longitudinal posible para efectuar el estudio y contrastar con la información que se tenía hasta el momento, para finalmente establecer si hay concordancia con las exigencias de información que requiere el modelo matemático empleado, entre los que se encuentran los parámetros fisicoquímicos medidos tanto en el cuerpo de agua receptor como en las aguas residuales, datos hidrológicos, las características de la cobertura que comprende la microcuenca de la zona de estudio y finalmente el coeficiente de rugosidad que represente las condiciones del cauce.

En conclusión, el modelo establece criterios de selección y recopilación de la información, así como el nivel de detalle de los datos topográficos donde se evidencia que la topografía con la que se contaba abarcaba una longitud poco extensa con la cual no se podría analizar los tiempos de transformación, en ese sentido se procedió extender la información topográfica mediante GPS y un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y seguidamente se realiza el procesamiento de la información

y limpieza de superficies que no eran de interés para posteriormente integrar los datos obtenidos con la información topográfica que ya se tenía; adicionalmente con la VANT se consigue una ortofoto para definir las coberturas más al detalle de la zona de estudio, importante para asignar los respectivos coeficientes de rugosidad a cada elemento de la malla que compone la superficie.

En cuanto a la calidad del agua, Corantioquia cuenta con estaciones de monitoreo en puntos definidos en su red Piragua para el monitoreo semestral de los cuerpos de agua que abastecen a los acueductos del municipio de Titiribí; teniendo en cuenta esto, se pensó en la posibilidad de extender la modelación hasta el nacimiento, pero debido a la gran cantidad de descargas de vertimientos no caracterizados, se imposibilita lo planteado. Corantioquia definió dos puntos de monitoreo en el marco de la etapa diagnóstico del PORH, uno aguas arriba del municipio en la quebrada Las Juntas cerca del punto de abastecimiento de agua potable y otro aguas abajo, en la confluencia de las quebradas El Medio, El Maní y el caño la Honda, ninguno de estos puntos se encuentra dentro del tramo a modelar, en consecuencia no proporcionan información que sirva de insumo para alimentar el modelo.

En consecuencia, la información que funge de insumo para la caracterización fisicoquímica del cuerpo de agua se extrae del estudio técnico del diagnóstico de la PTAR, la caracterización del vertimiento sin tratar de la red de alcantarillado se obtiene del PSMV del municipio de Titiribí y se incluyen valores adicionales medidos en campo (ver **Tabla 4**).

Modelación

En esta etapa se procedió a ingresar la geometría de la zona de estudio, la asignación de la rugosidad asociada a la superficie que se entró en el modelo, posteriormente se estableció el tiempo de simulación, el intervalo de los resultados, de igual forma en la parte hidrodinámica se asignó el caudal de entrada al sistema (cauce y vertimiento), condiciones iniciales y de contorno.

Para el módulo de calidad del agua se ingresan las condiciones de contorno e iniciales con los parámetros reportados en la **Tabla 4**, incluye temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, amoníaco, nitratos y nitrógeno orgánico junto con las constantes que intervienen en el módulo de calidad de agua y finalmente se establece la descarga con coordenadas planas entrando las concentraciones de los parámetros junto con el caudal en el tiempo donde se

presenta el vertimiento, en el tiempo de 300s garantizando que la masa del cuerpo de agua natural ya ha pasado por la zona donde se realiza la descarga.

Tabla 2. *Tiempo de simulación incluyendo el ingreso del vertimiento.*

Escenario	Tiempo de simulación (s)
Quebrada El Medio	0 - 10800
Vertimiento	300 - 10800

Resultados y análisis

Se presentan los resultados obtenidos en la modelación, referente a los dos escenarios simulados donde se analiza la correlación entre varios parámetros, observando la evolución y el comportamiento en diferentes puntos a lo largo de la quebrada, en un tiempo límite de simulación de aproximadamente 10800s, hidráulicamente la simulación se realiza en estado permanente.

Para la evaluación del vertimiento sobre la quebrada El Medio el escenario probablemente más crítico a ser simulado, corresponde al caudal que representa condiciones mínimas en el cuerpo de agua receptor, junto con la descarga sin el tratamiento de aguas residuales de la nueva PTAR que se pretende construir.

Resultados

Para la información de partida el programa pide definir la geometría del área de estudio, los datos topográficos se ingresan con el apoyo de una herramienta GIS para transformar la superficie en un formato que pueda ser leído por el modelo. La matriz de la **Figura 6** contiene un tamaño de píxel de 25 cm y la superficie varía su elevación sobre el nivel del mar (m.s.n.m) entre 1002 y 1242.

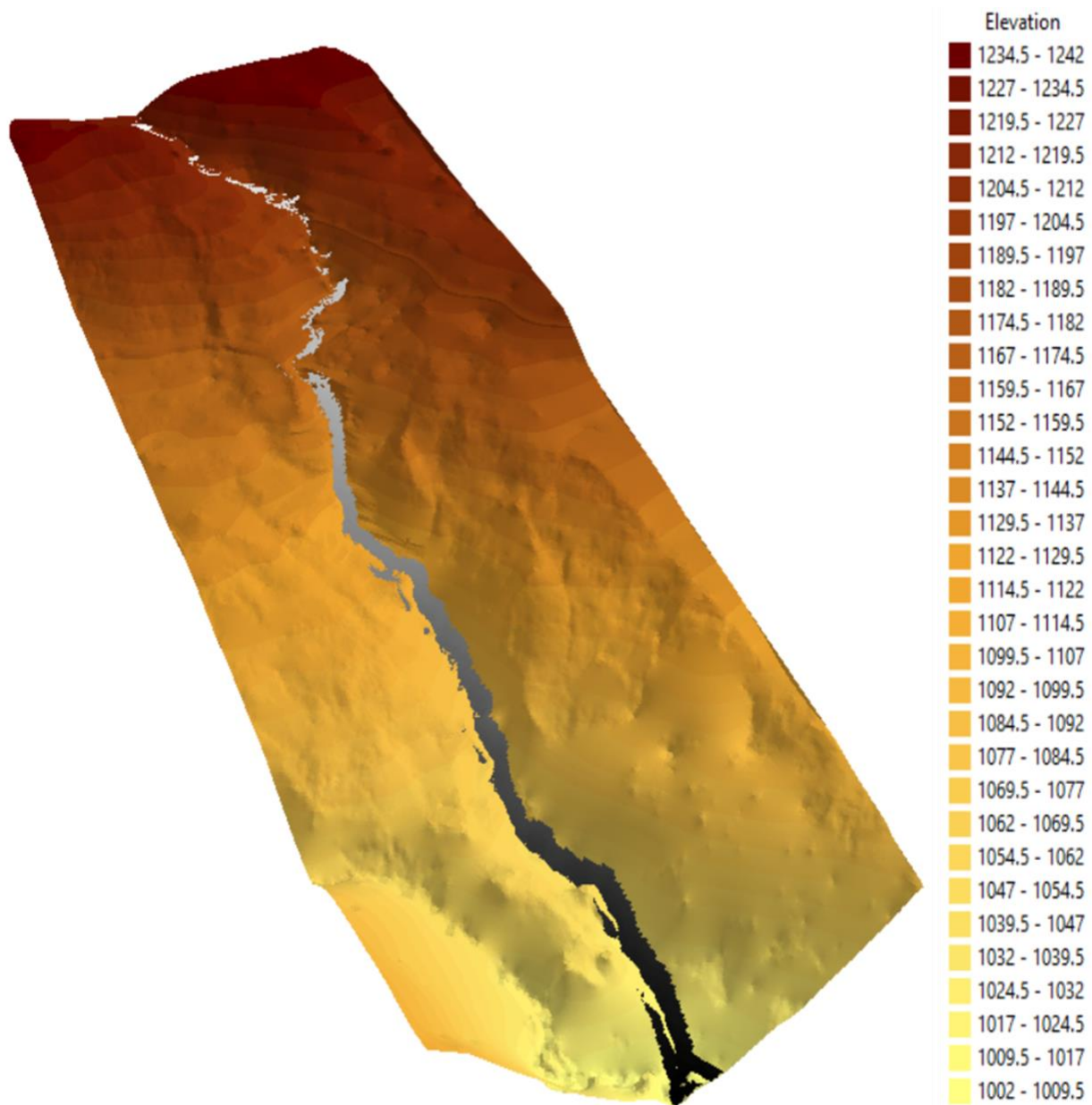


Figura 6. Topografía quebrada *El Medio*.

La rugosidad se asigna a cada elemento (malla) que compone la superficie, en tal sentido para las áreas limítrofes a la quebrada se efectúa una relación entre las características de cobertura propias de la zona en concordancia con el coeficiente, en lo que respecta al cuerpo de agua natural la magnitud asumida del coeficiente de Manning, se toma del libro “*Hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow*” donde establece valores para cursos naturales en montaña con características fondo en grava, cantos rodados y rocas (TE CHOW, 2005); en la **Figura 7** se indica la clasificación de la cobertura del suelo y su correspondencia con el coeficiente de Manning empleado.

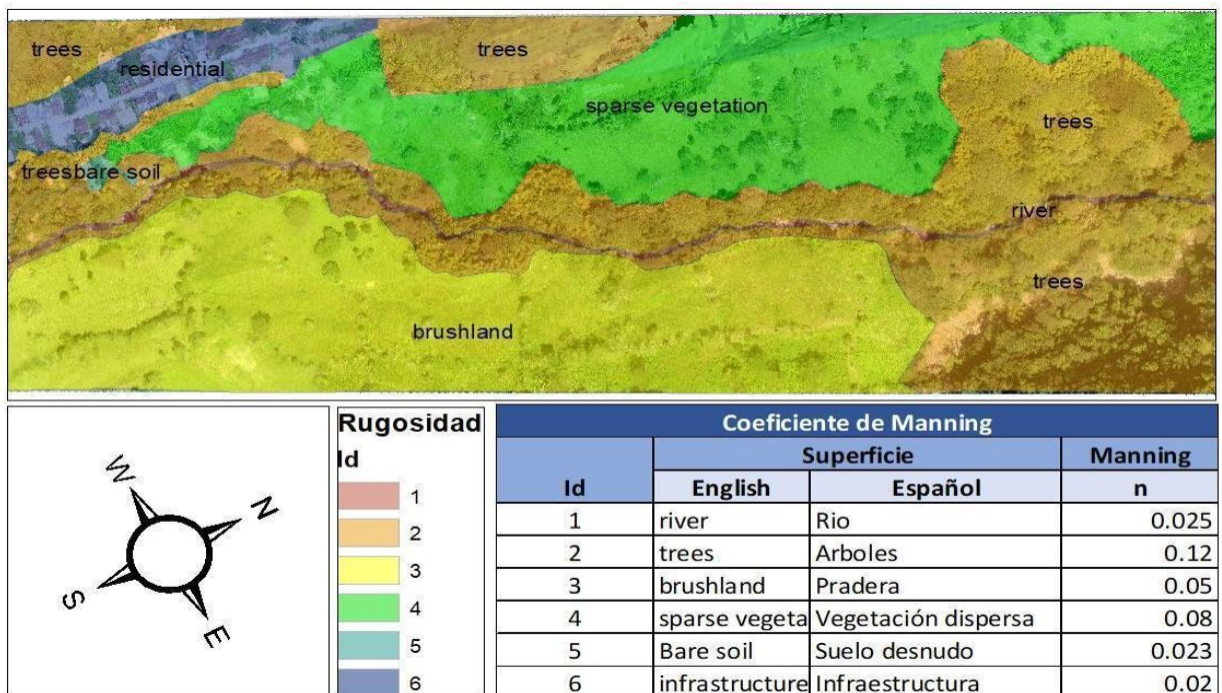


Figura 7. Asignación coeficiente de rugosidad de Manning (TE CHOW, 2005).

Los parámetros se tomaron tanto del plan de saneamiento y manejo del vertimiento del municipio de Titiribí (PSMV), como del documento técnico denominado “servicios de consultoría para evaluar, actualizar y complementar los diseños existentes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR Principal) para el municipio de Titiribí, incluyendo vía de acceso, línea del interceptor desde el vertimiento actual, hasta y desde la PTAR al nuevo punto descarga en la fuente hídrica más cercana correspondiente al proyecto autopista conexión pacifico 1”.

La información que se incluye para ingresar al modelo cuenta con fecha inicial y final del muestreo, variables fisicoquímicas y microbiológicas medidas, escala temporal del registro,

coordenadas georreferenciadas del sitio de muestreo y entidad o persona encargada de la toma de la muestra y del análisis de laboratorio.

Los parámetros empleados para alimentar el modelo matemático en la versión del programa a simular son: Temperatura, Caudal, Nitratos, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno Orgánico y DBOC.

A partir de los resultados de monitoreos se tiene Nitrógeno Total Kjeldahl que representa la suma del nitrógeno amoniacal y el $N_{orgánico}$, por lo tanto, conociendo el nitrógeno amoniacal se estima el valor del nitrógeno orgánico. Adicionalmente, se tiene la DBO_5 la cual representa la demanda bioquímica carbonosa de oxígeno - DBOC.

La degradación de la materia orgánica carbonosa en una masa de agua, en la que inicialmente se tiene un valor $DBOC_0$, disminuye a razón de la siguiente expresión desarrollada por Williams en 1951:

$$DBOC_t = DBOC_0 (1 - e^{-kt})$$

Donde,

$DBOC_t$: demanda bioquímica carbonosa de oxígeno en el tiempo

$DBOC_0$: demanda bioquímica carbonosa de oxígeno inicial en el tiempo cero

k : constante cinética del proceso

La ecuación sale de representar la degradación de la materia orgánica (expresada como DBO) como una cinética de primer orden, y se remonta a principios del siglo XX. Cuando no se dispone de medidas precisas en aguas superficiales y residuales se puede estimar el valor de la $DBOC_0$ mediante el producto de la concentración por una constante $k * DBOC$, donde k toma un valor aproximado de $0.23d^{-1}$. Dicho valor se encuentra dentro del rango de las constantes cinéticas calibradas para la quebrada El Medio en el PSMV del 2018, adicionalmente la ecuación de método directo del estudio “Estimación de constantes de desoxigenación carbonácea en el Río Teusacá, por Natalia Sánchez Cárdenas” establece que la K_1 varía hasta $0.316d^{-1}$ ($20^{\circ}C$) (Sánchez, 2015), ver **Tabla 3**.

Tabla 3. Constantes cinéticas implementadas en IBER vs las calibradas en Q2Kw en el PSMV del 2018.

Constantes cinéticas	Abreviación	Unidades	Constantes cinéticas calibradas Q2Kw (PSMV, 2018)	Constantes cinéticas implementadas en IBER
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	l/d	0 - 0,5	0,23
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	l/d	0 - 5	-
Tasa de Amonificación	Tasa de Amonificación	l/d	-	0,2
Tasa de nitrificación	Tasa Nitrificación	l/d	0 - 10	0,5
Tasa de desnitrificación de nitratos.	Tasa Desnitrificación	l/d	0 - 2	0,05

Los datos del PSMV del 2018 son tomados de (AASSA, 2018).

El modelo pide ingresar las concentraciones tanto del cuerpo de agua natural como de la descarga del vertimiento en unidades de kg/m^3 , por esa razón, la **Tabla 4** tiene las celdas donde se indica la conversión de la concentración, tanto del vertimiento sin tratamiento como de la descarga con tratamiento que corresponde a los límites establecidos en la resolución 0631 de 2015 con una carga menor o igual 625,00 kg/día de DBO₅.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados para alimentar el modelo.

Parámetro	Concentraciones			Unidad	Kg/m ³		
	AR sin tratamiento	Q. El Medio	Res. 0631 de 2015		AR sin tratamiento	Q. El Medio	Res. 0631 de 2015
Caudal	0,01331**	0,24579**	-	m ³ /s	-	-	-
Temperatura	21,2**	20,8***	-	°C	-	-	-
OD	2,08**	7,25*	-	mg/l O ₂	0,00208	0,00725	-

DBO soluble	151**	-		mg/l O ₂	0,151	-	-
DBO total	323**	2,5*	90	mg/l O ₂	0,323	0,0025	0,09
DBO última	471,58	3,65	131,4	mg/l O ₂	0,47158	0,0036 5	0,1314
Nitratos	0,07**	0,08*		mg/l NO ₃ -N	0,00007	0,0000 8	-
Nitrógeno amoniaco	17,5**	5*		mg/l NH ₃ -N	0,0175	0,005	-
Nitrógeno Total Kjeldahl	34**	5*		mg/l N	0,034	0,005	-
Nitrógeno orgánico	16,5	0			0,0165	0	-
Coliformes totales	27200000* *	-	-	NMP/10 0ml	-	-	-
E. Coli	2100000**	2420*	-	NMP/10 0ml	-	-	-

Nota: los datos de la tabla que se encuentran con (*) corresponde a información tomada de estudio técnico, los que están con (**) son datos tomados del Plan de Saneamiento y Manejo del Vertimiento (PSMV) y finalmente (***) pertenece a datos tomados en campo.

En el documento fase diagnóstico de la formulación del PORH del río Amagá se estiman los caudales medios y máximos anuales de la cuenca usando el modelo GR4J, el modelo utiliza los datos de precipitación de la cuenca, además, como no se cuenta con serie de caudales observados diarios, se considera la PCH de propiedad de Celsia S.A con coordenadas X: 814.942; Y: 1.131.638 ubicada sobre el río Piedras como punto de medición de caudal mensual, con área aferente de 73,2 km² y adicionalmente se toma la información de la estación el Rodadero en la cuenca de la quebrada Sinifaná, la estación El rodadero presenta un área aferente de 183,21 km², con coordenadas X: 809.268 Y: 1.155.537. Con la calibración de estas dos corrientes se obtienen los parámetros óptimos para estimar el caudal de los cuerpos de agua principales en toda la cuenca. Luego, se corroboran los resultados del modelo con los valores de los aforos medidos en campo, en la siguiente tabla se observa los resultados representativos de la cuenca de interés, que incluyen; la

ubicación geográfica de los puntos de calibración (MP13 y MP15), caudales mínimos, medios y máximos (Corantioquia, 2018b).

Tabla 5. Caudales medios, mínimos y máximos representativos en la cuenca de interés.

Id PM	Corriente	Altitud	Latitud	Longitud	Oferta hídrica total		
					Media (m ³ /s)	Oferta seco (m ³ /s)	Oferta Húmeda (m ³ /s)
PM13	Q. Las Juntas	843	6,09	-75,78	0,41	0,03	2,36
PM15	Q. Las Juntas	1000	6,05	-75,79	0,04	0,00	0,24

Tomado de (Corantioquia, 2018b)

Para implementar la modelación en Iber se mide el caudal a partir de un aforo realizado en campo con un valor de 245 l/s, dicho valor se contrasta tanto con los datos resultado de la modelación en el PORH y reportados en la **Tabla 5** como con el estudio hidrológico del PMAA del municipio de Titiribí en el cual se presenta el caudal medio de la quebrada El Medio, así como los caudales mínimos para cada periodo de retorno (ver **Tabla 6**) (HYDRA, 2003). Lo anterior es una aproximación rudimentaria al régimen de caudales, se requiere mejorar la variabilidad de flujos estableciendo sistemas de monitoreo de niveles y aforos regulares. Para ambos casos la magnitud medida en campo se encuentra en un valor intermedio entre el caudal mínimo y el caudal medio, se podría considerar como una condición o un episodio crítico con respecto al comportamiento del flujo volumétrico en el cuerpo de agua.

Tabla 6. Caudales medios y mínimos para la quebrada El Medio.

Caudal medio Ns	Caudal mínimo (l/s)				
	Tr5	Tr10	Tr15	Tr25	Tr50
600,29	179,42	160,7	152,8	142,9	132,46

Tomado de (HYDRA, 2003)

El programa también analiza el parámetro microbiológico de coliformes fecales, pero no se pudo analizar puesto que a partir del monitoreo se reporta en unidades de número más probable (NMP) y el programa necesita que se ingrese en unidades formadoras de colonias (UFC). Y no existe una fórmula teórica o empírica que permita el cambio entre estas unidades. En la literatura se encuentran dos casos de estudio que permiten la conversión de unidades de NMP/100ml a UFC/100ml a través de modelos estadísticos:

En la cuenca de Yeongsan se analiza comúnmente la medición de las bacterias indicadoras fecales (FIB) como un parámetro para estimar la calidad del agua en ambientes acuáticos, por lo tanto, se realiza un intento de comparar los métodos UFC y NMP y desarrollar un modelo estadístico que permita realizar la conversión entre estas dos unidades, como resultado del estudio se muestra una conversión entre unidades de UFC y NMP con un factor de error aceptable (Kyung Hwa et al., 2010).

En el otro caso de estudio se construye un modelo probabilístico que proporciona una explicación teórica clara de la variabilidad y la discrepancia entre las mediciones de NMP/100ml y UFC/100ml, demuestra cómo se pueden utilizar modelos probabilísticos para comparar muestras de diferentes procedimientos analíticos y determinar si son probables las transiciones de un procedimiento a otro con un buen ajuste, lo suficiente para implementarse en la toma de decisiones de gestión basadas en la calidad (Gronewold, 2008).

Los métodos estadísticos antes mencionados presentan una correlación que permite realizar una conversión razonable de unidades de UFC/100ml a NMP/100ml y viceversa, en un instante de tiempo puntual, sin embargo, dicha información sólo es representativa para los cuerpos de agua objeto de estudio en los informes, en consecuencia no se puede utilizar ninguna de estas correlaciones para realizar la conversión de las unidades de NMP/100ml a UFC/100ml en la quebrada El Medio y en ese orden de ideas para ingresar al IBER.

A continuación, se indican las coordenadas donde ocurre la descarga o vertimiento, se ingresaron con el sistema de referencia “MAGNA-Colombia Oeste EPSG 3115”, mediante la cual fue levantada la información topográfica en el cauce.

Tabla 7. *Coordenadas del vertimiento.*

Coordenadas del vertimiento					
Origen Oeste			Origen Nacional		
X	Y	Z	X	Y	Z
(ESTE)	(NORTE)	(m.s.n.m)	(ESTE)	(NORTE)	(m.s.n.m)
1142515.54	1163552.92	1200	2229924.01	4.691.255.602	1209

A lo largo del cauce se establecen unas zonas para analizar el comportamiento de los parámetros simulados para los dos eventos, las coordenadas de los puntos se indican en la **Tabla 8** y se aprecian en la **Figura 8**; en la evolución del punto se compara cada parámetro con respecto al tiempo.

Tabla 8. *Coordenadas de los puntos de análisis.*

Coordenadas puntos de análisis					
Id Punto	X (ESTE)	Y (NORTE)	Z (m.s.n.m)	Distancia con respecto al punto de vertimiento (m)	Distancia con respecto al primer punto de análisis (m)
PA	1142510	1163527	1215	27,84 *	0
1	1142518	1163559	1209	6,5	34,34
2	1142520	1163573	1207	21,5	49,34
3	1142513	1163599	1201	49,5	77,34
4	1142508	1163645	1196	97,8	125,64
5	1142601	1163759	1171	266,3	294,14
6	1142748	1163966	1116	539,8	567,64
7	1142788	1164073	1078	661,8	689,64
8	1142821	1164113	1064	716,3	744,14
9	1142851	1164236	1029	849,6	877,44
10	1142889	1164305	1010	943,7	971,54

Nota: los datos de la tabla que se encuentran con (*) corresponden a la distancia desde el punto de análisis hasta el vertimiento.

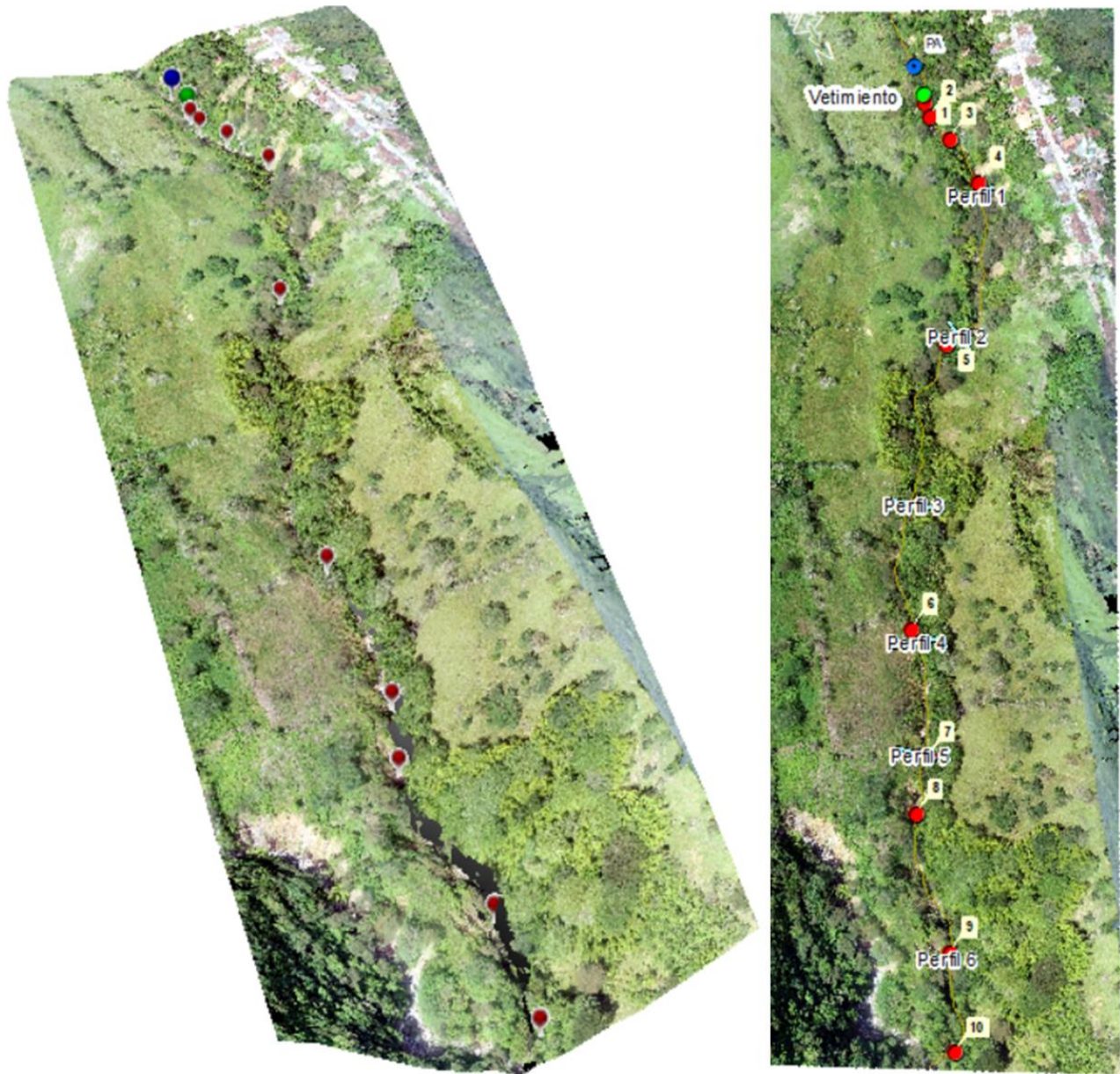


Figura 8. Especialización de los puntos de análisis (evolución del punto) y los perfiles.

La salida del postproceso da un resultado multitemporal sobre comportamiento de cada parámetro analizado a lo largo del cuerpo de agua, como se muestra a continuación:



Figura 9. Resultado multitemporal del parámetro DBOC.

A continuación, se presentan secciones transversales del cuerpo de agua estudiado junto con su respectiva la altura de lámina de agua para el tiempo de 10800 segundos.

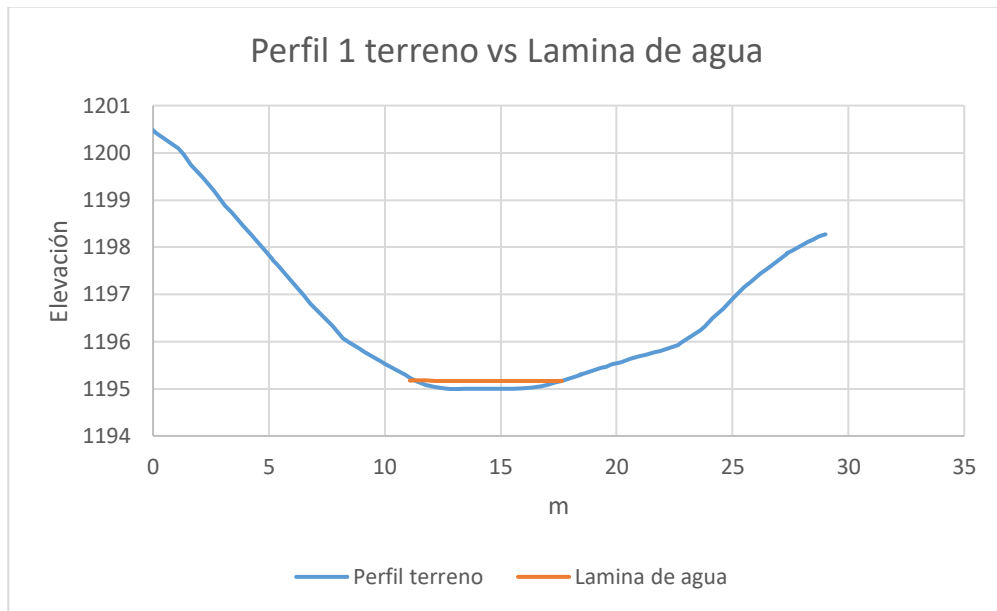


Figura 10. Perfil 1 sección transversal del cuerpo de agua.

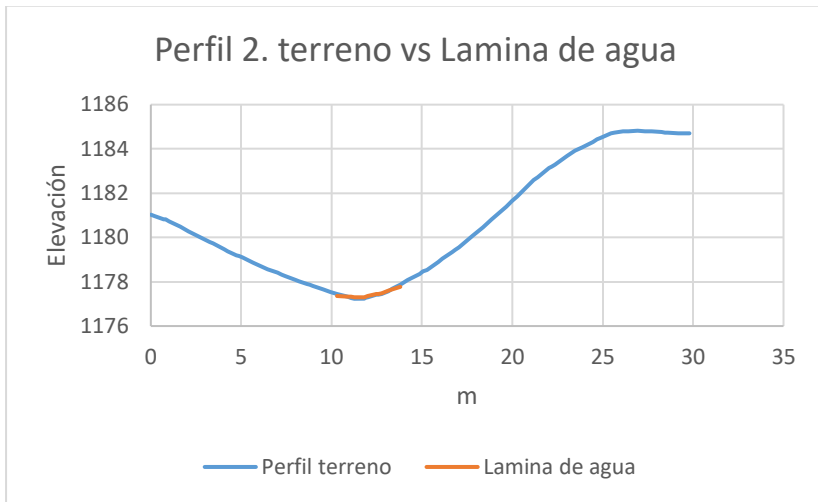


Figura 11. Perfil 2 sección transversal del cuerpo de agua.

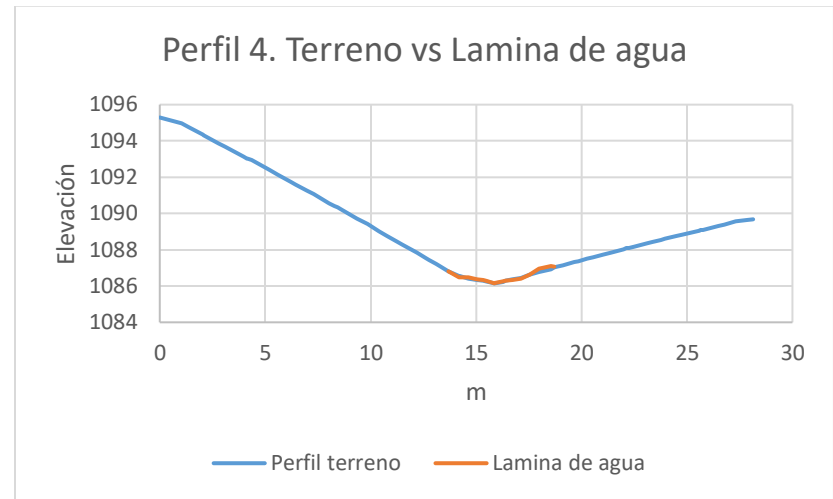


Figura 13. Perfil 4 sección transversal del cuerpo de agua.

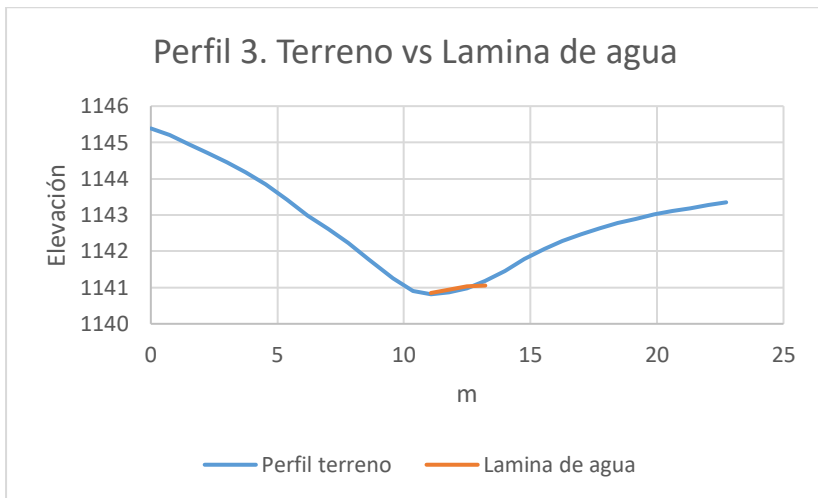


Figura 12. Perfil 3 sección transversal del cuerpo de agua.

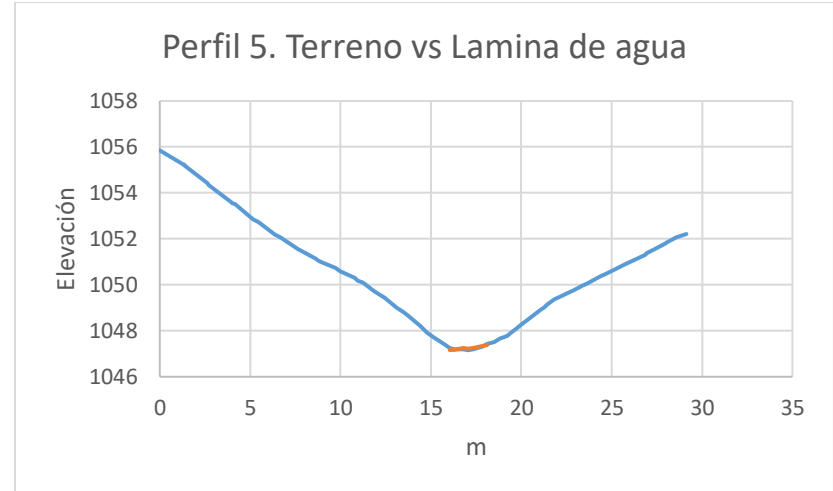


Figura 14. Perfil 5 sección transversal del cuerpo de agua.

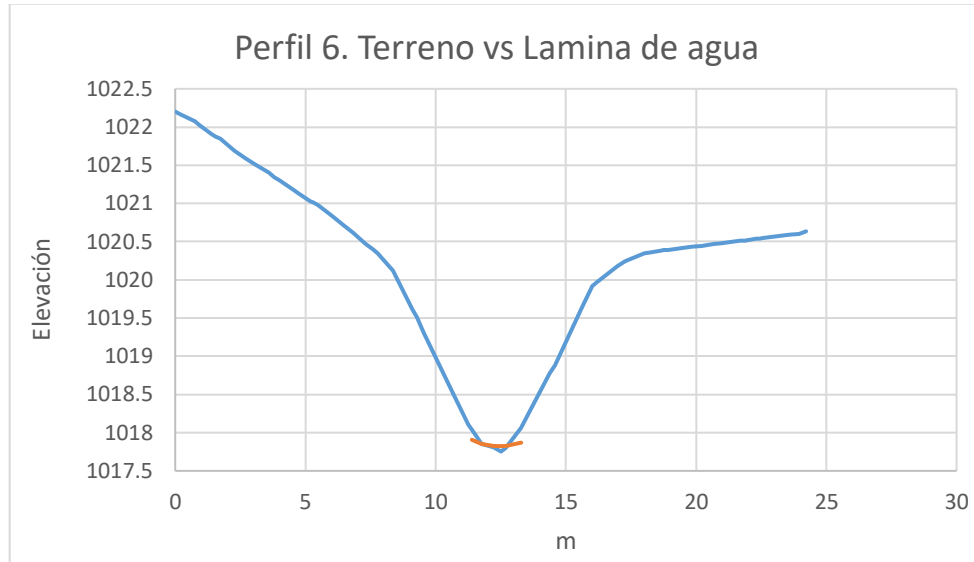


Figura 15. Perfil 6 sección transversal del cuerpo de agua.

Simulación Escenario 1

El escenario crítico a ser simulado corresponde al caudal que represente condiciones mínimas sobre el cuerpo receptor, lo que implica evaluar el efecto que presenta el vertimiento sin el tratamiento de aguas residuales de la nueva PTAR que se pretende construir.

Se realiza una simulación inicial del vertimiento sin tratar con un tiempo máximo de simulación de 10800 segundos, los estímulos al modelo son estacionarios, por lo tanto, las variaciones que se dan en el tiempo se presumen efectos de "calentamiento" del modelo. Los perfiles longitudinales se construyen teniendo en cuenta la distancia con respecto al primer punto de análisis (m) reportado en la **Tabla 8**; a continuación, se presentan los resultados de los parámetros de calidad.

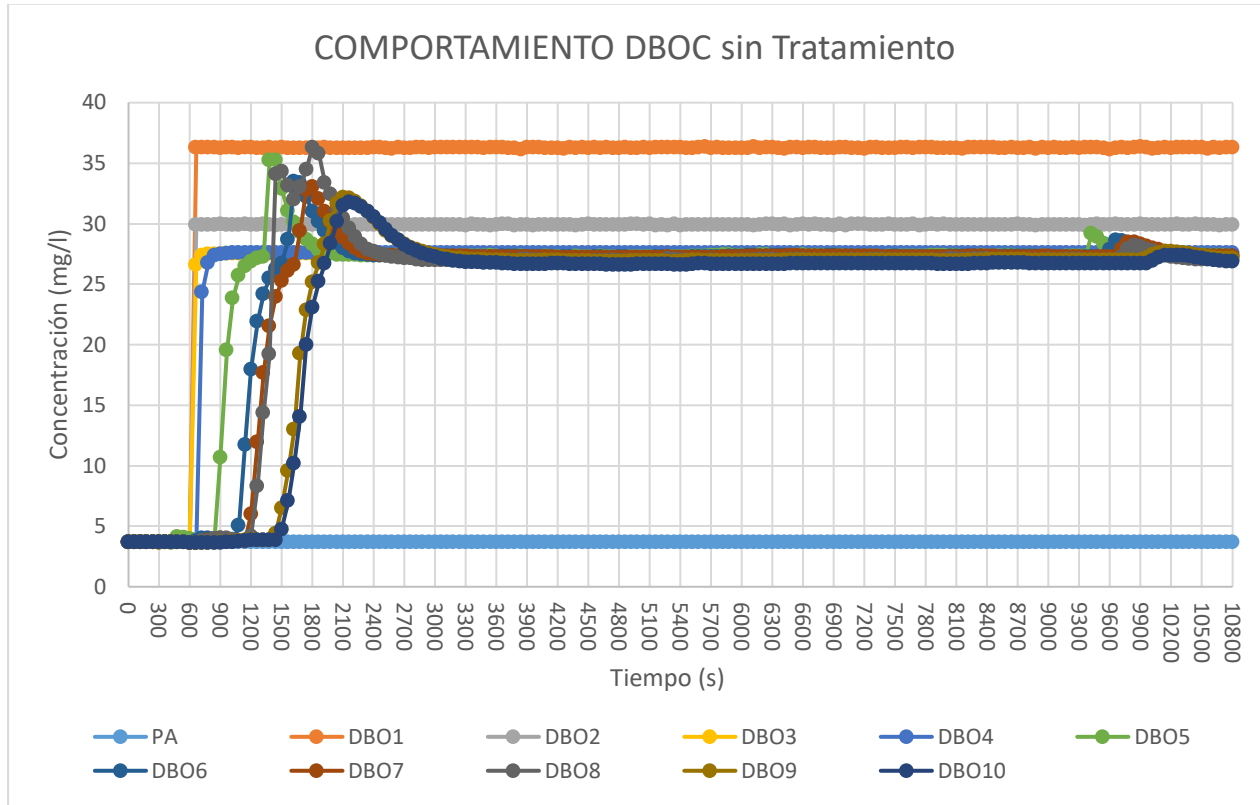


Figura 16. Comportamiento de la DBOC sin tratamiento

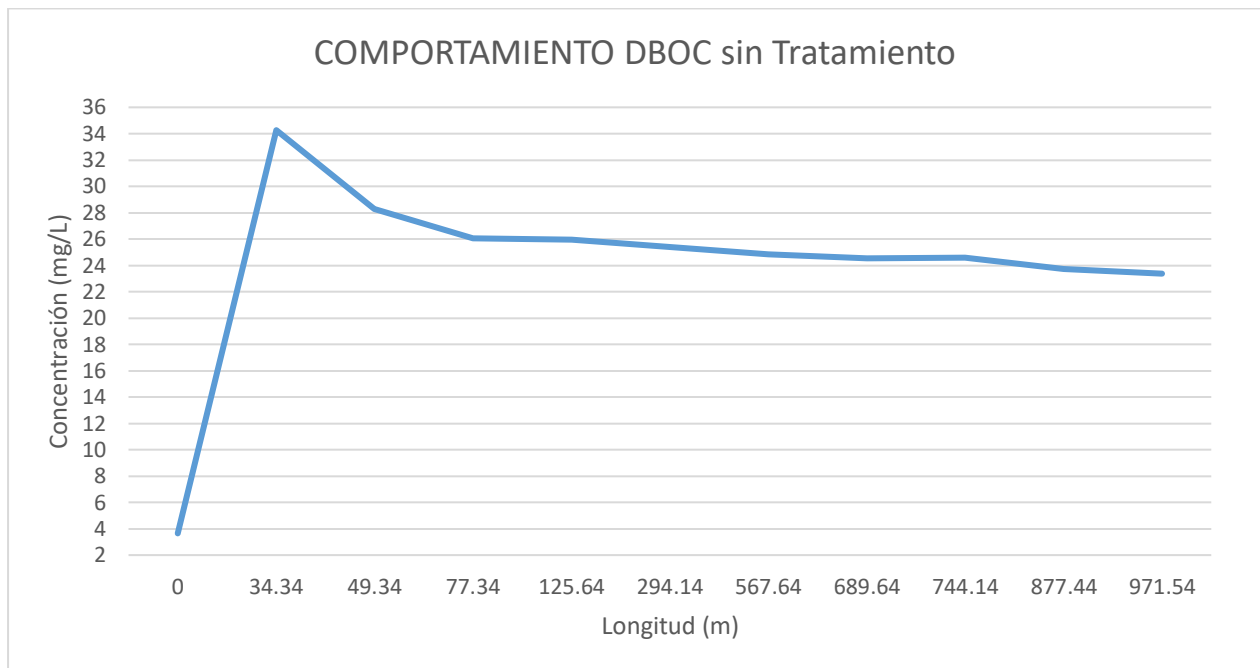


Figura 17. Perfil longitudinal de la DBOC sin tratamiento

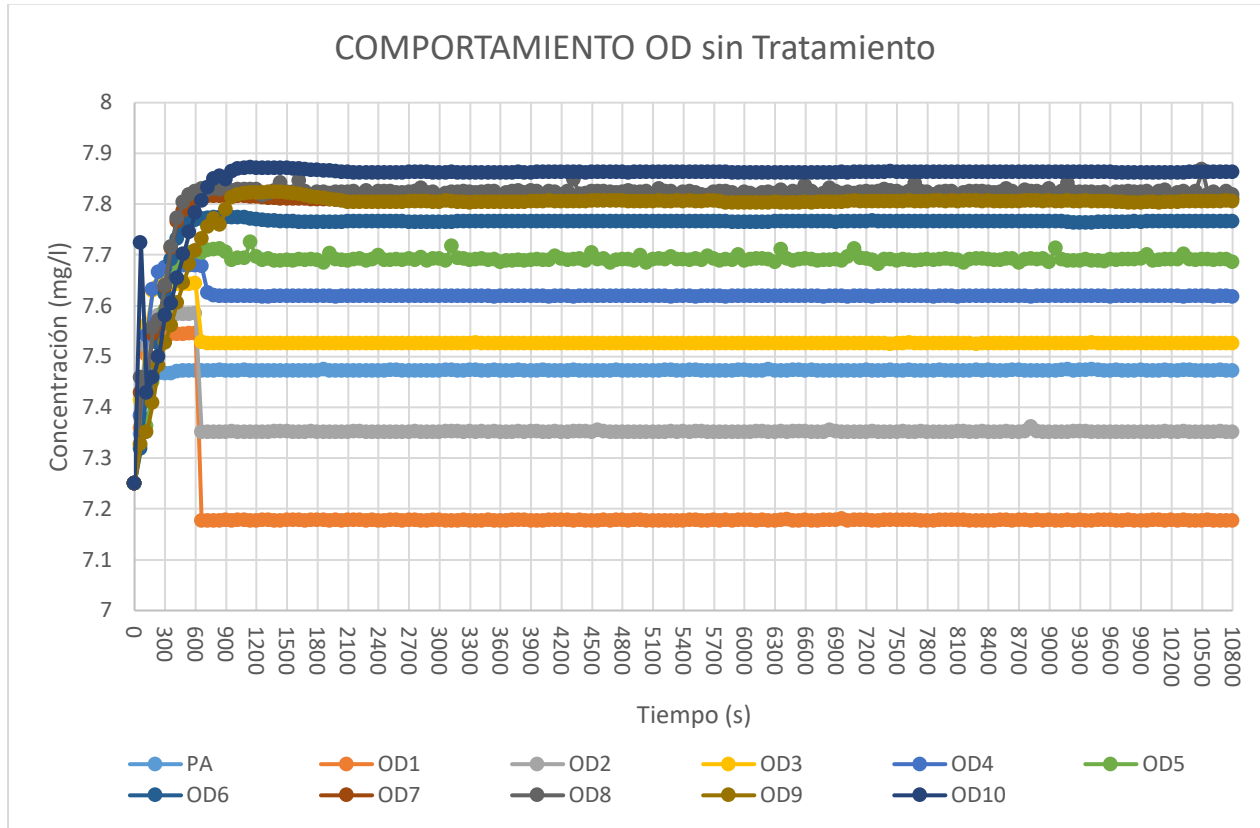


Figura 18. Comportamiento del oxígeno disuelto sin tratamiento

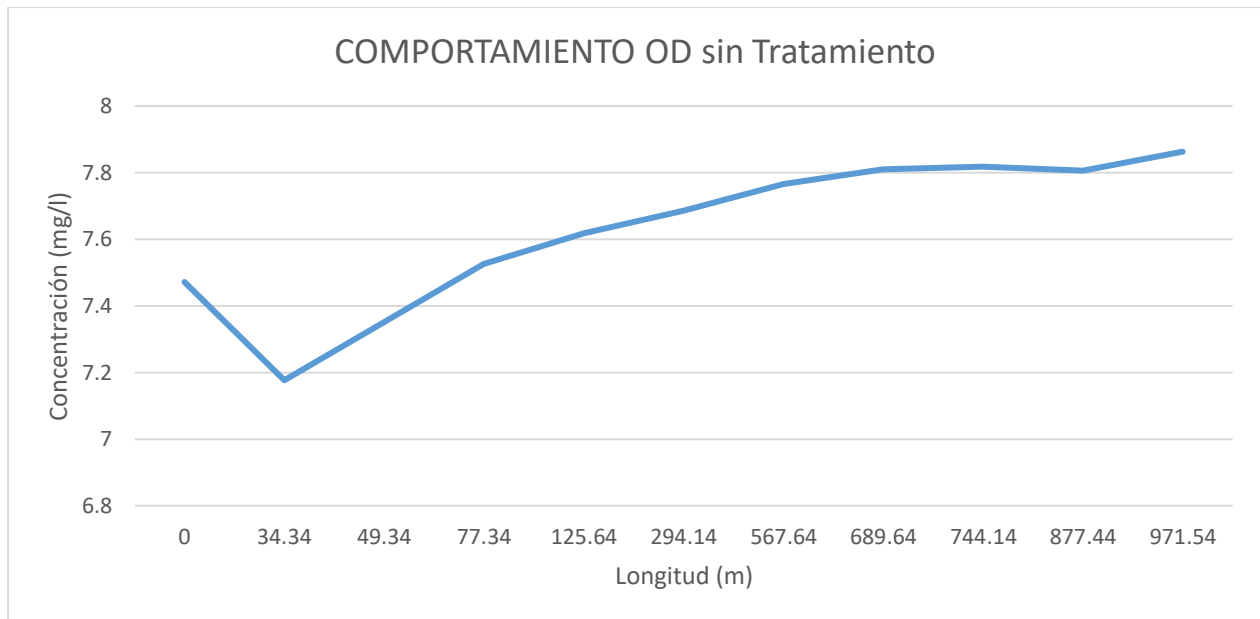


Figura 19. Perfil longitudinal del oxígeno disuelto sin tratamiento

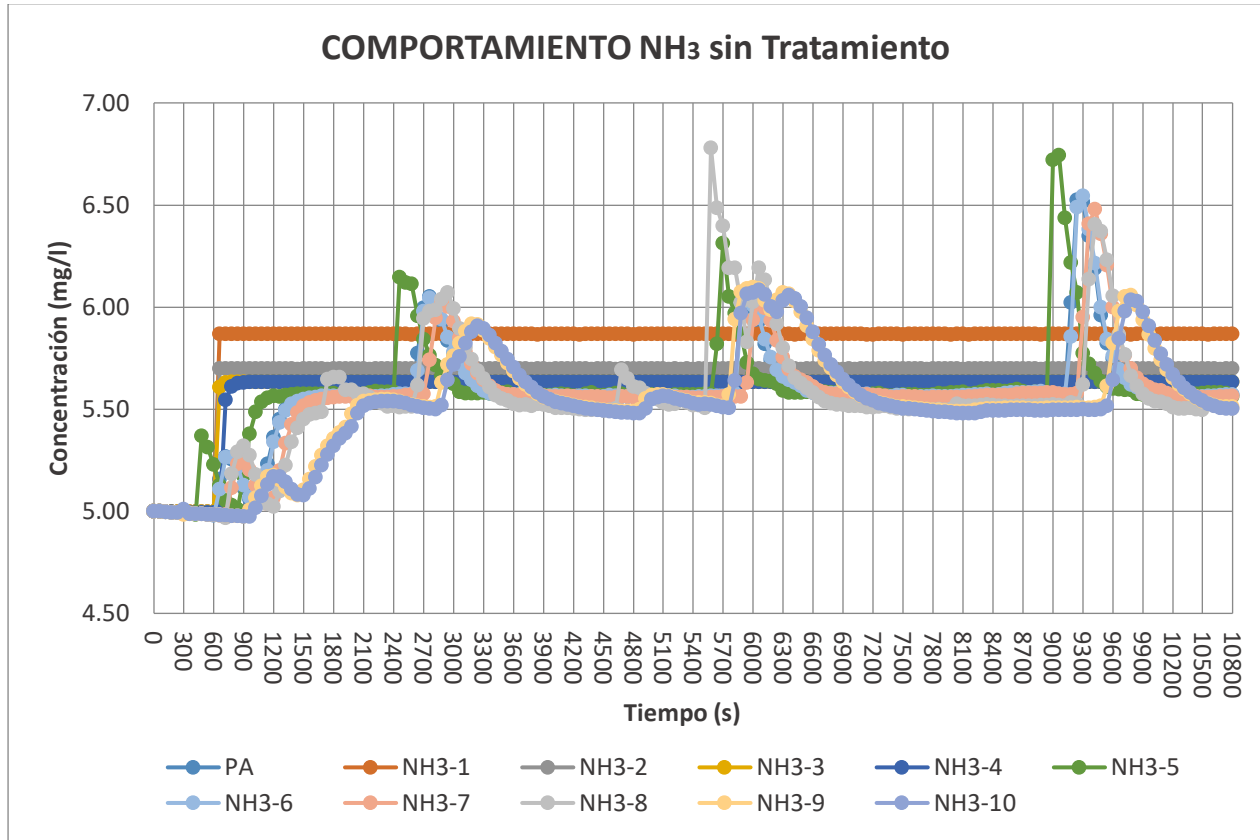


Figura 20. Comportamiento del amonio sin tratamiento

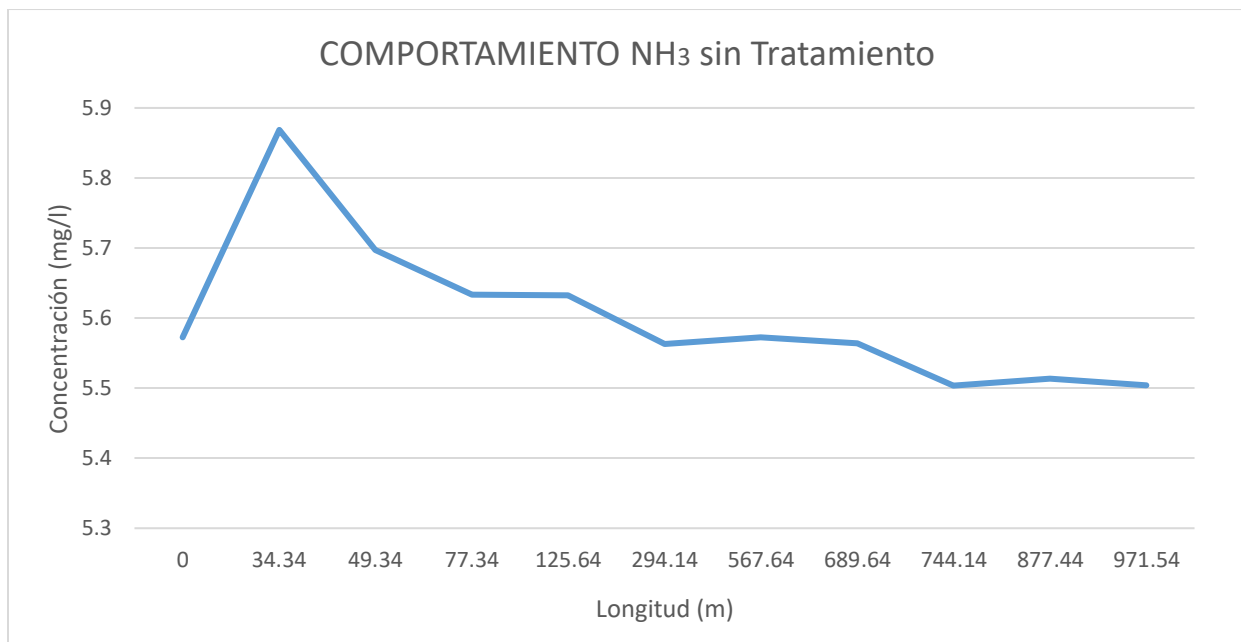


Figura 21. Perfil longitudinal del amonio sin tratamiento

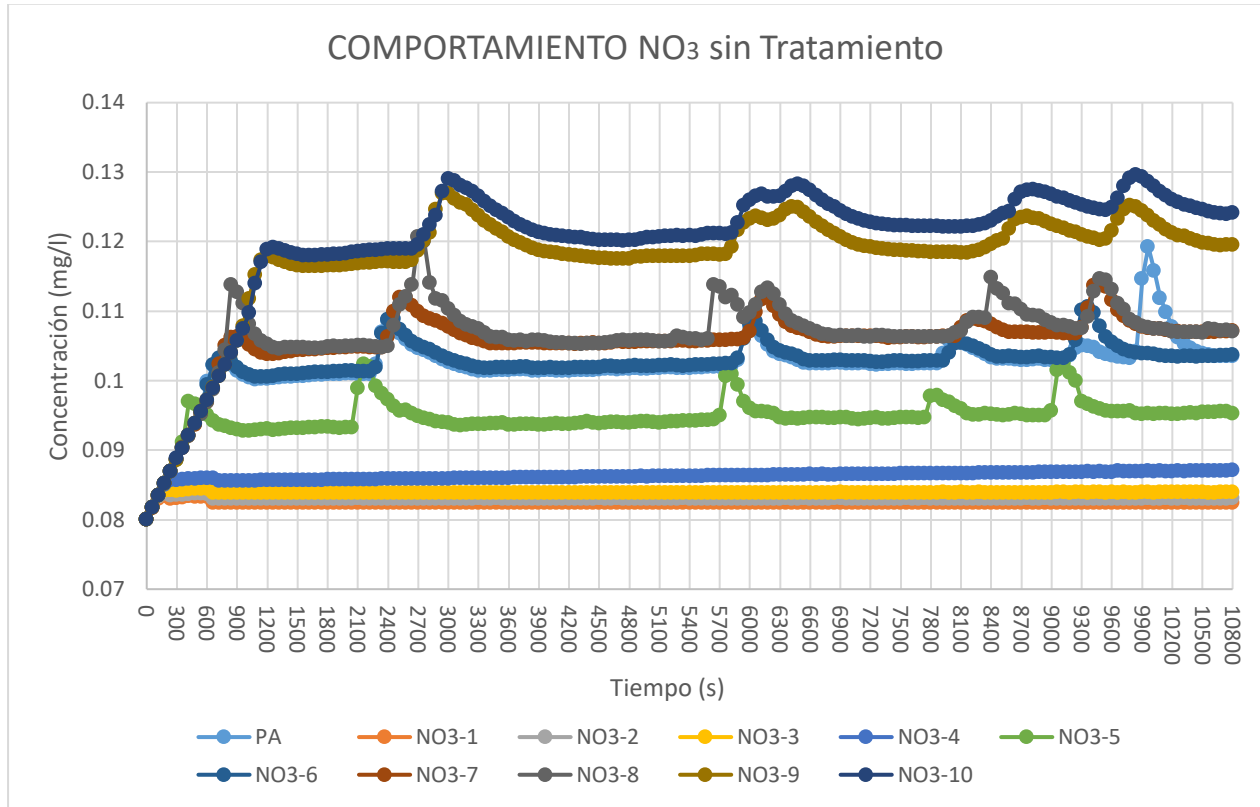


Figura 22. Comportamiento del nitrato sin tratamiento

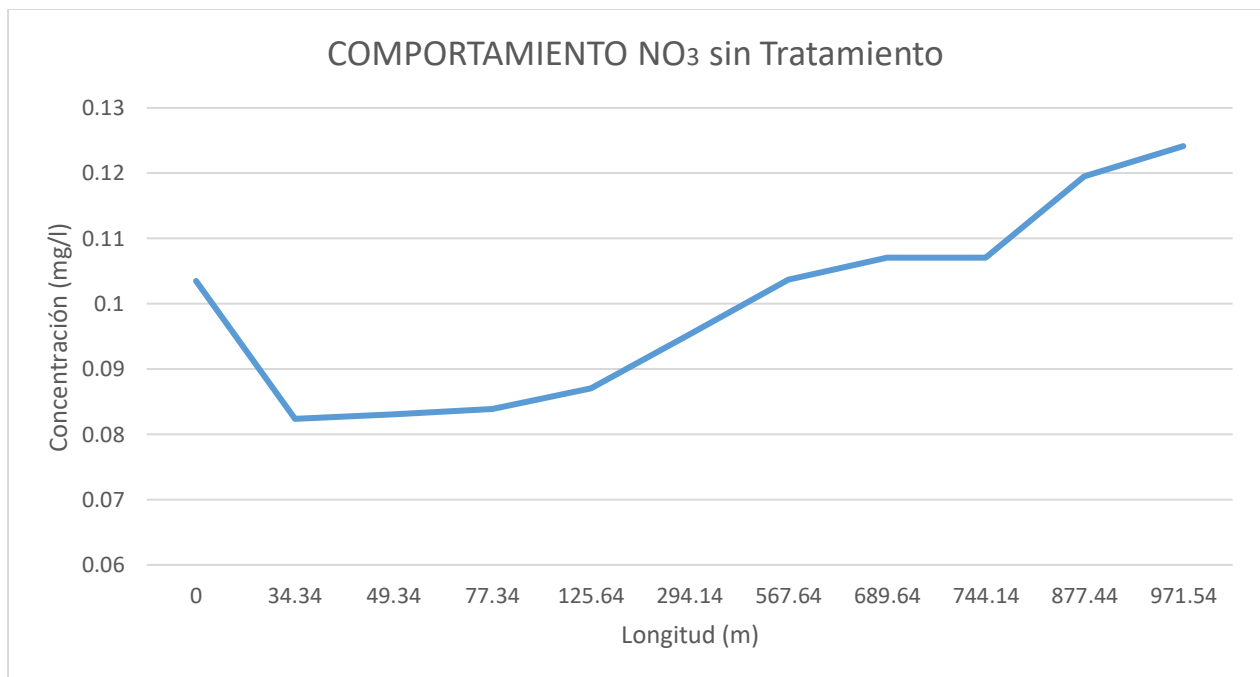


Figura 23. Perfil longitudinal del nitrato sin tratamiento

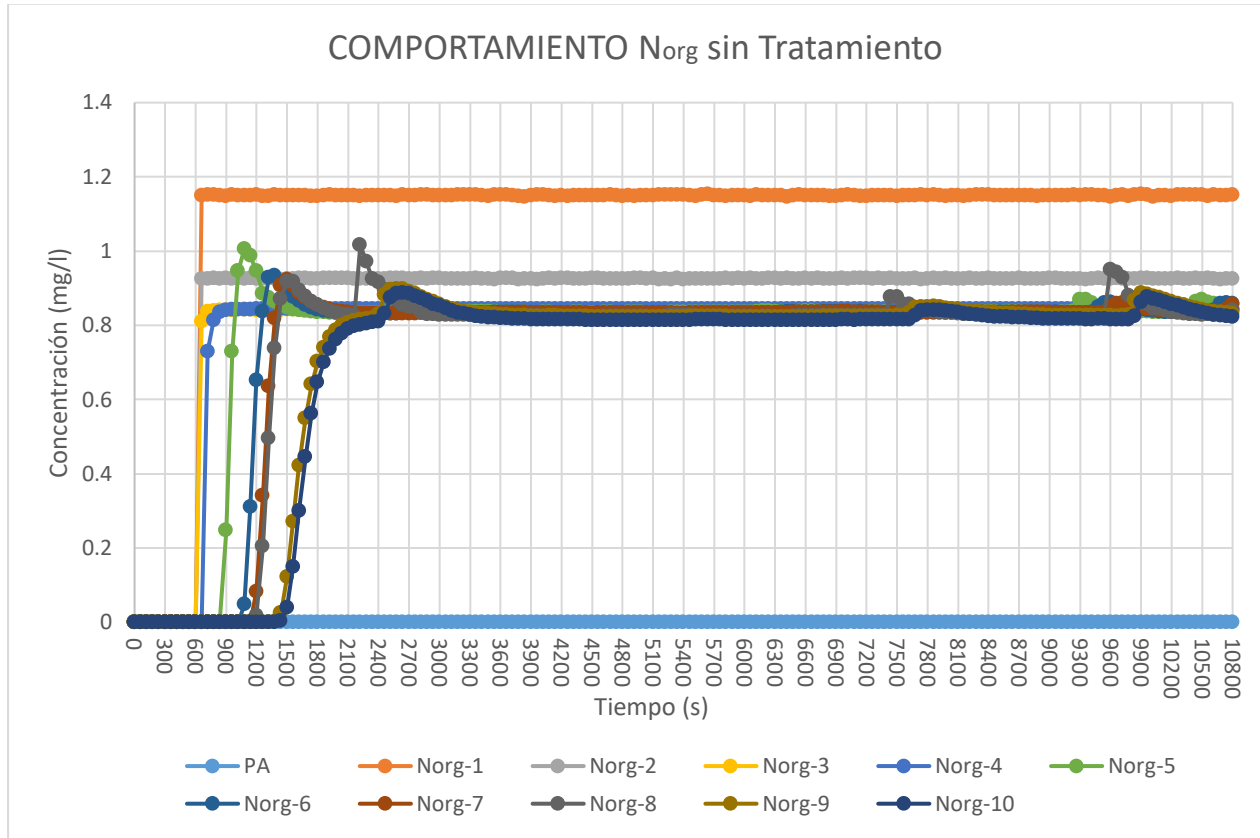


Figura 24. Comportamiento del nitrógeno orgánico sin tratamiento

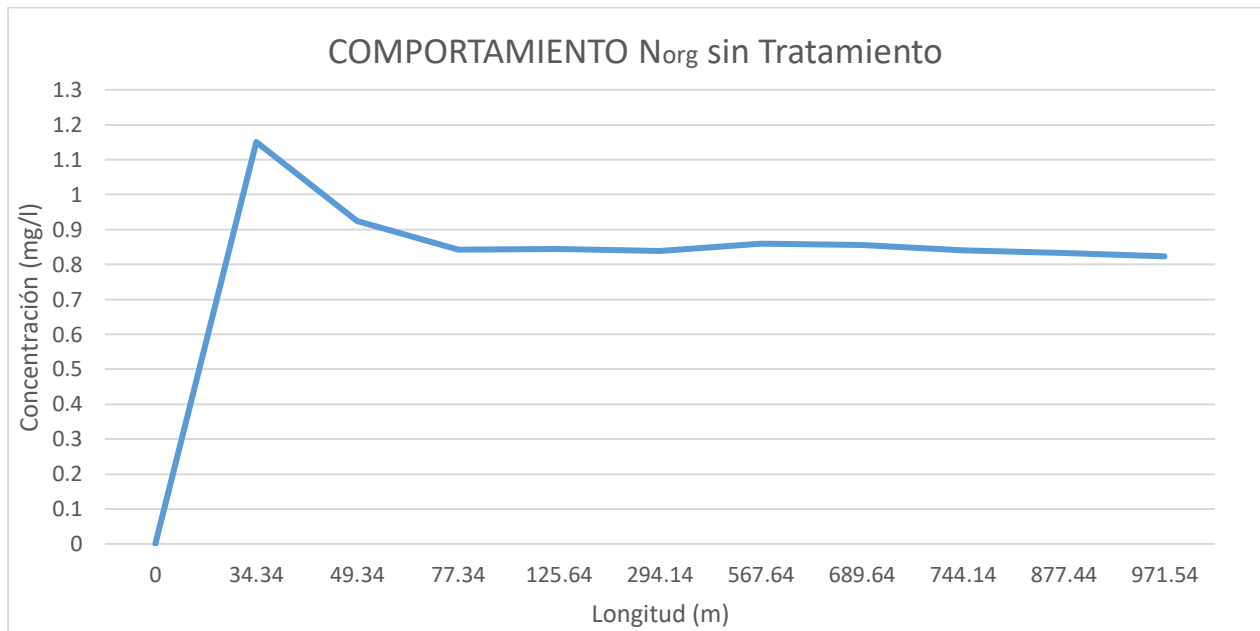


Figura 25. Perfil longitudinal del nitrógeno orgánico sin tratamiento

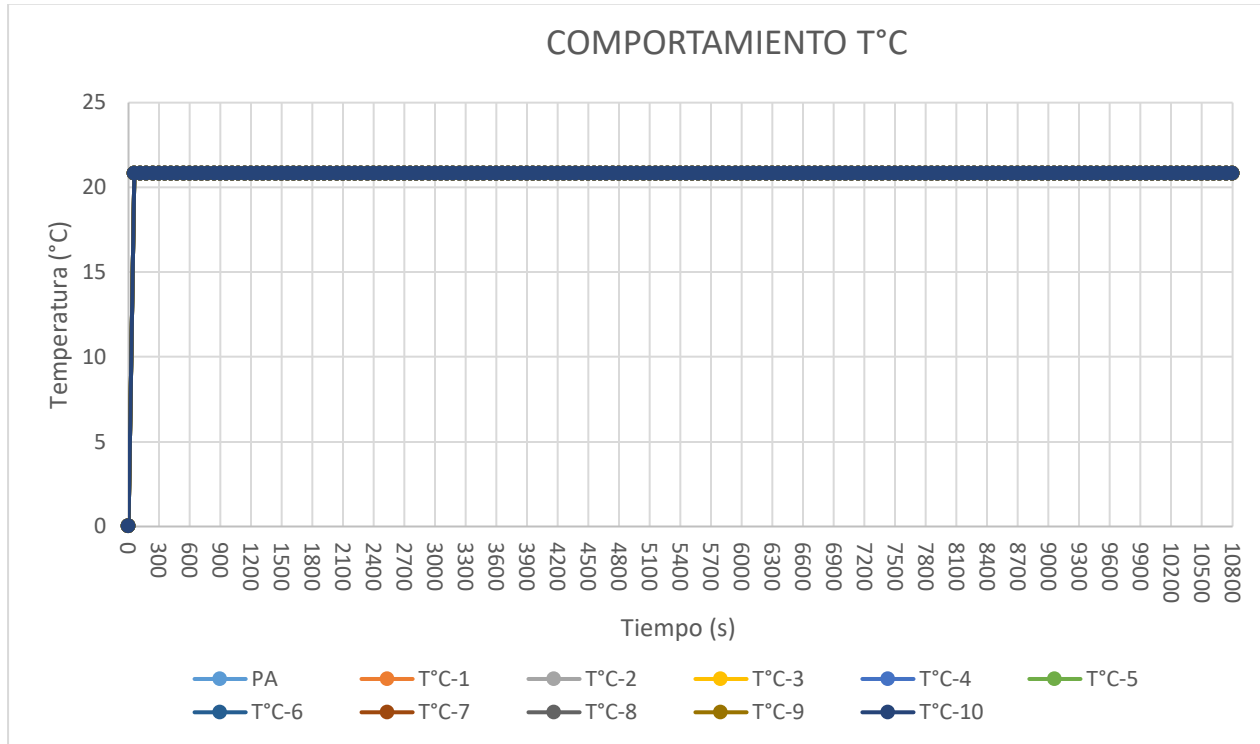


Figura 26. Comportamiento de la temperatura $T^{\circ}C$ sin tratamiento.

A continuación, se presentan gráficas relacionando los diferentes parámetros

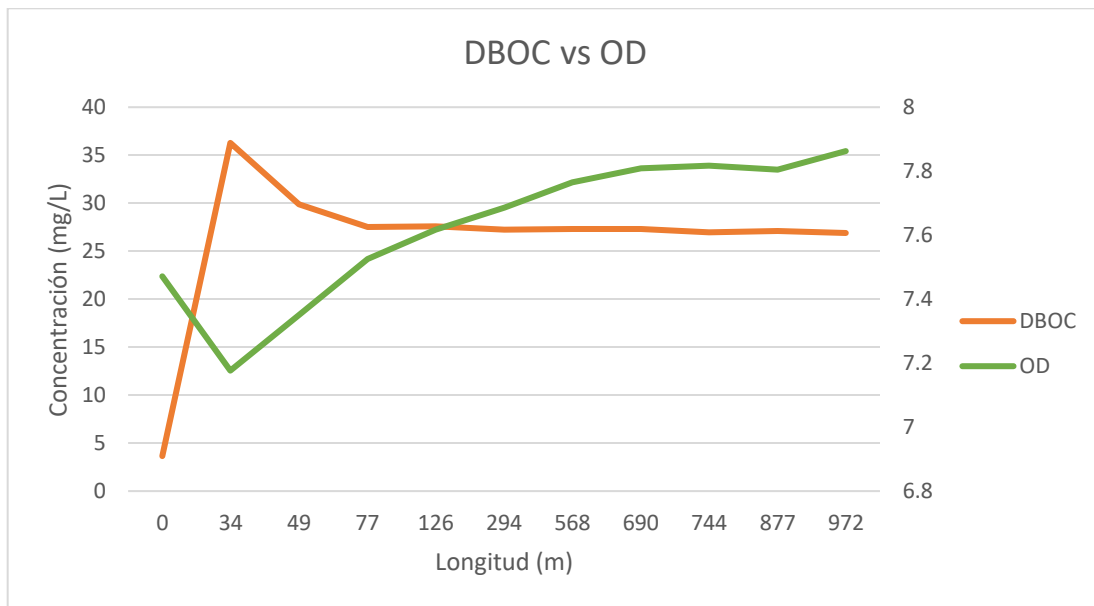


Figura 27. Interacción entre la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento.

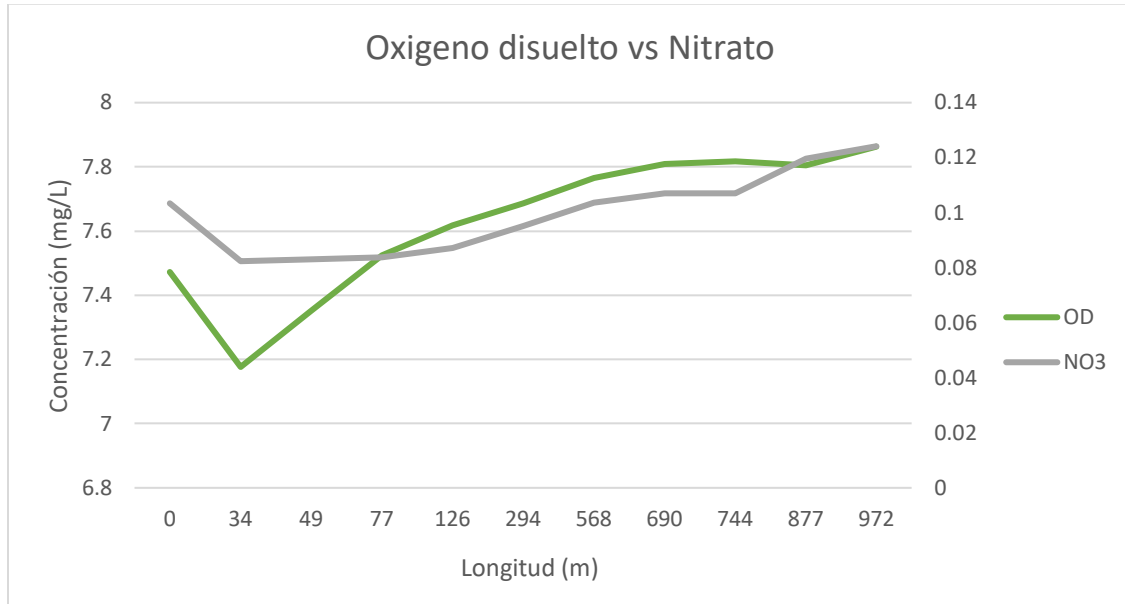


Figura 28. Interacción entre los nitratos y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento.

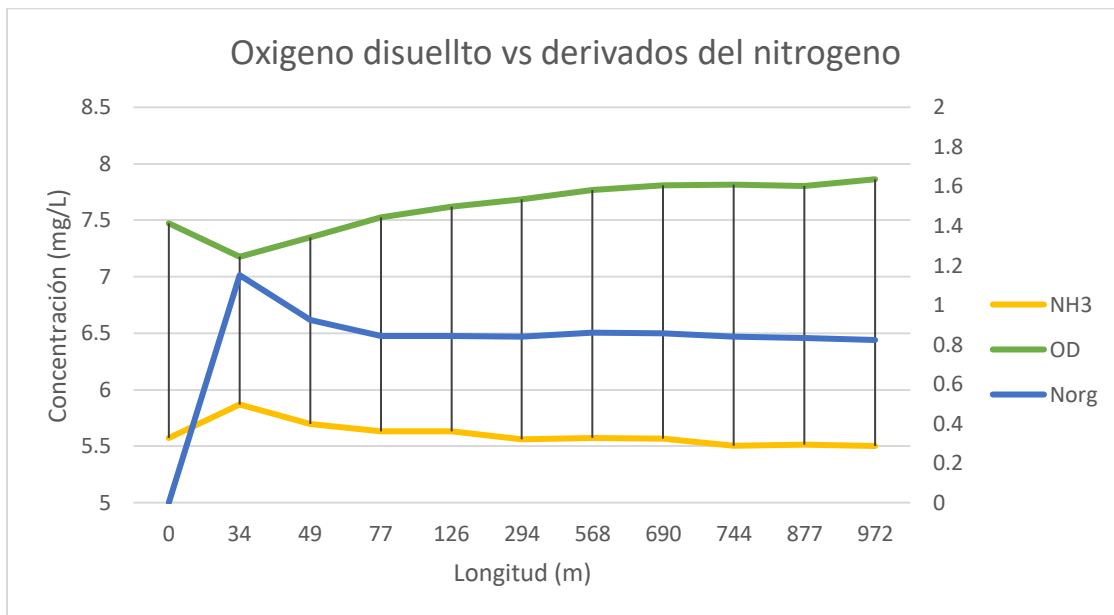


Figura 29. Interacción entre NH₃, Norg y el oxígeno disuelto en el escenario sin tratamiento.

En la **Figura 27** el *Eje Y* de la izquierda corresponde a la DBOC, en la **Figura 28** el *Eje Y* de la izquierda corresponde a la OD y para la **Figura 29** el *Eje Y* de la izquierda corresponde al OD y al NH₃.

Simulación Escenario 2

Se realiza una simulación del vertimiento posterior al tratamiento de la PTAR, se asumen que se cumple con la normativa y se utilizan los máximos permisibles que exige la resolución 0631 del 2015, con un tiempo de simulación de 10800 segundos, de igual manera el modelo trabaja de forma estacionaria, por lo tanto las variaciones que se dan en el tiempo se presumen efectos de "calentamiento" del modelo, los perfiles longitudinales se construyen teniendo en cuenta la distancia con respecto al primer punto de análisis (m) reportados en la **Tabla 8**; a continuación, se presentan los resultados de los parámetros de calidad.

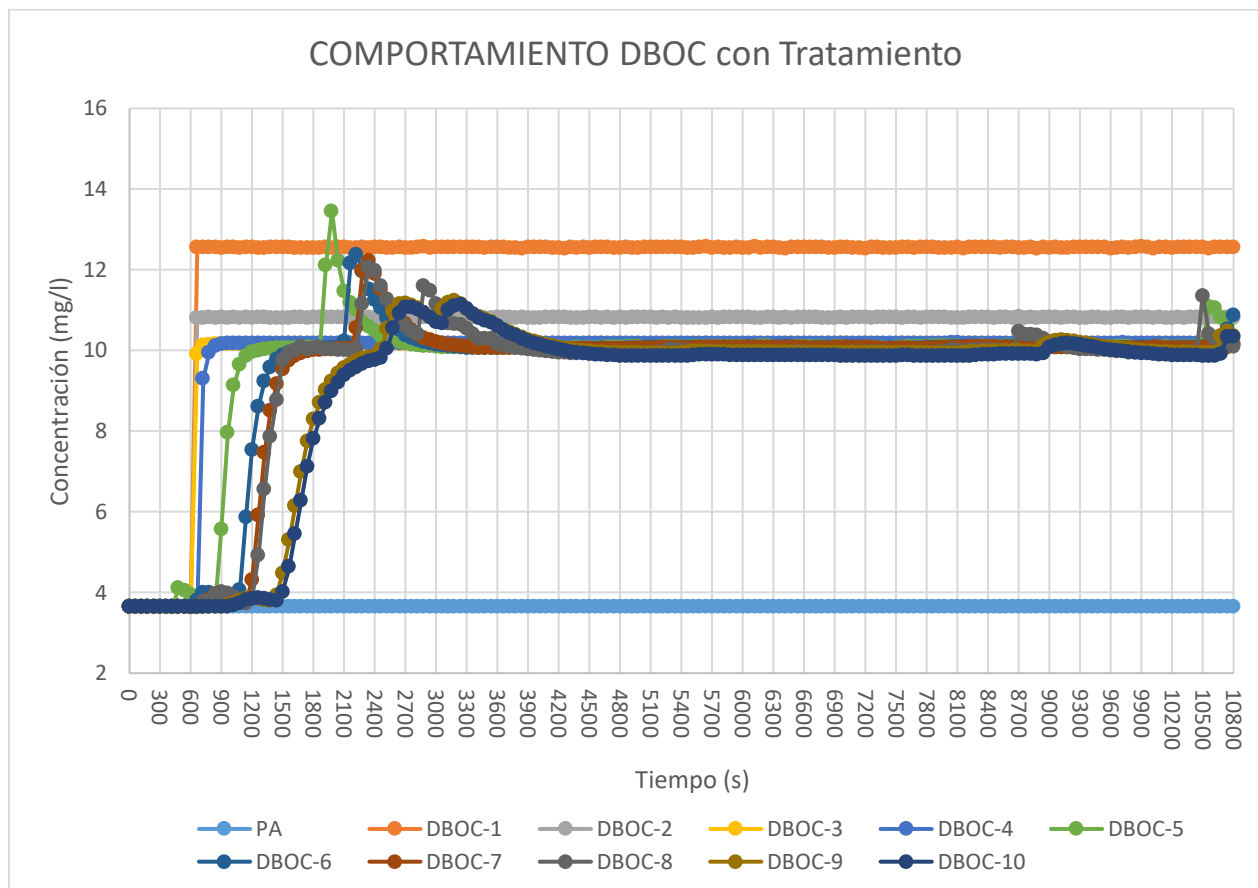


Figura 30. Comportamiento de la DBOC con tratamiento

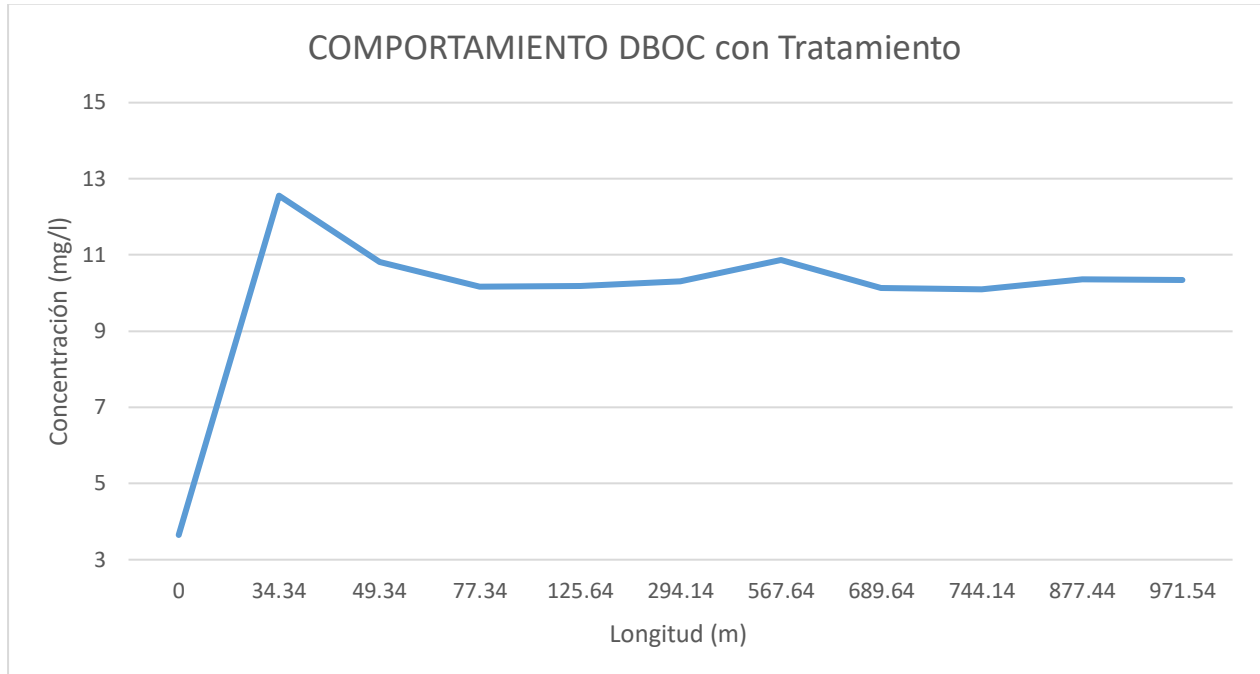


Figura 31. Perfil longitudinal de la DBOC con tratamiento

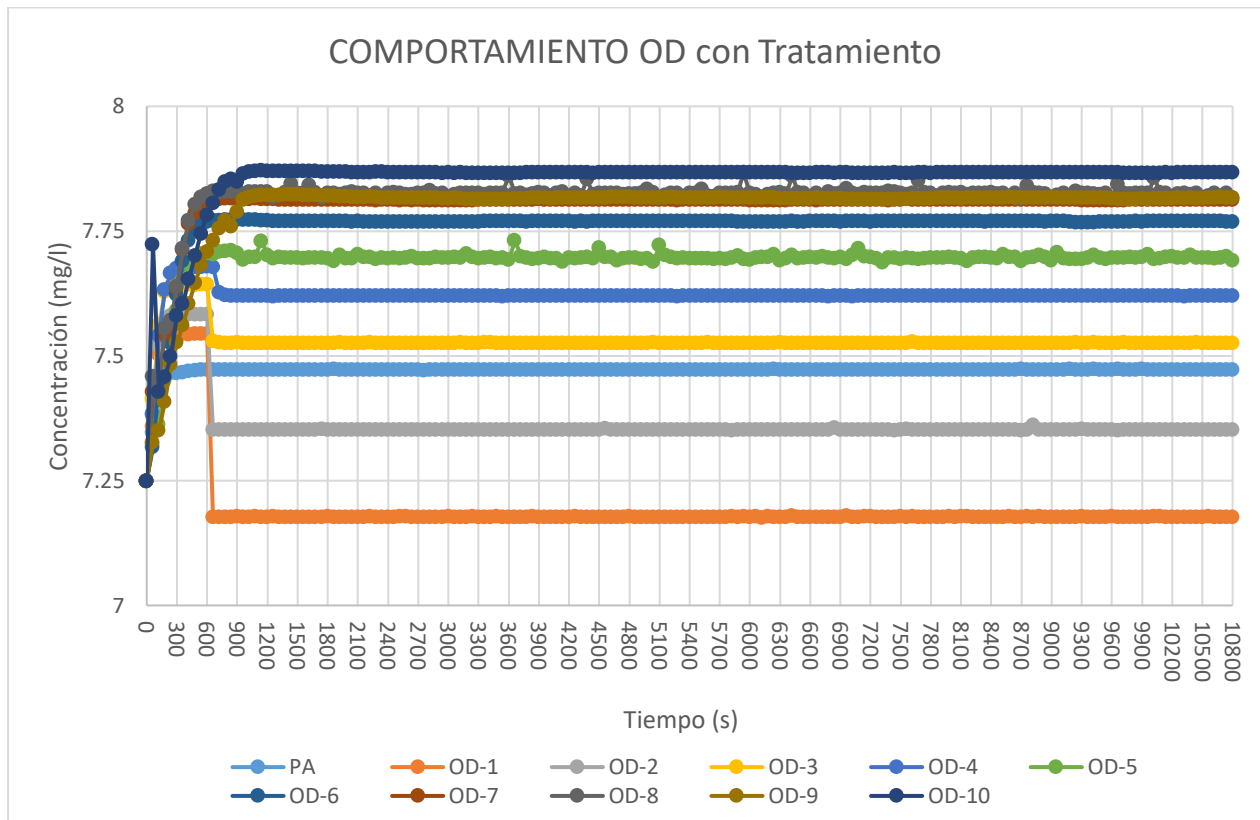


Figura 32. Comportamiento del oxígeno disuelto con tratamiento

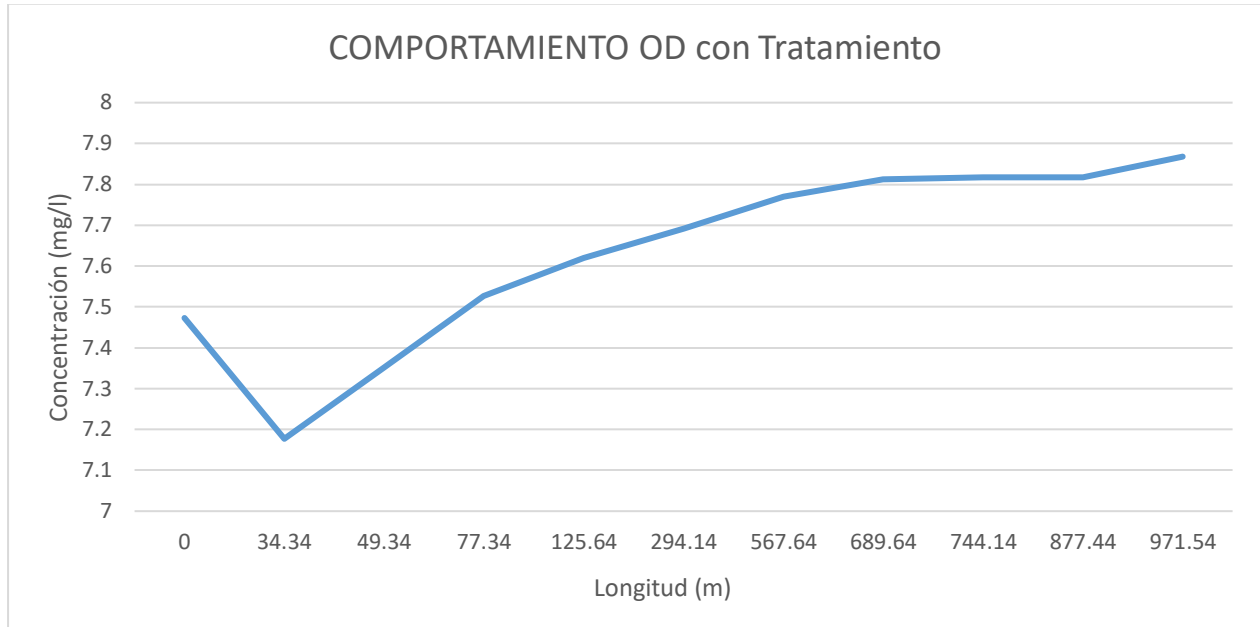


Figura 33. Perfil longitudinal del oxígeno disuelto con tratamiento

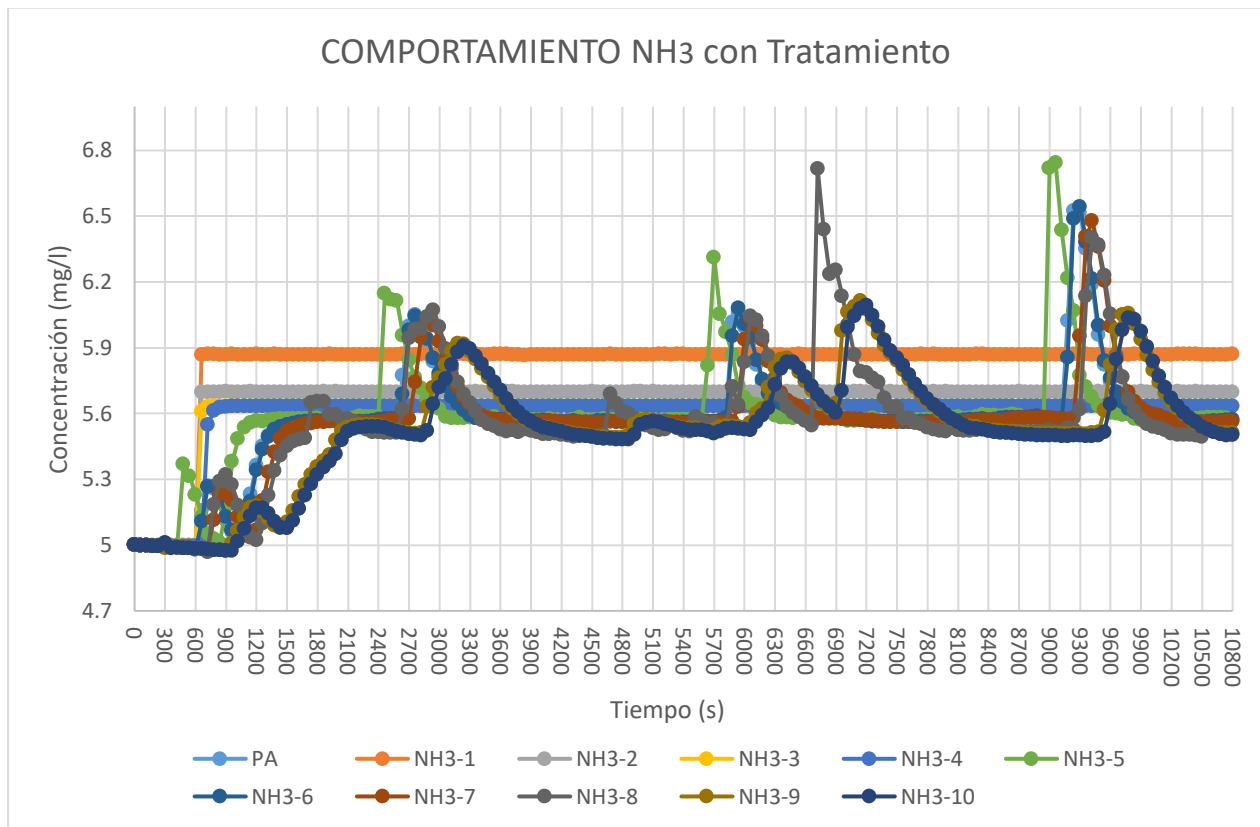


Figura 34. Comportamiento del amonio con tratamiento

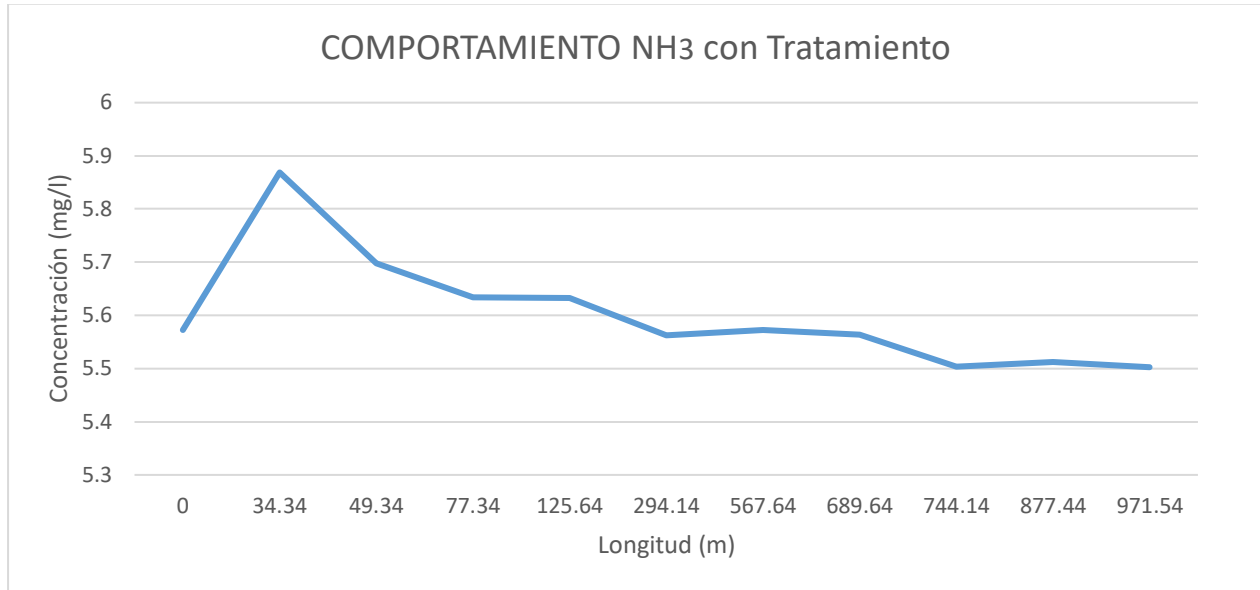


Figura 35. Perfil longitudinal del amonio con tratamiento

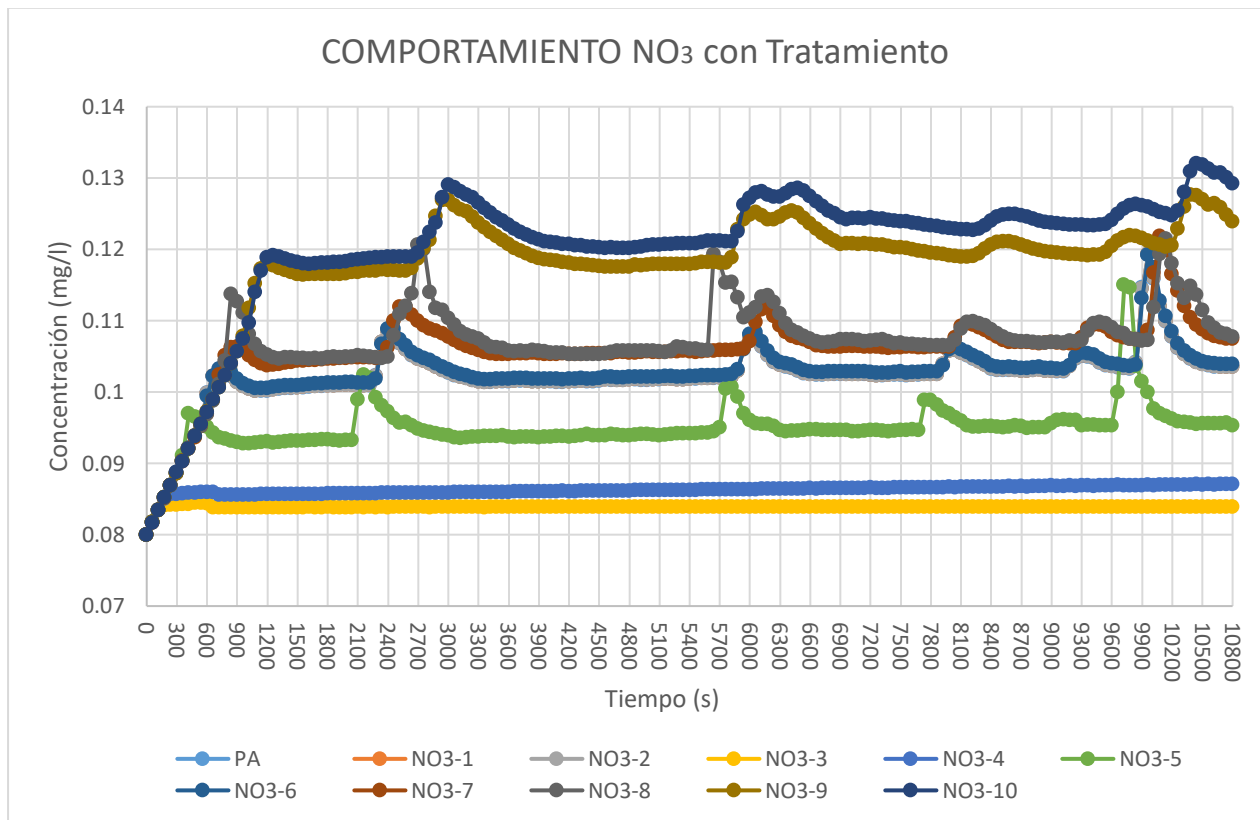


Figura 36. Comportamiento del nitrato con tratamiento

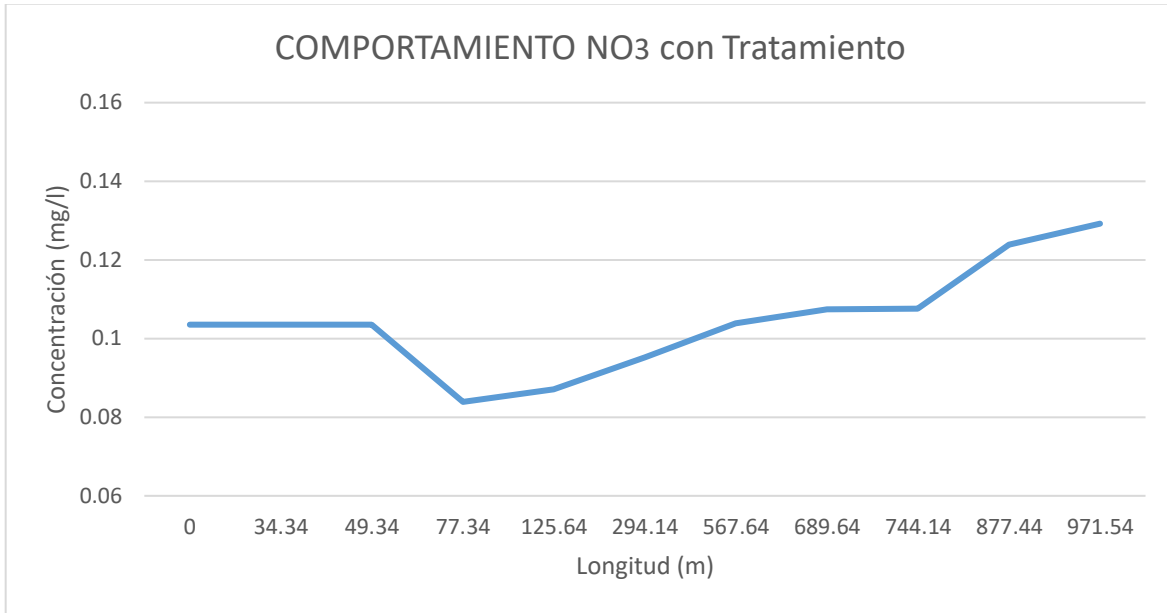


Figura 37. Perfil longitudinal del nitrato con tratamiento.

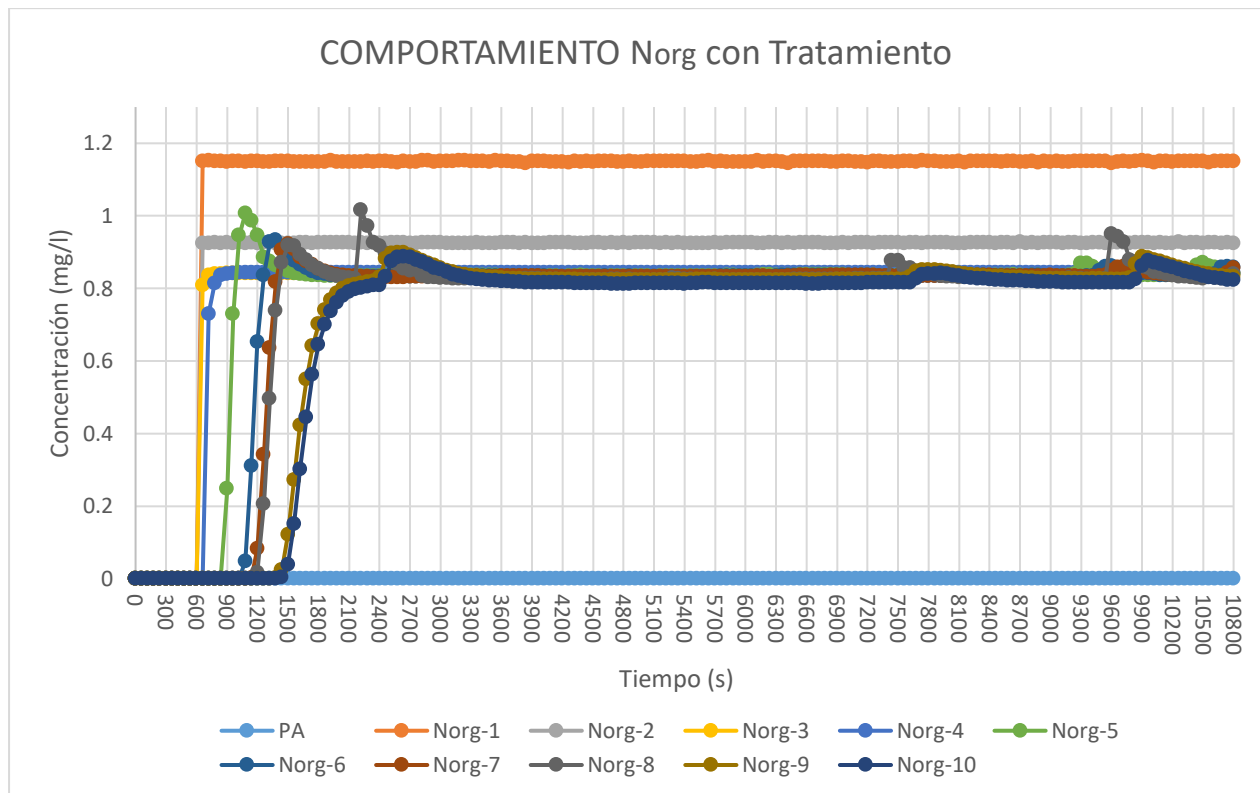


Figura 38. Comportamiento del nitrógeno orgánico con tratamiento

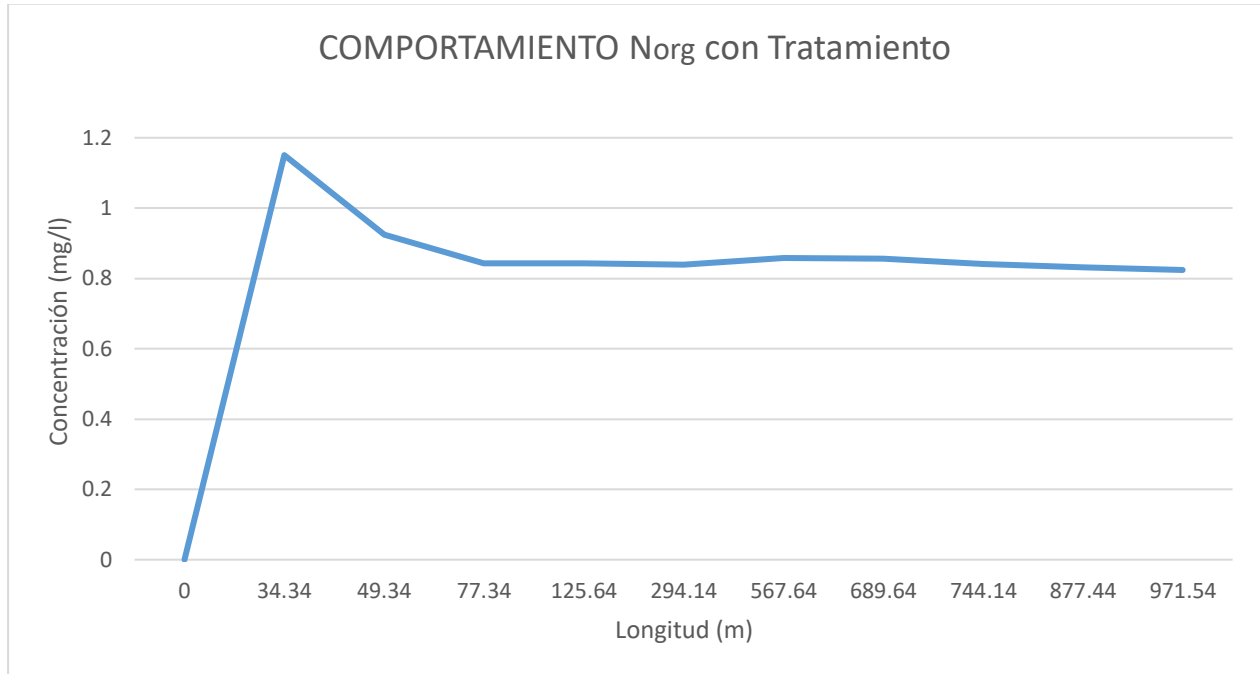


Figura 39. Perfil longitudinal del nitrógeno orgánico con tratamiento

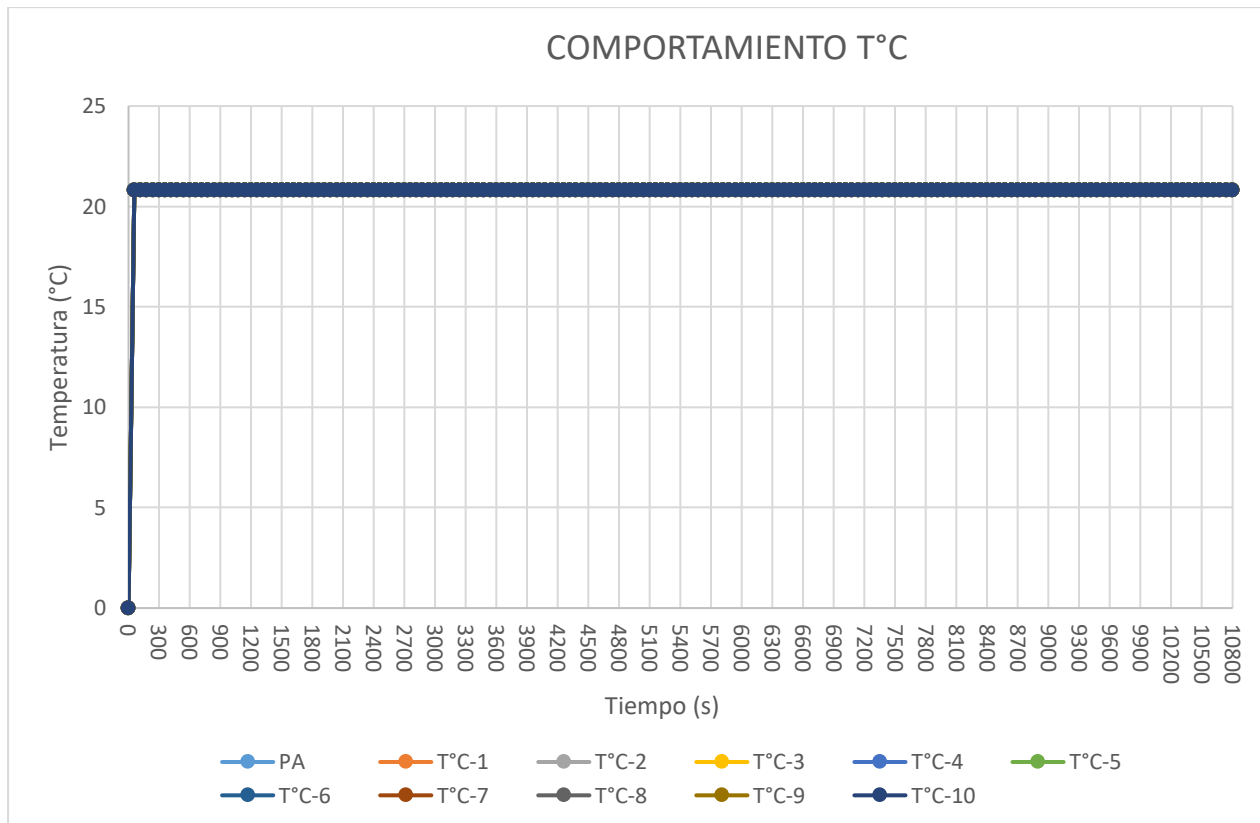


Figura 40. Comportamiento de la temperatura T °C con tratamiento

A continuación, se presentan gráficas relacionando los diferentes parámetros.

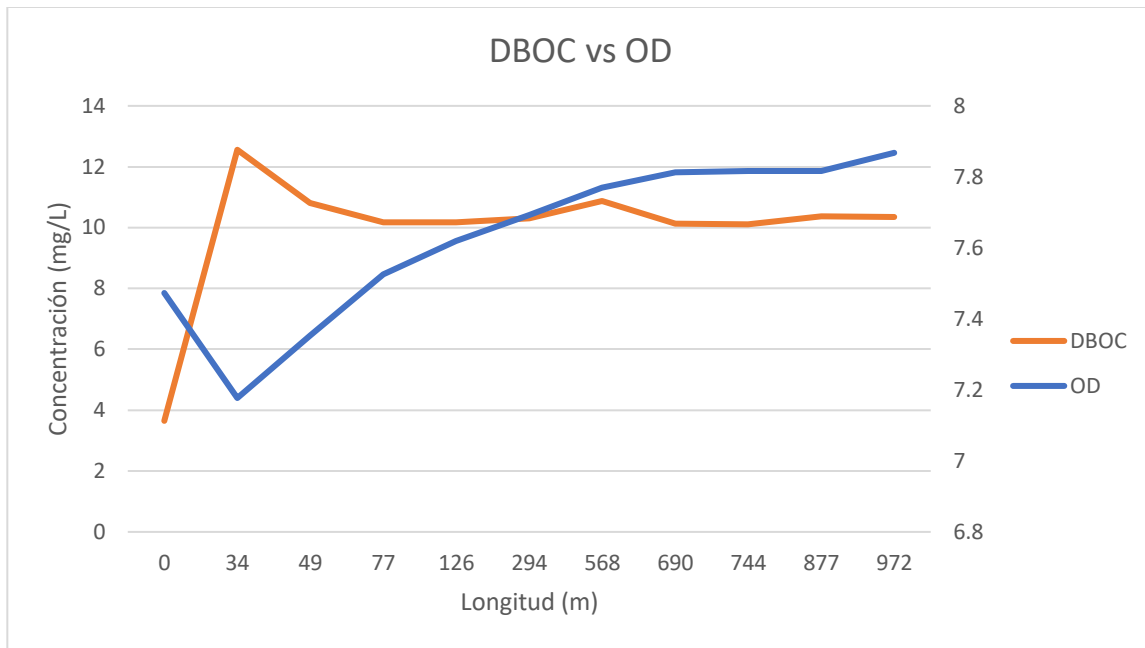


Figura 41. Interacción entre la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento

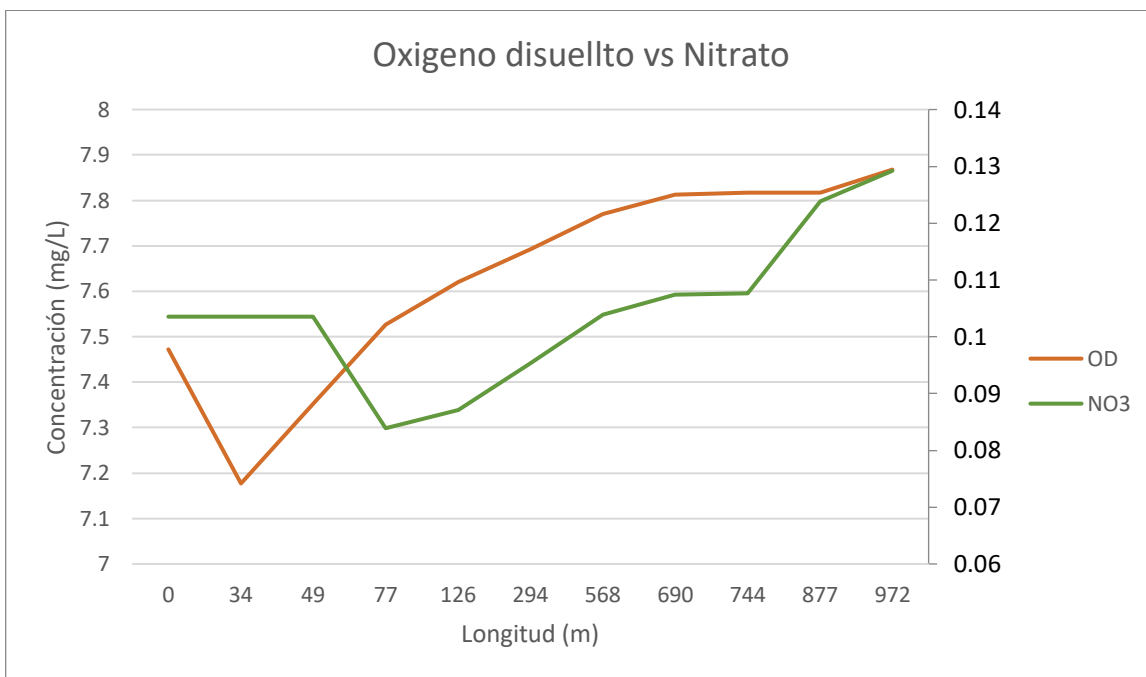


Figura 42. Interacción entre los nitratos y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento.

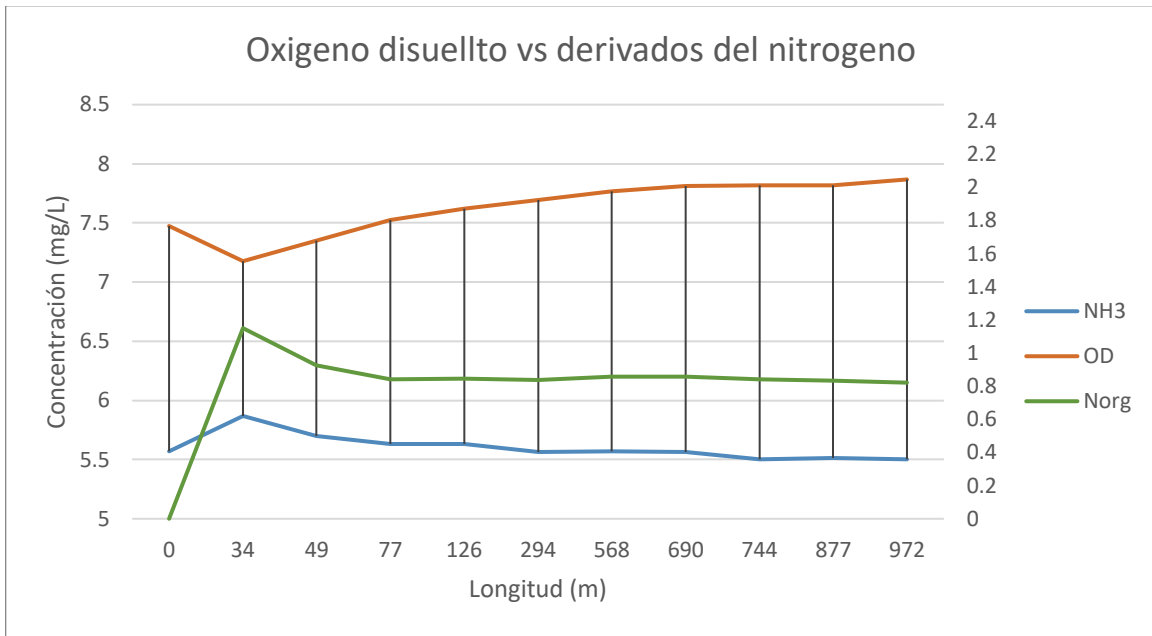


Figura 43. Interacción entre NH3, Norg y el oxígeno disuelto en el escenario con tratamiento.

En la Figura 41 el Eje Y de la izquierda corresponde a la DBOC, en la Figura 42 el Eje Y de la izquierda corresponde a la OD y para la Figura 43 el Eje Y de la izquierda corresponde al OD y al NH3.

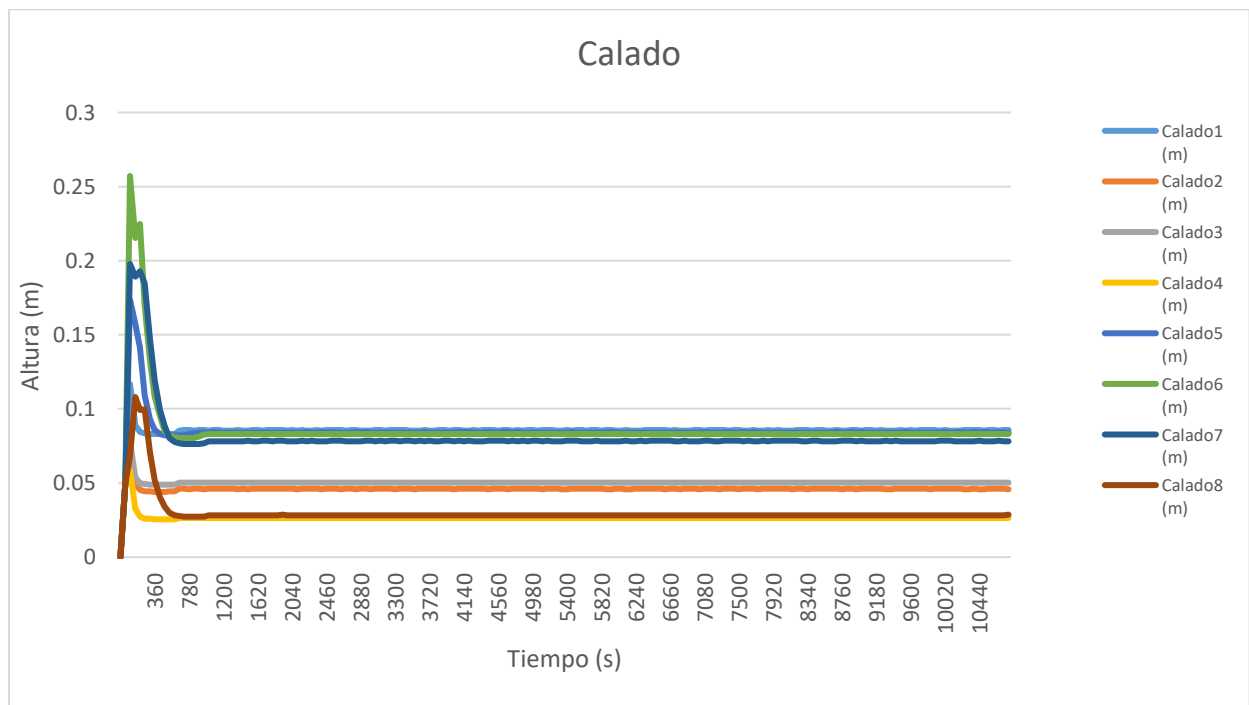


Figura 44. Comportamiento del calado para los puntos de análisis

Análisis de los resultados

Se analizan los dos eventos correspondientes al vertimiento con y sin tratamiento, donde se evidencia un buen efecto de la dilución cuando se presenta el vertimiento, en el tiempo de 300s y cómo se observa en la gráfica de calado, el comportamiento de la altura de la lámina de agua en estos dos escenarios se empieza a estabilizar a partir de los 600s.

En la morfometría o morfología fluvial de la quebrada del Medio se hicieron algunas simplificaciones en su geometría, junto con una longitud en el tramo de análisis poco extensa de aproximadamente 82 m antes del punto del vertimiento y unos 973 m aguas abajo de la descarga, hasta la entrega en la quebrada Las Juntas para una extensión total de 1055 m, a lo largo del tramo de análisis se logra evidenciar un buen efecto de dilución.

Como se observa en la **Figura 26** y la **Figura 40**, la temperatura para los dos eventos no muestra ningún cambio significativo por las diferencias incipientes entre la temperatura del vertimiento y la temperatura del cuerpo de agua natural las cuales corresponden a 21,1 y 20,8 respectivamente; posiblemente tras la descarga del vertimiento en la quebrada y por la masa de agua más representativa en el cauce se alcanza el equilibrio térmico rápidamente.

Al momento en que la quebrada recibe la descarga, disminuye la concentración del oxígeno disuelto, pero se va recuperando conforme avanza la masa de agua por la reaireación debido a la hidrodinámica del cuerpo de agua; la constante de reaireación en el modelo se basa en las características hidráulicas en función de la velocidad y la altura de la lámina de agua.

Como se observa en la **Figura 17** y la **Figura 19**, el cuerpo de agua presenta una condición inicial de 7,25 mg/l de OD y una DBOC de 3,65 mg/l cuando ocurre el vertimiento para el evento sin tratamiento en el punto de análisis uno (1) el OD se baja en promedio a 7,19 mg/l, pero conforme va avanzando la masa de agua este parámetro se va recuperando llegando a una concentración de 7.84 mg/l en el punto de observación de número diez (10); en lo que respecta a la DBOC en el punto de análisis uno (1) la DBOC se sube a 34,2 mg/l pero a medida que se desplaza masa de agua hasta el último punto de análisis (10) baja a 23,3 mg/l, lo que indica que el cuerpo de agua presente un incremento de 19,65 g/l con respecto a la concentración que tenía la quebrada antes de la ocurrencia del vertimiento.

Como se muestra en la **Figura 31** y la **Figura 33** para el evento con tratamiento ocurre un comportamiento similar con respecto al oxígeno disuelto, de igual forma con la DBOC pero

cambiando las concentraciones donde en el punto de análisis uno (1) se presenta una concentración promedio de DBOC de 12 mg/l y en el punto diez (10) una concentración de 0.009g/l lo que indica que la quebrada El Medio antes de realizar la entrega a la quebrada Las Juntas tuvo un incremento de la concentración de DBOC de 5.35 mg/l.

Con respecto a las tres formas de nitrógeno (NH_3 , NO_3 y Norg), en las **Figura 20, Figura 22, Figura 24, Figura 34, Figura 36 y Figura 38** que muestran variaciones con respecto al tiempo de modelación, se observan puntos de análisis que presentan picos o saltos bruscos de la concentración, esto sucede después de la ocurrencia del vertimiento en algunos lapsos puesto que el modelo se encuentra en calentamiento y conforme avanza el tiempo se evidencia que va teniendo un comportamiento más estable, esto sucede en los puntos de análisis más alejados del punto de descarga del vertimiento. Donde, se presenta un comportamiento de aumento en los datos de entrada teniendo disminuciones y picos discontinuos, con algunas secciones cortas de continuidad para llegar a un valor final.

Aguas abajo del punto de vertimiento se produce un descenso continuo en la DBOC, NH_4 y Norg aludido probablemente a los procesos de degradación y de nitrificación, como se observa en la **Figura 27, Figura 29, Figura 41 y la Figura 43**; lo que implica el aumento del NO_3 como se muestra en la **Figura 28 y la Figura 42**; evidenciando la asimilación por dispersión en la sección longitudinal y la reducción del oxígeno debido a que funge como reactivo en la transformación del nitrógeno. Sin embargo, el oxígeno disuelto se va recuperando progresivamente por la reaireación gracias a las características hidráulicas del cuerpo de agua.

En el marco de la resolución 0631 de 2015, no se establecen parámetros límites para las tres formas de nitrógeno que se pueden simular en el programa de IBER, debido a eso no hay diferencias entre las condiciones de entrada del vertimiento para los dos eventos (con y sin tratamiento), por esa razón el comportamiento es el mismo en los dos episodios representados.

Conclusiones

Al simular los parámetros de DBOC, oxígeno disuelto, y las tres formas de nitrógeno, se observa para el evento con tratamiento que el cuerpo de agua se ve afectado tenuemente; el efecto de la dilución favorece que el cuerpo de agua no se vea alterado en gran medida por las cargas contaminantes que le ingresan con la descarga del vertimiento.

La información que funge de insumo para la caracterización fisicoquímica del cuerpo de agua se extrae del estudio técnico del diagnóstico para la construcción de la PTAR, la caracterización del vertimiento sin tratar en la red de alcantarillado se obtiene del PSMV y se incluyen valores adicionales medidos en campo como lo fue la temperatura del agua.

Con respecto a las mediciones o monitoreos realizados al cuerpo de agua objeto de estudio, se tienen en cuenta los tiempos de viaje para contrastar la información con el modelo y así poder realizar una validación del mismo, sin embargo, como no se cuenta con información suficiente no es posible validar la simulación; adicionalmente, es necesario verificar la fiabilidad de la información disponible u obtenida en campo para evitar errores en los resultados que conlleven a una interpretación ambigua y que no represente el comportamiento del cuerpo de agua. Es importante precisar que los datos medidos en campo representan el comportamiento del cuerpo de agua en el momento de la medición, y no arroja información relacionada con el estado futuro, el cual dependerá de las dinámicas poblacionales, los cambios en el uso del suelo, la construcción de infraestructura civil, estrategias para el control de la contaminación y los cambios en los usos del agua. En ese orden de ideas, son las entidades públicas quienes cuentan con información suficiente en términos de calidad y cantidad indispensable para implementar un modelo que la requiera, si no existe predisposición por parte de las autoridades a colaborar será muy difícil representar las dinámicas poblacionales que ocurren en un área de estudio específico y que afectan la calidad del recurso hídrico.

El modelo debe ser una aproximación del comportamiento más probable del cuerpo de agua en términos de la capacidad de asimilación y auto depuración, lo ideal es incluir los efectos de carga contaminante asociado a los tributarios y vertimientos legales e ilegales que se encuentren en el cuerpo de agua, sin embargo, debido a la falta de tiempo e información no fue posible identificarlos para incluirlos en el modelo.

Se simula el comportamiento de la quebrada El Medio con el modelo IBER, representando la hidrodinámica y la calidad del agua, ésta última incluye los parámetros de oxígeno disuelto, DBOC, temperatura, NH₃, NO₃ y N-orgánico y el periodo de análisis fue de 10800s con intervalos de resultados cada 60s, donde se pudo identificar que se presenta una rápida dilución de la DBOC y por las características morfométricas del cauce se favorece la reaireación en consecuencia el oxígeno no se ve afectado en gran medida a lo largo del tramo de análisis.

Para la evaluación del vertimiento sobre la quebrada El Medio es indispensable identificar el escenario crítico a simular, el cual corresponde al caudal que representa condiciones mínimas en el cuerpo de agua receptor al momento de la descarga del vertimiento sin tratar. Los escenarios son evaluados con el mismo flujo volumétrico, la magnitud medida en campo se encuentra en un valor intermedio entre el caudal mínimo y el caudal medio, se podría considerar como una condición o un episodio crítico con respecto al comportamiento del flujo volumétrico en el cuerpo de agua, además, con dos episodios en el vertimiento, el primero sin que se presente ningún tipo de tratamiento eso quiere decir que las características del agua residual que transitan por el alcantarillado se entregan directamente al cuerpo de agua o como si la planta presenta fallas y no funcionará; en el segundo evento la PTAR cumple con los límites establecidos normativamente, eso quiere decir los estipulados en la resolución 0631 de 2015.

El oxígeno disuelto para los dos escenarios cumple en la corriente de agua lo estipulado en el artículo “2.2.3.3.9.10. Criterios de calidad para preservación de flora y fauna para agua dulce fría o cálida” del decreto 1076 de 2015, el cual indica que este parámetro debe estar en 5 y 4 mg/l respectivamente, puesto que varía a lo largo del cuerpo de agua por encima de 7 mg/l.

IBER es un software de modelación complejo, en términos de información presenta altos requisitos, esfuerzo técnico y computacional. En consecuencia, la información disponible para la implementación del mismo puede no ser suficiente, poniendo en duda la fiabilidad de los resultados. Además, pueden existir errores debido a la estimación de los parámetros del modelo o la medición de las variables modeladas, asimismo se deben contemplar los errores que se pueden generar debido a fallas de muestreo, efectos de escala y no linealidades, sin dejar de lado los errores humanos asociados a la medición de los parámetros, en consecuencia, es necesario interiorizar si los datos empleados si representan los promedios espaciales y temporales requeridos para poder ejecutar el modelo.

Recomendaciones

Entendiendo que un modelo de calidad del agua es una representación matemática de procesos de transporte y transformaciones bioquímicas de una o varias sustancias presentes en el cuerpo de agua, se podría extender el área de análisis aguas arriba de la quebrada en las zonas de abastecimiento de los acueductos y aguas abajo uniendo la vertiente de la quebrada Las Juntas hasta su desembocadura en el río Amagá, para establecer el comportamiento de los parámetros a lo largo de toda la quebrada y favorecer aún más los procesos que se presentan para la transformación de los compuestos.

Es muy importante analizar la parte microbiológica - E. Coli, aunque el modelo puede simular este parámetro no se encuentran análisis de laboratorio que presenten los resultados en unidades formadoras de colonias - UFC/100ml como lo requiere el modelo, la resolución 2115 del 2007 por la cual se reglamenta el tema del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua de consumo humano exige la medición en UFC/100ml, mientras que la guía de ordenamiento del recurso hídrico superficial la cual se adopta en la resolución 751 del 2018, exige la medición de los parámetros microbiológicos en NMP/100ml, para implementar el análisis microbiológico en el modelo es necesario realizarlo en UFC/100ml tanto para los vertimientos como a lo largo del cuerpo de agua.

Para el uso del programa se recomienda contar con una máquina de trabajo (Computador) con buena capacidad para procesar los datos, además se debe tener presente la activación de todos los parámetros en el módulo de calidad de agua, aunque se introduzcan valores de cero, ya que de lo contrario el programa podría no ejecutarse de manera exitosa.

Implementar programas de simulación es una herramienta que puede ser indispensable en la toma de decisiones referente a posibles afectaciones a los cuerpos de agua, los usos actuales y potenciales de agua y suelo, los procesos dominantes que afectan de manera representativa la calidad del agua, además de los sitios donde se aprovechen los recursos naturales a lo largo del cuerpo de agua o como insumo para la gestión del riesgo en el vertimiento.

Con respecto a las constantes que emplea el modelo se podría realizar un estudio para validarlas y con ello reducir el sesgo con respecto al comportamiento real de las condiciones que presenta el cuerpo de agua objeto de estudio.

Es importante que para las modelaciones se tenga en cuenta el efecto de la sedimentación, puesto que los lodos resultantes de este fenómeno pueden afectar el comportamiento de varios sustratos.

Referencias

- Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. (2018). PLAN DE SANEAMIENTO Y MANEJO DE VERTIMIENTOS DEL MUNICIPIO DE TITIRIBÍ. Medellín, Colombia.
- Bladé Castellet, E., Cea, L., Corestein Poupeau, G. T., Escolano, E., Puertas Agudo, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. & Coll, A. (2014). "IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30 (1), 1-10.
- Bolívar Fandiño, J. A., Pineda Toro, D. M. & Salcedo Herrera, I. G. (2019). Análisis de riesgo por inundación frente a escenarios de cambio climático a partir de la modelación hidrodinámica y de calidad de agua en IBER - 2D de un tramo de la microcuenca quebrada Resaca - Palestina del barrio Duitama, Usme. Universidad de La Salle. Bogotá, D. C. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1202
- Cea, L., Bermúdez, M., Puertas Agudo, J., Bladé Castellet, E., Corestein Poupeau, G. T. Conde, A., Bockelmann-Evans, B., Ahmadian, R. & Escolano, E. (2016). IberWQ. Herramienta numérica para la simulación 2D de la calidad de aguas en ríos y estuarios. Módulo de calidad de aguas. Retrieved November 15, 2022, from https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos_hidraulica11.pdf
- Corantioquia (2018a). PLAN DE ORDENACION Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DE LOS DIRECTOS RÍO CAUCA – RÍO AMAGÁ QUEBRADA SINIFANÁ. Medellín.
- Corantioquia (2018b). FORMULACIÓN DE PLANES DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO – PORH EN LOS RÍOS AMAGÁ, MULATOS E ITÉ - Diagnóstico. Medellín.
- Corantioquia (2019). PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO 2019 – 2029 PARA EL RÍO AMAGÁ. Resumen Ejecutivo. Medellín.
- Duque Guarín, M. C. (2021). Evaluación de los proyectos de infraestructura de saneamiento hídrico: colectores y plantas de tratamiento de aguas residuales en los diferentes municipios de la jurisdicción de Corantioquia. *Práctica Empresarial*. Universidad de Antioquia, Medellín-Antioquia.
- García Rodríguez, M. A. & Ruíz Gómez, D. V. (2018). Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en dos dimensiones del cuerpo hídrico léntico zona sur del humedal Capellanía, localidad de Fontibón, Bogotá D.C. Colombia con el software Iber. Universidad Santo Tomás. Bogotá, D. C.
- Gronewold, Andrew D. & Wolpert, Robert L. Modeling the relationship between most probable number (MPN) and colony-forming unit (CFU) estimates of fecal coliform concentration, *Water Research*, Volume 42, Issue 13, 2008, Pages 3327-3334, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.04.011>.
- Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales [Recurso electrónico] / Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico. Textos: González Parra, Juan

- Diego; Hernández Suarez, Juan Sebastián; coordinador: Buitrago Aguirre, Claudia Liliana. Bogotá, D. C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018.
- HYDRA ingeniería Limitada. (2003). Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado Área Urbana del Municipio de Titiribí. Medellín-Antioquia.
- Iber (2015). Manual de referencia del módulo de calidad de aguas Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas.
- Jiménez Ramos, A. M. (2018). Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural, mediante la implementación de un modelo computacional hidráulico y de calidad de agua. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D. C.
- Kyung Hwa Cho, Dukki Han, Yongeun Park, Seung Won Lee, Sung Min Cha, Joo-Hyon Kang, Joon Ha Kim. Evaluation of the relationship between two different methods for enumeration fecal indicator bacteria: Colony-forming unit and most probable number, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 22, Issue 6, 2010, Pages 846-850, ISSN 1001-0742, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60187-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60187-X).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2009). Gestión del riesgo y desarrollo territorial sostenible. Bogotá, Colombia.
- Pineda Blanco, H. M. (2022). Evaluación del monitoreo a la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el período comprendido entre los años 2012- 2021. *Práctica Empresarial*. Universidad de Antioquia, Medellín-Antioquia.
- Rubio Giraldo, A. M., Amezquita Bautista, L. M., & Martínez Torres, E. J. (2017). Determinación de la capacidad de asimilación del vertimiento de la PTAR del municipio de Tenjo Cundinamarca en la quebrada Churuguaco mediante el modelo Qual2kw. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Rauch, W., Henze, M., Koncsos, L., Reichert, P., Shanahant, P., Somlyódy, L y Vanrolleghem, P. (1998). *River Water Quality Modelling: I. State of the art*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027312239800660X>
- SÁNCHEZ CÁRDENAS, N. (2015). ESTIMACIÓN DE CONSTANTES DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA EN EL RÍO TEUSACÁ. Proyecto de grado. Universidad de los Andes, Bogotá-Cundinamarca.
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U.
- TE CHOW, V. (2005). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS* (1a. ed.). SANTAFE DE BOGOTÁ: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- Vargas Franco, V. (2007). *Estadística Descriptiva para Ingeniería Ambiental con SPSS*. Cali, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia.

Anexos

Anexo 1. Vertimientos puntuales que cuentan con alcantarillado en la cabecera municipal de Titiribí.

