

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS IBER Y QUAL2K PARA LA SIMULACIÓN DE LA
CALIDAD DEL AGUA EN UN TRAMO DE LA CUENCA DEL RÍO OCOA,
VILLAVICENCIO, COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO
HÍDRICO



CAROLINA MORALES CÉSPEDES
REINA LUZ VERGARA MORERA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS IBER Y QUAL2K PARA LA SIMULACIÓN DE
LA CALIDAD DEL AGUA EN UN TRAMO DE LA CUENCA DEL RÍO OCOA,
VILLAVICENCIO, COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO
HÍDRICO

CAROLINA MORALES CÉSPEDES
REINA LUZ VERGARA MORERA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingenier Ambiental

Asesor
CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA
PhD. MSc. Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P
Rector General

P. EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P
Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P
Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE
Decano Facultad Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de Facultad de Ingeniería Ambiental

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo de Grado

DIEGO ANDREY CORTES NARANJO

jurado

JAIR ESTEBAN BURGOS

jurado

Villavicencio, marzo, 2022

Dedicatoria

Dedicó este trabajo principalmente a Dios, por permitirme llegar hasta esta parte de mi vida que es tan importante para mi futuro.

A mi madre y hermanos que fueron mi apoyo incondicional durante mi tiempo de formación académica, por darme los mejores consejos y haberme inculcado buenos valores, hábitos y disciplina, que me ayudaron a salir adelante en los momentos más difíciles. A mi hija porque es mi acompañamiento y razón más grande para lograr mi meta

A mi familia en general que me brindó su apoyo en todo momento para salir adelante en mi proceso de formación profesional.

Reina V.

Agradezco a Dios y la virgen por darme la oportunidad de lograr culminar esta etapa tan importante en mi vida como lo es mi formación como profesional, a mi madre por su apoyo incondicional, acompañamiento, amor y cariño las cuales me dieron las fuerzas para sacar adelante mi carrera, a mi hermana por motivarme a seguir su ejemplo porque gracias a su sabiduría y paciencia he logrado vencer los obstáculos que se han venido presentando, agradezco de todo corazón a mi familia puesto que son mi motor de arranque en cada una de las metas que me propongo, a Julián por su apoyo y cariño en esta etapa de mi vida. Adicionalmente retribuyó a todos mis docentes quienes formaron una parte muy importante, en el desarrollo de mi carrera, me brindaron las bases y el conocimiento a lo largo del pregrado, pero en especial al profesor Christian José Rojas Reina por su acompañamiento, guía en este trabajo.

Carolina M.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por que fue nuestra guía y aliento para continuar todos los días en el proceso de formación hasta llegar a culminar esta fase de nuestras vidas.

Agradecemos a nuestros padres, por el esfuerzo, confianza y apoyo que nos brindaron durante el proceso de aprendizaje.

Gracias a nuestro director el Doctor Christian José Rojas Reina, por el acompañamiento, dedicación, tiempo, conocimiento y experiencia que nos brindó durante todo el desarrollo de la investigación, por darnos su voto de confianza y brindarnos sus saberes.

A mi hermano Francisco, no me alcanzan las palabras para agradecerle la oportunidad de terminar esta meta en mi vida, y a mis hermanos Lucero y Juan José, porque siempre estuvieron acompañándome durante el proceso de formación.

A Sebastián, no me alcanzan las palabras para expresar lo agradecido que estoy su voz de aliento para culminar este proceso.

A mi madre Aurora y a mi hermana Derly, les agradezco infinitamente por creer siempre en mí y apoyarme incondicionalmente en cada una de las decisiones que tomo, que no me alcanzara la vida para pagarles su dedicación y esmero para hacer de mí una mejor persona.

A la Universidad Santo Tomás, por habernos permitido formarnos en ella y al personal que fue parte del proceso, en especial a la Facultad de Ingeniería Ambiental y su personal docente, por los conocimientos brindados, durante todos estos años.

Finalmente, gracias a todas las personas que nos ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto y a quienes se dedicaron el tiempo para leer este trabajo de grado.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	13
Abstract.....	14
1. Introducción	15
2. Planteamiento del problema.....	18
2.1 Descripción del problema.....	18
2.2 Formulación en torno al problema	19
3. Objetivos.....	20
3.1 Objetivo general	20
3.2 Objetivos específicos.....	20
4. Justificación	21
5. Alcance del proyecto.....	22
6. Antecedentes	23
7. Marco de referencia	27
7.1 Marco teórico	27
7.1.1 Modelos de calidad del agua	27
7.1.2 Modelo Qual2K	27
7.1.3 Modelo Iber.....	30
7.3 Marco legal.....	33
8. Metodología	35
8.1 Fase 1: Factibilidad de los modelos	35
8.1.1 Recolección de información secundaria:	35
8.1.2 Recolección de Información Primaria:	35
8.2 Fase 2: Validación en el proceso de la modelación y simulación	36
8.2.1 Proceso de construcción de la simulación:	36
8.2.2 Calibración del modelo:.....	36

8.3	Fase 3: Análisis de la comparación de los modelos	37
8.3.1	Simulación de escenarios	37
8.3.2	Análisis de los resultados	37
8.3.3	Propuesta para el uso del modelo más idóneo	38
9.	Resultados	40
9.1	Fase 1: Factibilidad de los modelos	40
9.1.2	Recolección información primaria.....	41
9.2	Fase 2: Validación en el proceso de la modelación y simulación	49
9.2.1	Proceso de construcción de la Simulación.....	49
9.2.2	Calibración del modelo	57
9.3	Fase 3: Análisis de la comparación de los modelos	60
9.3.1	Simulación de escenarios	60
9.3.2	Análisis de los resultados.....	73
9.3.3	Propuesta para el uso de los modelos más idóneo	81
	Conclusiones	84
	Recomendaciones	86
	Bibliografía	87
	Anexos	87

Listado de Figuras

	Pág.
Figura 1: Línea de tiempo.....	26
Figura 2: Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales.....	34
Figura 3: Flujograma de metodología.....	39
Figura 4: Comportamiento de la temperatura en los puntos 1)Puente vía Acacias, 2)Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3)Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4)Murujuy	43
Figura 5: Comportamiento Conductividad en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy	43
Figura 6: Comparación datos pH en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.	44
Figura 7: Comportamiento de alcalinidad en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.	44
Figura 8: Comparación datos DBO en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.	2
Figura 9: Comparación datos DQO en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.	2
Figura 10: Comparación datos O2 Disuelto en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.	46
Figura 11: Comparación datos Sólidos suspendidos totales en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2)Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3)Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4)Murujuy.	46
Figura 12: Comparación datos Coliformes Totales en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2)Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3)Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4)Murujuy.	47
Figura 13: Comparación datos Coliformes Fecales en los puntos 1)Puente vía Acacias, 2)Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3)Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4)Murujuy.	47
Figura 14: Datos base para el modelo Qual2K.	50
Figura 15: Datos de entrada a la cabecera río Ocoa.....	51

Comparación de los modelos Iber y Qual2k	10
Figura 16: Datos iniciales del tributario Caño Buque.....	51
Figura 17: Coordenadas geográficas calculadas por el modelo.....	52
Figura 18: Hoja de Rate	52
Figura 19: Malla hidráulica realizada para la simulación del modelo Iber.....	54
Figura 20: Simulación de la calidad del agua del modelo Iber.....	57
Figura 21: Datos generados en la auto calibración	59
Figura 22: Simulación Froude para contornos y calibración del modelo Iber.....	60
Figura 23: Comportamiento de temperatura simulada en Qual2K. PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	61
Figura 24: Comportamiento de la conductividad simulada en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	62
Figura 25: Comportamiento sólidos suspendidos simulados en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	63
Figura 26: Comportamiento Oxígeno disuelto simulado en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	64
Figura 27: Comportamiento DBO simulado en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	65
Figura 28: Comportamiento DQO simulada en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	66
Figura 29: Comportamiento Alcalinidad simulada; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	67
Figura 30: Comportamiento pH simulado en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	68

Figura 31: Comportamiento Coliformes Totales simulados en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	69
Figura 32: Simulación de la temperatura en Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	70
Figura 33: Simulación del Oxígeno Disuelto en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	71
Figura 34: Simulación de la DBO en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).	72
Figura 35: Simulación CF en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	73
Figura 36: Comparación de la simulación de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	74
Figura 37: Comparación de la simulación del OD de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	75
Figura 38: Comparación de la simulación del ODS de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	76
Figura 39: Comparación de la simulación de DBO de los modelos Iber y Qual2k; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	77
Figura 40: Comparación de la simulación de CF de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).....	77

Listado de tablas

	Pág.
Tabla 1: Antecedentes estudio del arte	23
Tabla 2: Matriz de decisión de los modelos.....	38
Tabla 3: Datos secundarios recolectados por la entidad Cormacarena en fuente puntuales.....	40
Tabla 4: Datos secundarios recolectados por la entidad Cormacarena en fuentes difusas.	41
Tabla 5: Datos primarios recolectados en fuentes puntuales en el río Ocoa.	42
Tabla 6: Condiciones de contorno	54
Tabla 7: Condiciones iniciales	55
Tabla 8: Coeficiente de rugosidad asociada por el modelo Iber.....	55
Tabla 9: Condiciones atmosféricas.	56
Tabla 10: Calibración AG-PIKAIA.	58
Tabla 11: Resultados de la simulación de los modelos Iber y Qual2K	73
Tabla 12: Índices estadísticos para la valoración del modelo Qual2k Índice Resultado.	80
Tabla 13: Índices estadísticos para la valoración del modelo Iber Índice Resultado	81
Tabla 14: Cuadro de criterios en la matriz de decisión.....	82
Tabla 15: Variables de modelación del Qual2k.....	95

Resumen

Actualmente en la Región del Meta no se implementa el uso de modelos hidrológicos para la gestión integral de los recursos hídricos como el estudio de la calidad del agua en cuanto al comportamientos de los parámetros físico químicos y biológicos de un río. Por lo cual el presente estudio se enfoca en el uso y análisis de la simulación de los modelos Iber versión 15.0.1 y Qual2k versión 5.1, utilizando sus variables, modo de implementación y puntos de muestreo de información primaria recolectada en campo y llevada al laboratorio de la Universidad Santo Tomás y datos de calidad del agua de la corporación ambiental regional (CAR), la evaluación de los dos modelos hidrológicos es que cumplan con la función de modelar el río Ocoa de la ciudad de Villavicencio, como primera instancia se estudió que estos dos modelos tuvieran similitudes en cuanto a la simulación de los parámetros de calidad de agua para lograr la comparación de los resultados de cada uno con los datos suministrados que son los recolectados de información primaria y secundaria. A continuación, se procedió a validar el proceso de modelación y simulación en cada uno de los modelos, teniendo en cuenta el nivel de dificultad y el alcance en el desarrollo para la obtención de resultados. Posteriormente se calibraron los modelos para conseguir la estimación de los parámetros mediante la comparación de la información recolectada, y ya con esto se realizó una validación acompañada de un análisis de sensibilidad. En la simulación el modelo Qual2k arrojó valores aproximados de temperatura en un 98%, OD en un 88%, DBO en un 88% y CFU en un 90% y en el modelo Iber generó valores aproximados en temperatura 94%, OD de 94% por encima, DBO 94% y en CFU no dieron resultados representativos. Finalmente se realizó el análisis de comparación para concluir cuál de los dos modelos es viable y confiable para pronosticar el estado de calidad del agua de un río, que para este caso es el río Ocoa. Como resultados se obtuvo la simulación del río Ocoa de los dos modelos, resaltando el Qual2k como propuesta de uso en la entidad ambiental como gestión del recurso hídrico ya que este no requiere de datos geoespaciales detallados lo que facilita su manejo y desarrollo además de esto es gratuito y accesible para cualquier persona, cuenta con una guía.

Palabras claves: modelos hídricos, simulación de la calidad del agua, sensibilidad del modelo, administración del recurso hídrico.

Abstract

Currently, in the Meta Region, there is no management of hydrological models for the comprehensive management of water resources such as the study of water quality in terms of the behavior of the physical, chemical, and biological parameters of a river. The present study focuses on the use and analysis of the simulation of the Iber and Qual2k models using their variables, implementation mode, and sampling points of primary information collected in the field and taken to the laboratory of the Universidad Santo Tomás and data of water quality of the regional environmental corporation (CAR). The evaluation of the two hydrological models is that they fulfill the function of modeling the Ocoa river in the city of Villavicencio. First, it was studied the parametrization of the two models, which should have similarities to achieve the comparison of the results of each one, with the supplied data that is collected from primary and secondary information. Secondly, the modeling and simulation process was validated in each model, taking into account the level of difficulty and the scope in the development to obtain results. Subsequently, models were calibrated by comparing the information collected with modeled parameters, and with this, validation was accompanied by a sensitivity analysis. Finally, the comparative analysis was realized to conclude which of the two models is viable and reliable to predict the state of water quality of a river, which in this case is the Ocoa River. As result, the simulation of the Ocoa River was obtained from the two models, highlighting Qual2k as a proposal for use in the environmental entity as water resource management since it does not require detailed geospatial data, which facilitates its management and development. In the simulation, the Qual2k model had proximity in temperature of 98%, DO of 88%, BOD of 88%, and CFU of 90% and in the Iber model the proximity in temperature was 94%, DO of 94% by above, BOD 94% and in CFU there were not representative data.

Keywords: water models, simulation of water quality, water resource management.

1. Introducción

La unidad básica de un estudio en hidrología se basa en la conformación de los elementos geográficos, geológicos y climáticos de una cuenca hidrológica, el cual es definido como “un sistema de aguas que abarca un río principal desde su nacimiento hasta su desembocadura, sus afluentes, lagos que desaguan en él, y las aguas subterráneas que reciben de ellos o les aportan agua” (Barrientos, 2006). En un concepto más amplio, una cuenca hídrica es considerada un área geográfica donde se relacionan las actividades humanas con los procesos naturales. Dicho lo anterior, estas regiones son de utilidad para el desarrollo de estudios geográficos, geoquímicos, hidrológicos y de uso de la tierra proporcionando información base para la planificación y Gestión Integrada De Los Recursos Hídricos (GIRH) (Dasso, y otros, 2014). Para el año 2014, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), adaptó el término de Gestión Integrada De Los Recursos Hídricos (GIRH), un instrumento de planificación, el cual permite una actuación de la autoridad ambiental, interviniendo de forma técnica los cuerpos de agua, garantizando las condiciones de la calidad del agua y la cantidad que se requiere para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos, los usos actuales y potenciales de los cuerpos de agua. La autoridad ambiental mediante una guía técnica tiene la misión de fortalecer propuestas y planes de monitoreo por medio de la utilización de programas, buscando realizar seguimiento de las fuentes hídricas mejorando la disponibilidad y calidad del agua (IDEAM, 2018).

La importancia de conocer nuestros recursos, su disponibilidad, funcionamiento, productividad, vulnerabilidad y amenazas da lugar a un buen pronóstico de lo que abarca en cuanto a las actividades o servicios que se requieran utilizar, pues así se adopta un plan de manejo acorde a sus necesidades iniciando con información fundamental y detallada de la disponibilidad y límite permitido en su utilidad. Los acontecimientos provocados por la contaminación hídrica son de preocupación hoy en día, debido al agotamiento del recurso natural. Las alteraciones climáticas causadas por el hombre han llevado a crear un enfoque multidisciplinario permitiendo comprender los cambios del agua ocasionados en zonas particulares, los cuales afectan inevitablemente la relación de los ecosistemas naturales. A nivel nacional y local el manejo de los recursos es un elemento del cual se debe disponer de una forma consciente y segura para no extralimitarse en su uso o destino y llegar a un punto limitado del recurso al no desarrollarse un plan a tiempo, cada

actividad dependiendo del proceso que se desarrolle y que disponga de grandes cantidades de agua para su producto, tiene un factor determinante para el sostenimiento del ser humano, por lo cual, la planificación y la gestión de los recursos hídricos es una estrategia de avance significativa que ofrece herramientas muy valiosas para el componente social y ambiental.

Por esta razón, los modelos de calidad del agua son una herramienta fundamental para investigar y mostrar el estado ecológico de los sistemas hídricos, además, permite predecir el resultado de las alteraciones del agua en algunas condiciones ambientales, mediante la modelación matemática de las características del agua, estimando la capacidad de tolerancia de cargas contaminantes de un río, implementando el uso de la guía nacional de la modelación del recurso hídrico superficial como instrumento de apoyo para los profesionales encargados de desarrollar, implementar, operar y revisar este tipo de modelos para la planeación y administración del recurso hídrico (MADS, 2018). Estas tecnologías como los software de modelos hidrológicos vienen diseñados con un sistema que captura todos los elementos esenciales para el conocimiento de un evento a futuro o en el tiempo estipulado del proyecto a desarrollar, a través de sistemas hidráulicos utilizando patrones de flujo de los sistemas acuáticos, el cálculo de niveles de agua y velocidad en una sección transversal sobre el río que se desea modelar de manera eficaz y menos compleja, contando con la capacidad de dar soluciones y respuestas a una amplia gama de necesidades dentro de una cuenca. Como en este caso, que damos a conocer el estado actual de un río en cuanto a sus características de calidad de agua el cual implica el grado de contaminación y afectación que tiene para quienes acceden a ella para sus necesidades básicas la cual se le realiza un estudio de origen físico-químicos y biológicos, esto, a partir de dos softwares que representan parámetros presentes, y donde la información recolectada o primaria sirve como base para describir el proceso ambiental y sus afectaciones. De esta forma se pueden planificar acciones de una manera segura para la mejora del recurso hídrico, como por ejemplo observar la calidad del agua en determinadas condiciones o perturbaciones, si es necesario implementar medidas para prevenir su deterioro, en virtud de ciertos fenómenos como el cambio climático.

Por esta razón, esta investigación utiliza los modelos Iber y Qual2K, modelos comerciales ya validados como herramientas de investigación y desarrollo que permiten visualizar el comportamiento de la calidad del agua, tomando como referente el río Ocoa. De esta forma es posible utilizar este tipo de herramienta por parte de las autoridades ambientales, para llevar a cabo

seguimientos y controles en el uso del agua, determinar su disponibilidad y calidad en escenarios futuros. Por este motivo, el objetivo principal de este trabajo es comparar dos modelos hídricos. Iber y Qual2K para la simulación de la calidad del agua en un tramo de la cuenca del río Ocoa, Villavicencio-Meta, para el uso y administración del recurso hídrico.

2. Planteamiento del problema

2.1 Descripción del problema

Colombia se caracteriza por ser un país rico en términos del recurso hídrico, ubicándose como uno de los líderes a nivel mundial en oferta de agua (Rojas, 2013), con una oferta hídrica (promedio nacional) de 2.011.655 Mm³ y Caudal total (promedio nacional) con 63.789 m³/s (Colombia, 2019), lo que implica la relevancia de realizar estudios que cuantifiquen la calidad presente en una fuente natural. El uso que se le dará al recurso determinará la calidad requerida en función de las concentraciones de los parámetros usados para la caracterización.

Existen diferentes modelos que permiten simular la calidad del agua, unos más utilizados que otros, pero a la hora de realizar la comparación de los datos simulados con los reales, existen discrepancias entre los diferentes tipos de programas de simulación disponibles (Carvajal, 2003). Adicionalmente las diferentes variables requeridas como, fuentes puntuales, fuentes difusas temperatura ambiente, precipitación y evaporación por cada uno de los diferentes programas influyen en la exactitud de los datos modelados, por consiguiente, es pertinente evaluar estas diferencias en los programas con las condiciones medibles en la región. Para adaptar las simulaciones, para la planificación de actividades de predicción y eventualidades futuras, así como para la gestión adecuada del recurso hídrico en este territorio.

Los resultados obtenidos producto de la modelación pueden variar dependiendo de la forma en que se implementa el modelo en un software, que puede representar las condiciones y parámetros biológicos como temperatura, pH, conductividad, coliformes totales, coliformes fecales, alcalinidad total, turbiedad, oxígeno disuelto, DBO, BQO, sólidos totales (ST) de la simulación diferente a otros, en función de las ecuaciones utilizadas para simularlos. La comparación y selección del modelo más adecuado para la representación de las condiciones reales del lugar de estudio, asegura que las condiciones simuladas sean las más aproximadas a la realidad (Hernández, 2016). Por consiguiente, al aplicar estos modelos matemáticos en la simulación de la calidad del agua da una gran utilidad en la gestión del recurso hídrico ya que logra dar datos más verídicos de este lo que hace que esta herramienta aumente su utilidad a la hora de aplicarlo. Para esto es fundamental contar con información que sea suficiente en cantidad y calidad, así como

seguir un riguroso protocolo de modelación que permita identificar y cuantificar las fuentes de incertidumbre. Lo anterior impone un reto para la aplicación de este tipo de modelos y resalta la necesidad de contar con unos lineamientos y criterios unificados a nivel nacional que permitan a las autoridades ambientales competentes aplicar dicha herramienta de forma efectiva (MADS, 2018) Una vez seleccionado un modelo adecuado, esta se convertirá en una herramienta útil para la administración del recurso hídrico, ya que permite simular las transformaciones y sucesos que pueden ocurrir en un cuerpo de agua superficial en diferentes condiciones posibles o hipotéticas, creando diferentes escenarios para evaluar el impacto sobre la calidad del mismo.

2.2 Formulación en torno al problema

¿Cuál de los siguientes modelos: Iber Y Qual2K, presenta mayor concordancia con la realidad al simular la calidad del agua en un tramo de la cuenca del río Ocoa, Villavicencio– Meta?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Comparar dos modelos hídricos para la simulación de la calidad del agua en un tramo de la cuenca del río Ocoa, Villavicencio-Meta, para el uso y administración del recurso hídrico.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la viabilidad para el uso de los dos modelos hídricos en el río Ocoa.
- Validar el proceso para el desarrollo de la modelación y simulación de la calidad del agua del río Ocoa con los dos modelos hídricos.
- Analizar los dos modelos hídricos para la simulación de la calidad del agua del río Ocoa para evaluar planes alternativos de control y manejo de la calidad del agua.
- Generar una propuesta de uso del modelo más idóneo para la simulación de la calidad del agua como herramienta para la gestión del recurso hídrico.

4. Justificación

A través de un modelo, que exprese el movimiento de contaminantes mediante ecuaciones teóricas, según sea el caso, se pueden predecir escenarios complejos, reemplazando el muestreo y análisis en un cuerpo hídrico, con el consecuente ahorro de tiempo y recursos.

La necesidad de comparar los modelos viene justificada, por la discrepancia entre los resultados modelados, según el modelo, a partir de una misma fuente de datos, uno u otro modelo son más sensibles a otros parámetros que otros. Por consiguiente, el análisis de los errores, en la comparación de los datos reales y modelados, nos permitió conocer la incertidumbre que presentaba el modelo (Quintero & Neira, 2008)

Para la comparación se utilizaron los modelos Iber y Qual2K, que se encuentran entre los más utilizados a nivel nacional para la modelación de la calidad del agua. Se emplearon como datos de entrada (valores reales), los datos de monitoreo del río Ocoa, debido a su importancia en la región del Meta. De esta manera se ha determinado la mejor herramienta de modelamiento entre las seleccionadas para ser utilizada en el pronóstico de la calidad del agua en escenarios futuros.

5. Alcance del proyecto

Se analizaron los modelos Iber y Qual2K para la simulación de la calidad del agua, para su aplicación en la correcta administración del recurso hídrico y para predecir escenarios futuros. El análisis de tránsito de contaminantes en el río será unidimensional.

El área de estudio se localiza en los puntos señalados con rojo de la siguiente manera: puente vía Acacias, aguas abajo desembocadura caño Maizaro, aguas abajo vertimiento Peralonso y Murujuy como se observa en la Imagen 1, mapa de ubicación (ver Anexo 1). Estos puntos fueron seleccionados, por ser puntos de vertimientos de aguas residuales provenientes de las actividades industriales, agropecuarias y de servicio, tanto en el área urbana como en el área rural.

Con los resultados obtenidos se crearon estrategias para el control de la contaminación, en este caso específicamente en la zona evaluada del río Ocoa. El tiempo para el desarrollo del proyecto fue el primer periodo del año 2019 y comienzo del segundo periodo del año 2021, de forma tal que se desarrolló el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación en el tiempo establecido.

6. Antecedentes

El uso de modelos matemáticos se ha ido desarrollando a la par del desarrollo de las computadoras, que son el hardware o soporte técnico que permite hacer el cómputo de las ecuaciones contenidas en un modelo matemático. Es por ello por lo que a pesar de que los primeros modelos de modelación de ríos se crearon en los años 50 del siglo XX (Mijares, 1990), es a partir de la década de los 80, con la masificación de los computadores personales, que se extendió su uso en la comunidad académica y profesional en general.

En la siguiente tabla, se presenta una sinopsis de trabajos de modelamiento realizados a partir de esta década y sus particularidades.

Tabla 1: Antecedentes estudio del arte

Año	Autor	Descripción
2004	Arenas Faura Gustavo	En el siguiente trabajo se empleó la validación e identificación de parámetros y los potenciales inconvenientes a los cuales está expuesta una obra de aprovechamiento hidráulico en un cauce natural. Esta investigación se enfocó en el análisis hidrodinámico y capacidad de transporte de sedimentos del río Calabí mediante modelación numérica, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo y los efectos que ocasiona en la fluvial morfología del río a partir del modelo Qual2k (Arenas, 2004).
2005	Ganoulis Jacques	La contaminación de los ríos de fuentes difusas, como las actividades agrícolas y la escorrentía superficial es una de las principales amenazas para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas a escala de captación para lo cual se realiza la simulación y modelación de estos con el fin Que los resultados obtenidos sirvan para un modelo de gestión en la cuenca del río Neckar, Alemania (Ganoulis, 2005).

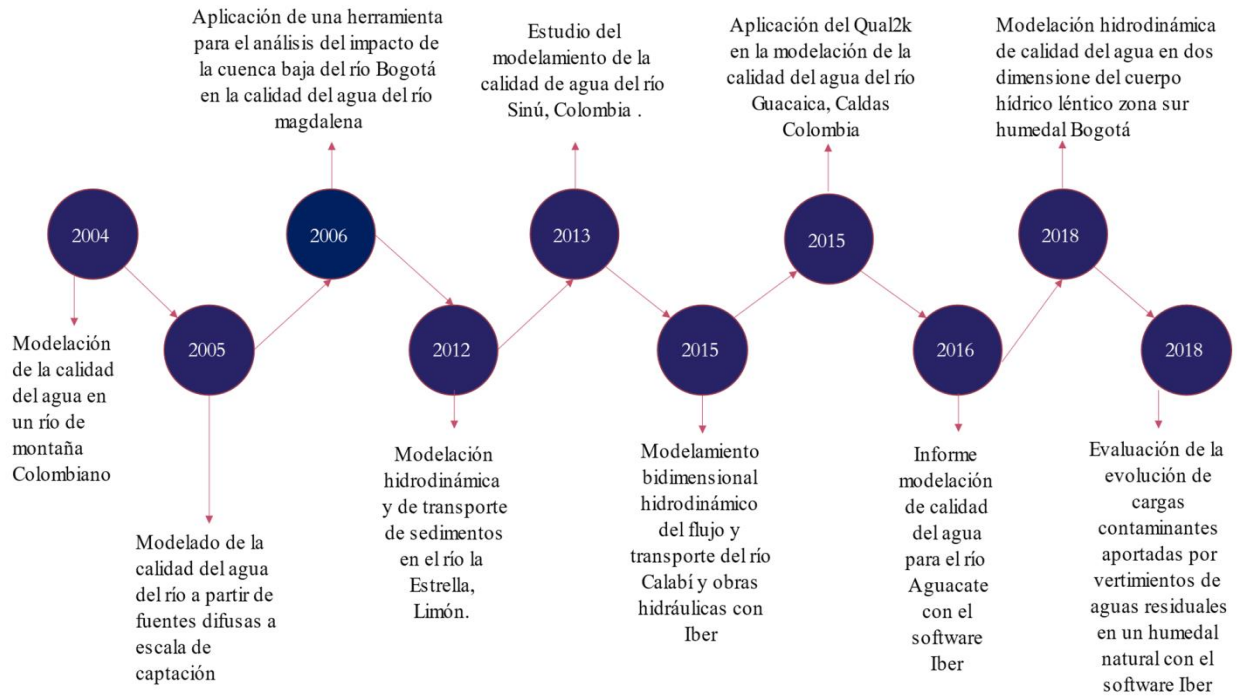
Tabla 1: Continuación

2006	Camelo Páez Héctor	Se estudia el comportamiento de los parámetros de calidad del agua del río Bogotá y el efecto que este provoca en el río Magdalena en el tramo Girardot-Honda. El proyecto busca explorar una de las nuevas características del Qual2k ya que esta facilita predecir los efectos que puede provocar una modificación en los afluentes sobre el río (Camelo, 2006).
2012	Guzmán Arias Isabel	Se realizó la simulación de transporte de sedimentos del río La Estrella donde se utilizó el programa Iber 2.4.1, que permite realizar transporte en suspensión y de fondo para flujo no uniforme (Guzmán, 2012).
2013	Arroyave Gómez Diana	En este estudio se presenta la modelación de la calidad del agua en el río Sinú, Colombia, en el tramo central entre la central hidroeléctrica de Urra y la desembocadura al mar Caribe, usando el modelo Qual2KW que incorpora el algoritmo genético PIKAIA, que permite la calibración de las constantes cinéticas (Arroyave, 2013).
2015	Salamea Guillén Tomás Andrés	Se desarrolló el análisis del comportamiento bidimensional del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos de un tramo del río Calabí y los efectos que causan la implantación de una obra con el modelo Iber (Salamea, 2015).
2015	Castro Huertas Mayra	El estudio de los efectos en la calidad del agua de las corrientes mediante herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua, se requiere en forma intensiva en países como Colombia, esto debido a que la mayor parte de los recursos hídricos no cuenta con una adecuada planificación y los conflictos por los usos están presentes en la mayoría de ellos. Se presenta en este trabajo los resultados de la calibración y confirmación del modelo de calidad del agua Qual2Kw en el río Guacaica, corriente ubicada en el departamento de Caldas, Colombia (Huertas, 2015)

Tabla1: Continuación

2016	Louis Berger	Este documento tiene por objeto evaluar la capacidad de asimilación del Río Aguacate ante la descarga de los efluentes de la PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales), de Arraiján, este a través de la elaboración de un modelo de calidad de agua mediante el Programa Iber 2.3.2; a fin de determinar la longitud en la cual la fuente receptora alcanza los estándares de calidad (ECAs) establecidos en la normativa vigente (Berger, 2016)
2018	García Rodríguez María	Puntualmente se desea que el siguiente trabajo de grado con la implementación del software Iber, que realiza modelación bidimensional, aporte a hacer un seguimiento y diagnóstico de la calidad de agua del humedal que permite ver el estado actual y compararlo con lo consignado en la normativa nacional. A su vez se planea hacer uso de variedad de factores espacio temporales, datos obtenidos de estaciones hidrometeorológicas y de visitas de campo, así como del propio PMA del humedal. (García, 2018).
2018	Jiménez Ramos Alexandra	Este estudio se simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua con el uso del software Iber 2D (Jiménez, 2018).

Figura 1: Línea de tiempo



Nota. Por Morales C, Vergara R, 2022

7. Marco de referencia

7.1 Marco teórico

7.1.1 Modelos de calidad del agua

Los contaminantes en el agua tienen esencialmente un comportamiento dinámico, al estar en constante movimiento en las corrientes de agua o por movilidad de las moléculas o partículas coloides. Estos fenómenos han sido estudiados y han dado origen a numerosas formulaciones matemáticas, las cuales muestran este comportamiento (Hernández, 2016). Entre los años 1870 y 1900 se desarrollaron los primeros trabajos sobre oxígeno disuelto, ya 1912 en los Estados Unidos comienza la preocupación por evaluar la calidad del agua, cuando el Congreso de Salud pública el direccionamiento del estudio y trabajos en saneamiento, agua residual y contaminación directa e indirecta en los ríos, lagos y otros cuerpos de agua de este país. Estudios realizados en 1914-1916 en el río Ohio, fueron la base fundamental para que Harold Streerter y Earle Phelps realizaran la modelización matemática del Oxígeno Disuelto, este estudio incluía la aplicación de una fórmula matemática de procesos asociados con el oxígeno disuelto en el río. A partir de este modelo se originaron otros trabajos a lo largo de los años, haciendo mejoras como bases matemáticas bioquímicas para el análisis de Oxígeno Disuelto en corriente y en sistemas estuarinos (Slon, 2008). Adicionalmente entidades públicas como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), perteneciente al gobierno de los Estados Unidos, han recomendado una serie de modelos matemáticos mediante los cuales se puede estudiar el comportamiento de la calidad del agua en una fuente natural como lo son Iber y Qual2K

7.1.2 Modelo Qual2K

El modelo de calidad del agua Qual2K fue creado en el año 2003 por Chapra y Pelletier para la Agencia de protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012), el modelo tiene la capacidad de simular las condiciones biológicas del agua. Usa el lenguaje de programación FORTRAN y como interfase con el usuario se trabaja con el software Excel, el cual ayuda a compilar los datos, además realiza un análisis

unidimensional. Para cada cálculo de los elementos se representa un equilibrio hidrológico, de temperatura y balance de masas el cual permite calcular las interacciones del agua con los sedimentos que contienen esta y así lograr conocer el estado en términos de calidad además de esto el modelo lo que lo hace más completo es que cuenta con un lenguaje de programación llamado MATLAB que incluye los conceptos básicos de la mayoría de los lenguajes de programación existentes pues es una herramienta que se ha destacado en los cálculos que involucran matrices otra de sus características es que ofrece acceso fácil a la graficación (Slon, 2008). Las ecuaciones que se implementaron para el modelo se pueden observar en el Anexo 2.

7.1.2.1 Algoritmo genético AG-PIKAIA. El algoritmo AG-PIKAIA, se usa para la calibración automática, este funciona mediante un proceso análogo al de la selección natural de las especies de Drawin, que busca la supervivencia, en mayor número, de los individuos más aptos. de esta manera, el Qual2k determina los valores óptimos de los parámetros cinéticos entre máximos y mínimos para cada parámetro

Para iniciar el proceso de optimización las variables de entrada del algoritmo genético AG-PIKAIA en el modelo QUAL2Kw son:

- **Random number seed:** Se introducen valores enteros conocidos como semillas que son utilizadas para la generación de números aleatorios de Fortran en un rango de 0 y 1, por ello debe introducirse rangos de variación para poder reescalarlos en los valores usados para la generación aleatoria (Vera, 2007).
- **Model runs in a population:** Número de poblaciones utilizado para cada generación, debe ingresarse un número entero, debido a que si ingresa impar este tomará por defecto el número anterior par. Puede introducirse hasta un máximo de 512 poblaciones (Vera, 2007).
- **Generations in the evolution:** Es el número total de generaciones en que se desarrolla la población (Vera, 2007).
- **Digits to encode genotype:** Corresponde al proceso de codificación del individuo utilizado para la población, para el PIKAIA se utiliza una codificación decimal de máximo 6 dígitos, este sistema binario es normalmente utilizado en algoritmos genético para codificar números susceptibles a la calibración (Vera, 2007).
- **Crossover mode:** Probabilidad de cruzamiento, equivalente a tomar cualquier cantidad de genes del cromosoma de los padres. Los cruzamientos pueden ser un-punto y dos-puntos,

por lo tanto, el modelo Qual2k presenta las opciones de cruzamiento aritmético y modos híbridos de cruzamiento que son combinaciones de un-punto, dos-puntos, uniforme y aritmético (Chapra et. al., 2008).

- Crossover probability: Representa la probabilidad total de individuos susceptibles de cruzamiento (Vera, 2007).
- Mutation mode: Valor fijado puesto que la mutación varía de acuerdo al ajuste obtenido, todos están basados en una tasa de modificación que es susceptible de modificación de acuerdo al ajuste o a la distancia sobre la respuesta obtenidas (Vera, 2007).
- Initial mutation rate: Representa la tasa de mutación inicial en el caso que se usen planes de mutación diferentes a la tasa fija, si se utiliza la opción de tasa fija este será el valor de la tasa de mutación (Vera, 2007)
- Minimum mutation rate: Representa el valor mínimo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija (Vera, 2007).
- Maximum mutation rate: Representa el valor máximo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija (Vera, 2007).
- Relative Fitness Differential: Mayor valor para la vigencia de los individuos más adaptados, se puede traducir como la presión de la selección, este parámetro indica cuánta ventaja supone tener una aptitud alta para ser elegido como padre (Vera, 2007).
- Reproduction Plan: Es el plan de reproducción que el algoritmo debe usar. La selección de los individuos en el algoritmo PIKAIA se realiza por el método de la rueda de la ruleta “roulette wheel” usando el ajuste relativo obtenido para la población como una medida de la probabilidad de selección. Permite hacer reemplazos aleatorios que se consideran más convenientes por explorar mayor espacio de búsqueda (Vera, 2007).
- Elitism: conserva los individuos más útiles de una población de padres sin modificar la generación siguiente. al colocar el valor de cero no habrá elitismo, pero el valor de uno si realizara una preservación que se usará sólo cuando el segundo o tercer plan de reproducción (Vera, 2007).
- Restart from previous evolution: depende del valor que le asignes sea el valor de cero o de uno, para cero se generarán de forma aleatoria las poblaciones iniciales en la autocalibración y para uno el programa toma una población inicial y las variables se encuentran en la hoja electrónica en el instante de la calibración (Vera, 2007).

En la calibración del modelo se define el tipo de error que se requiera emplear, o el objetivo que se desea calibrar, basado en los siguientes aspectos (Vera, 2007):

- Primero la formulación matemática encargada de realizar una diferencia cuadrática de los datos observados en oposición a los datos modelados. para generalizarlo se hace una suma de las diferencias estándares que hay en la media de los datos que se usan en la calibración, o un test estadístico para un nivel de confianza.
- El segundo aspecto se define a partir de los errores permitidos para que el modelo sea aceptado como calibrado, este error está programado dentro de la hoja “Fitness” del Qual2k y el resultado se une a la hoja “Rates” para una calibración automática.

7.1.3 Modelo Iber

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua.

Cuenta con simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. Se incluye un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo k- ϵ . El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión,

calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo; las ecuaciones implementadas se muestran en el Anexo 3.

7.1.4 Métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos

Los métodos más habituales para evaluar la confiabilidad de modelos de simulación, se basan en el análisis de diferencias entre valores medidos y simulados y en el análisis de regresión, también entre valores medidos y simulados, para ello tenemos en cuenta los siguientes índices de análisis estadístico.

- Coeficiente de Determinación (r^2): refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar

Ecuación 1: Coeficiente de determinación r^2

$$r^2 = \frac{cov(o, m)^2}{sd(o)sd(m)}$$

donde $cov(o, m)$ es la covarianza entre los valores observados y los devueltos por el modelo, $sd(o)$ la desviación típica de los valores observados y $sd(m)$ la desviación típica de los resultados del modelo. El valor oscila entre 0 y 1 y representa el porcentaje de varianza en los datos observados explicado por el modelo.

- Eficiencia del Modelo (NS): Este índice produce resultados menores o iguales a 1, si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad predictora más alta que el modelo

Ecuación 2: Coeficiente de determinación NS

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \underline{o})^2}$$

- Índice de Ajuste Modificado (W): oscila entre 0 y 1, este último valor implica un ajuste perfecto. Al igual que los anteriores es sensible a la presencia de valores extremos

Ecuación 3: Índice de ajuste modificado W

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|m_i - \underline{o}| + |o_i - \underline{o}|)^2}$$

- Relación entre la raíz cuadrada del error cuadrático (RMSE) y Error Aritmético Medio (MAE): el cociente entre el error cuadrático medio y el error absoluto medio permite determinar hasta qué punto la existencia de valores extremos está afectando al modelo

Ecuación 4: MAE - Error absoluto medio y RMSE- Error cuadrático medio

$$\frac{RMSE}{MAE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |o_i - m_i|^2}{n}}}$$

7.2 Marco conceptual

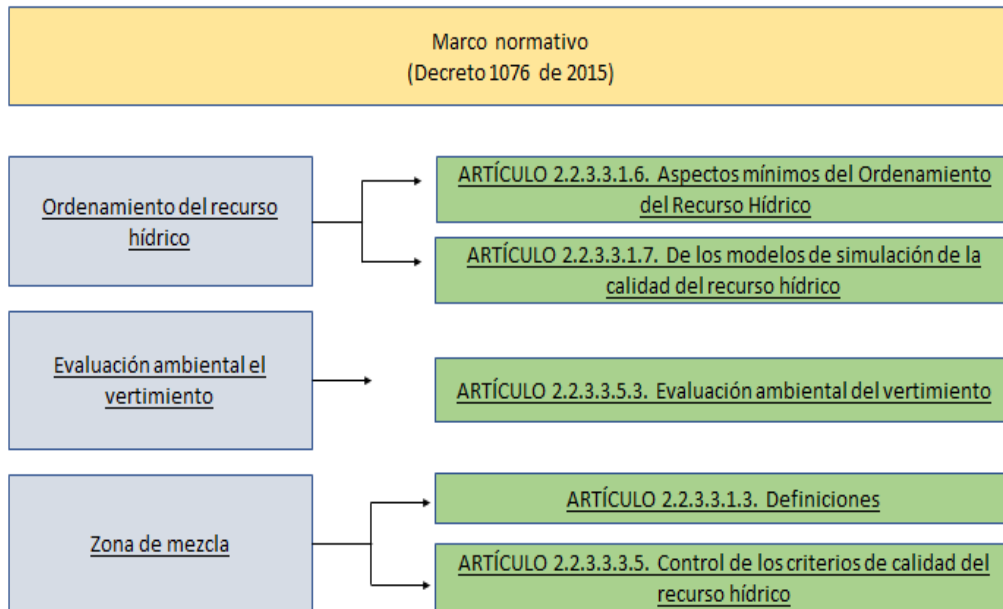
Los modelos hídricos reconocen parámetros, ecuaciones que pueden ser aplicados en cuencas con redes complejas, con diferentes usos del suelo, tipos y coberturas. Además, comprenden conceptos claves para su funcionamiento como la calibración con valores observados, la simulación de efectos ambientales, entre otros (Hugues, 2012). Los modelos de calidad de agua son series de expresiones matemáticas de la concentración de contaminantes y otros componentes que describen en un medio acuático con respecto al tiempo (Rojas, 2013). La simulación de la calidad del agua indica el medio por el cual se representa un proceso que se desarrolla a través del tiempo, por lo cual se expresa en términos de temporalidad para un conjunto de variables, la simulación se representa mediante una gráfica unidimensional, cuyo objetivo es la interpretación de un fenómeno particular en un contexto determinado (Carreño, 2015). La comparación de los

modelos fue para identificar las diferencias en cuanto a los resultados obtenidos, estos favorecerán la evaluación en cuerpos de agua con amplias variaciones de calidad en el tiempo, hoy facilitan su aplicación en condiciones particulares en la zona de estudio (Hernández, 2016). La administración del recurso hídrico es netamente necesaria para controlar y establecer metas para el uso y cuidado sostenible del recurso, en la mayoría de los casos se tienen consideraciones ambientales, manejos técnicos para beneficiar los recursos económicos y sociales (Ponce, 2016).

7.3 Marco legal

Aunque la normativa colombiana (RAS, 2017) recomienda el uso de programas de simulación en el área competente al recurso hídrico, no hay normas específicas sobre la implementación de un modelo matemático de simulación. Sin embargo, si se cuenta con una guía metodológica de los lineamientos para tener en cuenta a la hora de aplicar modelos matemáticos de simulación del estado físico del agua, la cual fue elaborada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Dirección de Gestión del Recurso Hídrico (Ocampo & Vélez, 2013).

El Decreto 1076 de 2015 establece tres casos específicos en los que se debe aplicar la modelación de la calidad del agua: elaboración de PORHs, Estimación de la Zona de Mezcla en Vertimientos y Evaluación Ambiental del Vertimiento. La siguiente figura presenta las aplicaciones mencionadas y los respectivos artículos del Decreto en donde se describen las mismas.

Figura 2: Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales.

Nota: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018.

El Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta los usos del agua y residuos líquidos en el capítulo 2 “Del ordenamiento del recurso hídrico” artículos del 23 al 24 habla de la importancia de la simulación de la calidad del agua y los parámetros mínimos para el análisis pertinente del afluente. En el Capítulo 3 “de la destinación genérica de las aguas superficiales subterráneas, marítimas, estuarios y servidas” se reglamenta el uso y manejo del agua superficial en diferentes actividades y el capítulo 4 “de los criterios para la destinación del recurso hídrico” nos habla de los criterios admisibles de la destinación del agua (Ver Anexo 4).

8. Metodología

El proyecto se desarrolló con el fin de aplicar dos modelos hidrológicos para la simulación de la calidad del agua del río Ocoa y así mismo compararlos y conocer sus características, posibles semejanzas, diferencias o relaciones y lograr conocer cuál de estos nos brindaba una mejor y amplia información sobre el estado de la calidad del agua y de la misma manera ser una herramienta importante para el uso y administración de las fuentes hídricas, para la obtención de los resultados se seleccionaron tres puntos de muestreo estratégicos del río los cuales se les midió los parámetros físico químicos que fueron una clave importante para realizar la simulación con los dos programas este lo dividimos en tres fases las cuales se desarrollaron con el siguiente propósito:

8.1 Fase 1: Factibilidad de los modelos

8.1.1 Recolección de información secundaria:

Consistió en la recolección de información, la cual fue necesaria para la fundamentación de los datos iniciales para la construcción del modelo. Inicialmente se hizo una identificación de funciones, requerimientos y limitaciones de cada uno de los modelos para determinar el dimensionamiento que requiere cada modelo y datos de la calidad del agua del cuerpo hídrico para la simulación, como variables del agua, temperatura, pH, conductividad, coliformes totales, coliformes fecales, alcalinidad total, turbiedad, oxígeno disuelto, DBO, DQO, sólidos totales (ST). Dentro de esta fase se tuvo en cuenta información de los modelos para identificar las ecuaciones matemáticas que se utilizaron para el desarrollo de la calibración, además se determinaron qué tan viables de implementar eran los modelos Iber y Qual2k utilizando las variables con las que trabaja cada modelo para la calidad del agua.

8.1.2 Recolección de Información Primaria:

Para esta fase se requirió de trabajo de campo para la toma de muestras de los parámetros anteriormente mencionados, los cuales fueron estimados a partir del análisis de las muestras en los

laboratorios de la Universidad Santo Tomás en la sede Aguas Claras de la ciudad de Villavicencio-Meta. A partir de estos análisis se realizó una comparación con los registros aportados por la corporación ambiental, esto permitió corroborar la calidad de la información secundaria.

8.2 Fase 2: Validación en el proceso de la modelación y simulación

8.2.1 Proceso de construcción de la simulación:

En los modelos se realiza un estudio de todos los componentes que contienen, con el fin de asimilar la información que requiere el modelo, como son los datos de entrada del modelo: ubicación espacial, horario, elección de sistemas de coordenadas, ingreso de puntos de muestreo, parámetros a evaluar, entre otros. Para la modelación de la calidad se distinguen dos fuentes la difusas y las puntuales: las fuentes puntuales son los puntos de muestreo aguas arriba iniciando por el punto Puente vía Acacias y aguas abajando terminado en el Murujuy, y las fuentes difusas que corresponden a los tributarios los cuales disponen información para la calidad del agua en la desembocadura del Caño Buque y el Caño Maizaro que son principales afluentes que pasan por la ciudad y son principales portadores de descarga de agua residuales. Seguidamente se realiza una construcción de la base de datos considerando un flujo permanente utilizando constantes de caudal promedio diario y la concentración de los parámetros de calidad. Se realizó una primera corrida de simulación y se evaluaron los resultados, para evaluar su concordancia con la realidad.

8.2.2 Calibración del modelo:

Esta fase consistió en calibrar los modelos que permitieron generar los resultados de la simulación de los parámetros de calidad del agua del río Ocoa. La calibración se realizó para ajustar los datos simulados hasta llegar a una aproximación de los datos reales. Se realizó una validación y un análisis de sensibilidad de los parámetros obtenidos, siendo esta la parte más importante en la implementación de esta herramienta. Para la validación de cada uno de los modelos se empleó una metodología diferente de validación. Para el modelo Qual2k se realizó por medio de algoritmo genético AG-PIKAIA por un proceso de optimización de variables para disminuir el error y permitir converger el modelo hacia soluciones admisibles para el mismo

(Puerto, 2007), y para el modelo Iber primero se analizó las condiciones de frontera del modelo que fueran las adecuadas, un perfil hidráulico conveniente para el desarrollo, luego unas bases buenas de la modelación hidráulica que nos permitió la calibración con los niveles de la estación aguas abajo con respecto a la rugosidad de la corriente la cual se utiliza es el coeficiente de rugosidad de Manning, se calibra con datos medidos en un estación medidora de niveles con respecto a los niveles que se generaron en el trabajo de igual forma se analizó la sensibilidad de los parámetros físico químicos en la formulación de los esquemas numéricos y se inició con la definición de la topografía del área a estudiar, se preparó un Modelo Digital de Elevación del río Ocoa con los cuatro puntos señalizados para el desarrollo del mismo (Berger, 2016).

8.3 Fase 3: Análisis de la comparación de los modelos

8.3.1 Simulación de escenarios

Por último, una vez obtenida la simulación fiable de las condiciones actuales (comparadas con la data observada), se efectúa la simulación de escenarios de saneamiento en relación con los objetivos de calidad esperados. Se realizó un análisis de sensibilidad, para determinar cuáles son los parámetros más sensibles del modelo, y priorizar los parámetros más relevantes en futuros muestreos para la alimentación de data del modelo.

De esta forma, se obtuvo una forma más clara de la simulación y así poder precisar medidas de control para solucionar conflictos del uso y calidad del recurso del río Ocoa. Determinar el valor real más probable de la concentración del parámetro, por su naturaleza, no se conoce, pero con el procedimiento de obtener una estimación más confiable (Slon, 2008).

8.3.2 Análisis de los resultados

En esta fase se determinó el modelo más apropiado dependiendo de los resultados de la validación del proceso para la modelación y simulación, se analizaron todos los resultados generados en la simulación y se hizo la estimación del error verificando las posibles variaciones de la media muestral de los datos secundarios con respecto a los datos simulados. Un error es la diferencia entre el valor obtenido por un método de medición, con el valor real el cual se obtiene

de una fuente más confiable (Carvajal, 2003). Los estadísticos que se utilizaron para determinar la calidad del modelo son: Coeficiente de Determinación (r^2), Eficiencia del Modelo (NS), Índice de Ajuste Modificado (W), Relación entre la raíz cuadrada del error cuadrático (RMSE) y el Error Aritmético Medio (MAE). Al determinar el porcentaje de error del modelo, se establece la efectividad del modelo para poder llegar a la toma de decisiones sobre el manejo y control de calidad del agua, en este caso sobre el río Ocoa.

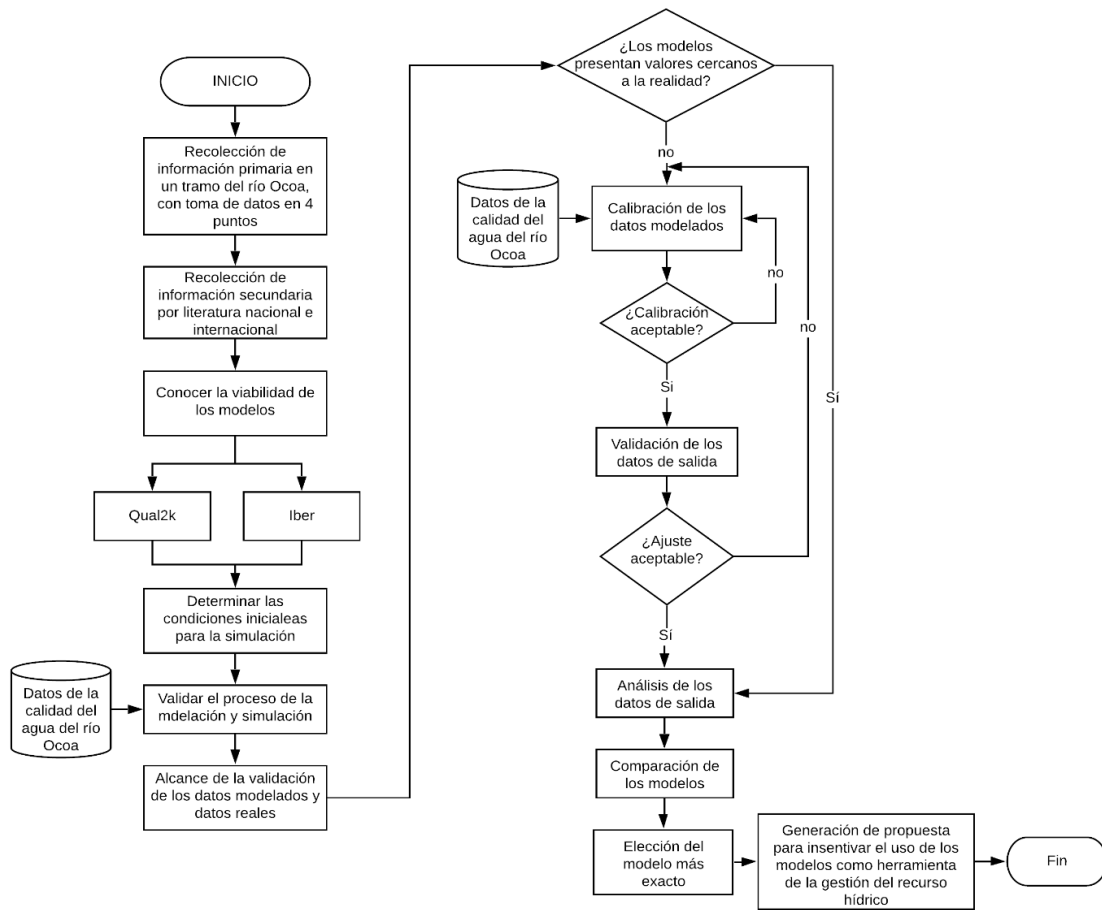
8.3.3 Propuesta para el uso del modelo más idóneo

En esta última fase con los resultados del análisis se propone el uso del modelo, el cual, en su simulación de la calidad del agua, se acerca más a la realidad y de esta manera establecer condiciones futuras como herramienta de planeación hídrica con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

Tabla 2: Matriz de decisión de los modelos

CRITERIO	Qual2K	Iber
Tiene en cuenta todos los parámetros a modelar		
Es de fácil entendimiento		
Permite realizar calibraciones		
Simula el contenido modelado		
Genera gráficas id		
Tabla 2: Continuación		
Economía en el modelo		
Disponibilidad del software		
Acercamiento a valores reales en la simulación		

Figura 3: Flujograma de metodología



Nota: Modificado y ajustado de Bejarano, León, Cuevas & Jaraba, 2015

9. Resultados

9.1 Fase 1: Factibilidad de los modelos

9.1.1 Recolección de datos fisicoquímicos y biológicos del Río Ocoa

Se solicitó información a Cormacarena, autoridad ambiental responsable de la zona de ubicación donde se encuentra el río Ocoa, los datos solicitados fueron específicamente de monitoreo hidráulico, fisicoquímicos y biológicos del efluente para el mes de marzo del año 2019, así mismo se solicitó para los tributarios Caño Buque y Caño Maizaro.

Tabla 3: Datos secundarios recolectados por la entidad Cormacarena en fuente puntuales.

FUENTES PUNTUALES						
Componentes de Calidad del Agua	Unidades	Río Ocoa	Puente via Acacias	Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro	Aguas abajo vertimiento Peralonso	Murujuy
Coordenadas	X	1064650	1041384	1064480	1079814	1089371
	Y	945865	942796	946263	947006	948101
Temperatura	°C	23.30	22.3	22.23	22.14	23
Alcalinidad Total	(mg CaCO ₃ /L)	85	3	50	56	56
Conductividad	(μS/cm)	295	103.8	232	258	253
DBO	(mg O ₂ /L)	17	5	13	14	10
DQO	(mg O ₂ /L)	63	15	54	43	22
Fósforo Total	(mg P/L)	1.84	3.53	3.53	3.53	3.53
Grasas y Aceites	(mg/L)	4.1	0.8	6.9	1	5.5
Nitratos	(mg N-NO ₃ /L)	0.5	0.3	0.5	0.7	0.08
Nitritos	(mg N-NO ₂ /L)	0.02	0.02	0.04	0.14	5
Nitrógeno Amoniacal	(mg N-NH ₃ /L)	7.44	0.5	4	5.4	3.5
Nitrógeno total Kjeldhal	(mgN/L)	9.92	5	5	7	0.26
Ortofosfatos	(mg P-PO ₄ /L)	0.51	0.05	0.09	0.1	2.2
O ₂ Disuelto	(mg O ₂ /L)	3.7	7.2	3.7	6.1	0.8
pH	(UN)	7.45	4.38	7.38	7.66	7.56
% Saturación de Oxígeno	%	56.9	80.7	40.7	69.1	63.4
SST	(mg/L)	18	4.8	60.2	31.6	37.5
Turbiedad	(UTN)	9	1	7.5	18	13
Coliformes Totales	(NPM/100ml)	241960	2909	24196	24196	24196
Coliformes fecales	(NPM/100ml)	5720	52	24196	24196	904

Nota: Ajustado al plan regional de monitoreo, 2019.

Tabla 4: Datos secundarios recolectados por la entidad Cormacarena en fuentes difusas.

FUENTES DIFUSAS			
Componentes de Calidad del Agua	Unidades	CAÑO BUQUE	CAÑO MAIZARO
Coordenadas	X	1050976	1059479
	Y	946549	947596
Temperatura	°C	22.40	22.20
Alcalinidad Total	(mg CaCO ₃ /L)	40	115
Conductividad	(μS/cm)	152.5	380
DBO	(mg O ₂ /L)	5	6
DQO	(mg O ₂ /L)	15	31
Fósforo Total	(mg P/L)	0.06	2
Grasas y Aceites	(mg/L)	1	1
Nitratos	(mg N-NO ₃ /L)	2.6	0.5
Nitritos	(mg N- NO ₂ /L)	0.02	0.04
Nitrógeno Amoniacal	(mg N-NH ₃ /L)	5.378	7.273
Nitrógeno total Kjeldhal	(mgN/L)	7.52	10.34
Ortofosfatos	(mg P-PO ₄ /L)	0.05	5.87
O2 Disuelto	(mg O ₂ /L)	6.3	1.7
pH	(UN)	7.78	7.41
% De saturación de Oxígeno	%	82.7	22.5
SST	(mg/L)	2	12
Turbiedad	(UTN)	1	5.9
Coliformes Totales	(NPM/100ml)	24196	104620

Nota: Ajustado al plan regional de monitoreo, 2019.

9.1.2 Recolección información primaria

Para obtener la información primaria se realizó salida de campo en los puntos anteriormente seleccionados en el río Ocoa, los datos fueron tomados en temporada de verano finalizando el mes de marzo, esto con el fin de comparar los datos obtenidos con los datos que suministró la entidad Cormacarena en sus monitoreos. Cabe resaltar que el día de la toma de muestras hubo precipitaciones en los días anteriores.

Se tomaron datos in situ con un medidor multiparámetro HI 9829, suministrado por de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, con el cual se tomaron datos como pH, conductividad, turbidez, temperatura, nitrato, oxígeno disuelto (como % de saturación o

concentración), TDS (Sólidos Totales Disueltos). Los datos como DBO, DQO, alcalinidad, coliformes fecales y coliformes totales fueron determinados en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.

Tabla 5: Datos primarios recolectados en fuentes puntuales en el río Ocoa.

FUENTES PUNTUALES					
Componentes de Calidad del Agua	Unidades	Puente via Acacias	Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro	Aguas abajo vertimiento Peralonso	Murujuy
Coordenadas	X	1041383	1064484	1077658	1089385
	Y	942794	946245	946781	948153
Temperatura	°C	22.1	22.4	23.6	22.2
Alcalinidad Total	(mg CaCO ₃ /L)	48	55	62	23
Conductividad	(μS/cm)	262	215	300	81
DBO	(mg O ₂ /L)	9	9.9	15.2	8.5
DQO	(mg O ₂ /L)	26	100.7	125.5	93.7
O ₂ Disuelto	(mg O ₂ /L)	7.2	7.3	7.7	6.5
pH	(UN)	7.45	7.54	8.33	7.26
SST	(mg/L)	4.8	32.65	49.63	16.47
Turbiedad	(UTN)	26.8	9.8	19	7.8
Coliformes Totales	(NPM/100ml)	11752	15537	32456	665
Coliformes fecales	(NPM/100ml)	52	8358	11066	4485

Se realizan comparaciones en los datos tomados en campo con los datos suministrados por la entidad ambiental departamental con el fin de observar las discrepancias entre estos. En la Gráfica 1 de temperatura se observa que los datos secundarios muestran un comportamiento de enfriamiento en el transcurso del río Ocoa, en comparación de los datos primarios, donde inicialmente baja la temperatura y en el punto de descarga de vertimiento en Peralonso sube la temperatura, posteriormente aguas abajo del río Ocoa, la temperatura vuelve a bajar. La temperatura sirve para conocer el estado en el que se encuentra el río Ocoa. Los factores que pueden afectar este parámetro son la radiación solar que recibe, que determina la calidad y la cantidad de luz que ha absorbido, de acuerdo con esto los seres vivos presentes allí o a sus orillas se podrán ver perjudicados o beneficiados (Tolima, 2007).

En la Figura 5, se observa que la línea de comportamiento de los datos de conductividad dados por la entidad presenta un crecimiento, en comparación con los datos de campo. En el primer punto de las muestras obtenemos un rango de 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y para las otras dos disminuyen de 215 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 81 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en comparación con las muestras por parte de la corporación de Cormacarena que esta desde 258 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 210 $\mu\text{s}/\text{cm}$, lo cual indica que éstas se mantienen dentro de un mismo rango, mientras que para las muestras obtenidas en la última muestra obtuvo una disminución notable debido a las precipitaciones en días anteriores, el dato fue de 81 $\mu\text{s}/\text{cm}$ esto significa que estas aguas son ligeramente duras porque contienen concentraciones de minerales en particular sales de magnesio. y calcio además de esto todas se encuentran dentro de lo establecido en la Resolución 2115/2007 su valor máximo permisible es de 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Villa & Castillo, 2015). La conductividad es una variable importante que se controla en diferentes sectores, ya describe la capacidad de una solución acuosa para conducir corriente en función de las sales minerales disueltas. De esta forma este parámetro indica presencia de contaminación, sin olvidar que también el suelo puede aportar sales minerales, este parámetro igualmente se ve afectado por los tipos de iones presentes, movilidad, valencia, y la temperatura (Castro, Zuñiga, & Alvarado, 2017).

Figura 4: Comportamiento de la temperatura en los puntos 1)Puente vía Acacias, 2)Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3)Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4)Murujuy

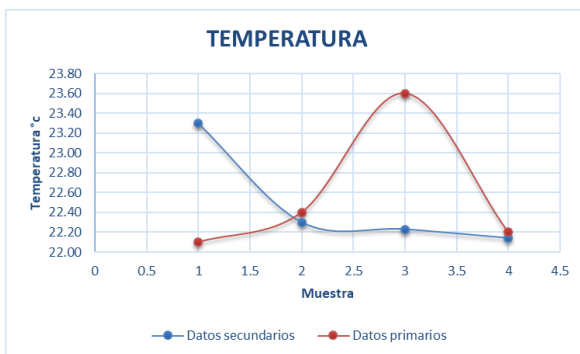


Figura 5: Comportamiento Conductividad en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy

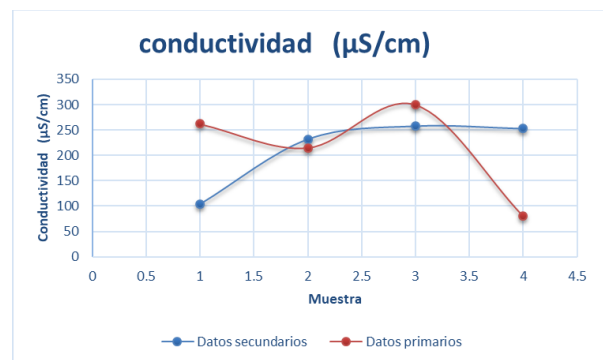


Figura 6: Comparación datos pH en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.

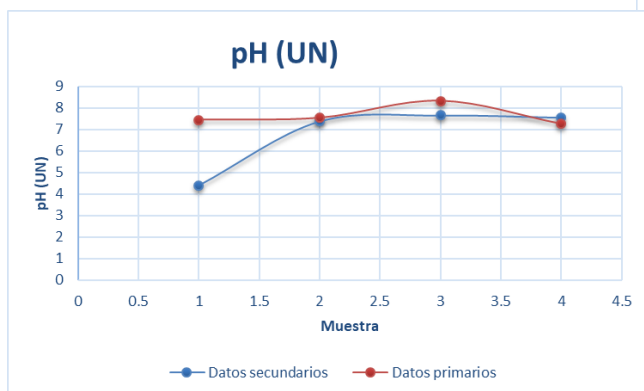
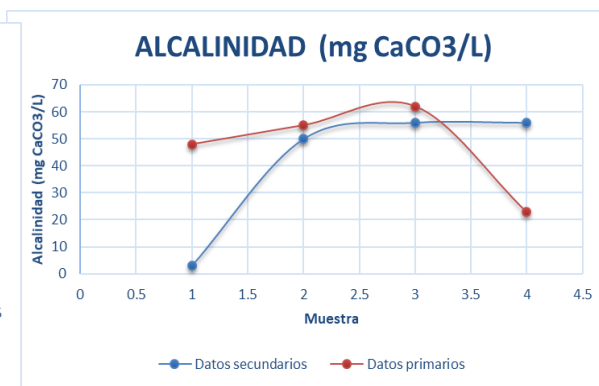


Figura 7: Comportamiento de alcalinidad en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.



El pH nos indica la acidez o la alcalinidad que hay en una fuente, y se define como la concentración de iones de hidrógeno presentes en el agua. Existe una escala desde 0 a 14, cuando una unidad de ellas disminuye el agua se vuelve más ácida, pero si al contrario este aumenta el agua se hace más básica. Para los seres vivos que habitan los cuerpos acuáticos, cualquier cambio puede representar algún daño, cuando este parámetro se aleja de la neutralidad (pH=7). Estos cambios pueden ocurrir por desechos industriales o vertederos que no tengan ningún tratamiento, ya que cambian las características puras de la fuente. En la figura 6, para el punto 1, se observa que presenta un pH de 8,33 a diferencia de las otras que se mantuvieron dentro de un rango de 7,26 a 7,78, en el agua dulce este rango significa que cuenta con valores aceptables y no perjudica a la mayoría de los organismos que se encuentren allí (Yimmy Montoya, 2011).

La alcalinidad tiene la capacidad de neutralizar ácidos o aceptar protones en el agua, en los ríos se determina la alcalinidad por la presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos entre otros. La alcalinidad no solo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de aguas naturales sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis. Como se puede observar en la figura 7, se observan diferencias en los datos primarios de los secundarios, una de las razones se debe a las lluvias dadas días anteriores a la toma de muestra de campo, no difiere mucho este parámetro en las diferentes de una muestra de la otra se encuentran balanceadas y por dentro de los

parámetros permitidos ya que para la alcalinidad los valores permisibles llegan hasta 200 mg/l (Tony M, 2016).

Figura 8: Comparación datos DBO en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.

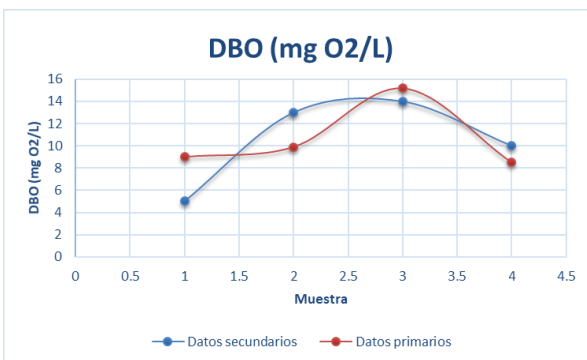
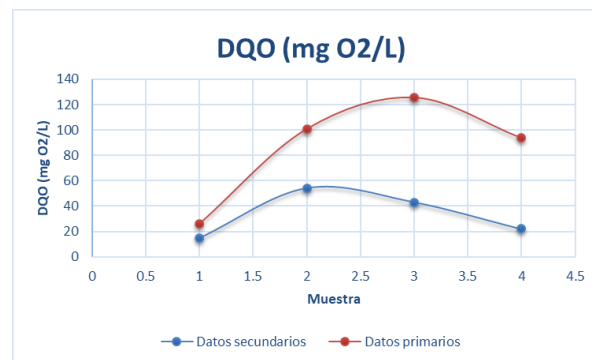


Figura 9: Comparación datos DQO en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.



La DBO es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, y se utiliza para determinar su grado de contaminación se evidencia que en los dos estudios presentes de la anterior figura 8, referente a la DBO ninguno cumple con los rangos estipulados por el ministerio de medio ambiente ya que sobrepasan los límites esto puede ser debido a los vertimientos de aguas residuales y el mal manejo que se la ha dado al río por parte de las industrias y comunidad aledaña (Sanchez, 2013).

La DQO es una medición indirecta de la cantidad de materia orgánica en una muestra, se define como la cantidad de Oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo; permite determinar las condiciones de biodegradabilidad y el contenido de sustancias tóxicas, así como la eficiencia de las unidades de tratamiento. Su determinación permite además calcular las descargas de los efectos de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Para las muestras por parte de Cormacarena tenemos que la muestra en el punto 2 es la más alta con 43 mg O₂/l mientras que la muestra 3 está con 32 mg O₂/l siendo esta la de menor grado de contaminación pero no nos quiere decir que estas cumplan con los rangos permisibles por la sanidad ya que en estos valores esta vendría siendo poco contaminada no

apta para el uso ya que podría traer afectaciones en la salud y en el ecosistema del mismo por otra parte se obtuvo valores más altos en nuestro estudio ya que la primera muestra tiene 125,5 mg O₂/l y para las siguientes 100,7 mg O₂/l y 93,7 mg O₂/l estos valores fueron tomados cerca de los puntos de descarga, por consiguiente se reflejó esta contaminación de los vertimientos, indicando un alto contenido orgánico, para lo cual no cumple con los estándares que la Resolución 2115 del 2007 tiene permitido, de acuerdo con estos datos se debería implementar instalaciones de tratamiento de aguas residuales para reducir el contenido orgánico y así proteger las aguas naturales de este río puesto que estas ponen en riesgo la salud del ser humano y deterioran los recursos naturales del mismo (Durán, 2016).

Figura 10: Comparación datos O₂ Disuelto en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.

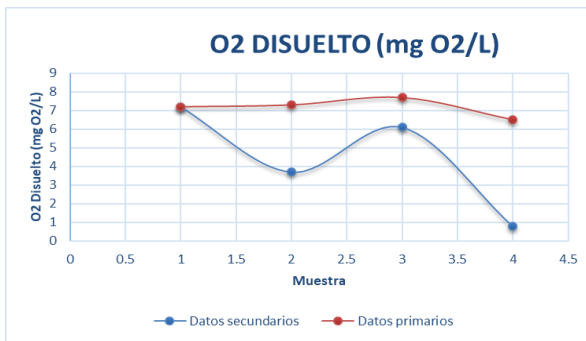
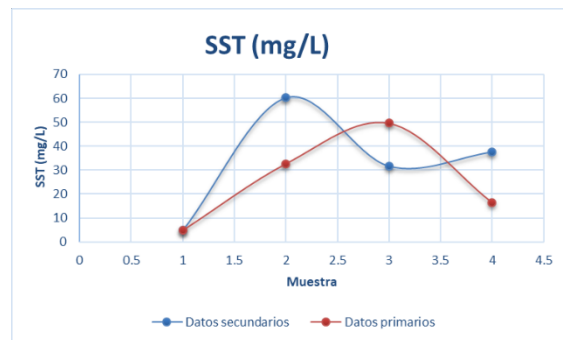


Figura 11: Comparación datos Sólidos suspendidos totales en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.



El oxígeno disuelto es uno de los exponentes más significativos para lograr conocer la calidad del agua en que este se encuentra, se le conoce como un indicador de la capacidad que tienen un río para la vida acuática su distribución depende de la turbiedad y movimiento del agua algo natural y continuo en el caso de que sea una fuente que tiene poco movimiento habrá menos presencia de oxígeno y en aguas dulces es más propicio el oxígeno que en las aguas saladas. En la Figura 10, los datos obtenidos arrojaron valores entre 6,5 a 7,7, lo que significa que se mantiene dentro del rango permitido, sin embargo en los datos proporcionados por Cormacarena, se observa que la variación en Aguas abajo del vertimiento Peralonso es la que sobrepasa el nivel con un valor de 8,8 y las otras dos mantienen un rango bajo de 3,7 y 6,1 lo que nos indica que pueden haber causas como aumentos en la temperatura del agua, florecimiento alga, desechos humanos y desechos de animales presentes que están provocando

estos niveles bajos de oxígeno lo que puede representar un riesgo en la salud para quienes consumen de esta fuente o para los seres vivos que actualmente estén allí (Boards, 2014).

Los sólidos totales disueltos indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico e inorgánico. En el punto 3 aguas abajo del vertimiento Peralonso se obtuvo un índice de 43,63 mg/l y para los siguientes puntos, localizados que son aguas debajo de la desembocadura del caño Maizaro y Murujuy, disminuyó notoriamente de 32,65 mg/l a 16,47 mg/l por lo cual difiere con el estudio de Cormacarena, donde se obtuvieron valores mayores aguas debajo de la desembocadura del caño Maizaro con 60,2 mg/l y de ahí en adelante se fue reduciendo de 31,6 mg/l a 10,6 mg/l. Es posible que esta variabilidad en los dos estudios se deba que al momento de la toma de muestras las concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos se encontraban concentradas en diferentes puntos ya que existen varios puntos de descargue de residuos. Para el presente estudio se ha utilizado el valor referencial establecido por el ministerio del medio ambiente y la resolución 2115 del 2007 para la calidad de agua la cual establece un límite de 200 – 500 mg/l para cual ninguno sobrepasa estos y está dentro de los rangos permitidos (Galán, 2010).

Figura 12: Comparación datos Coliformes Totales en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.

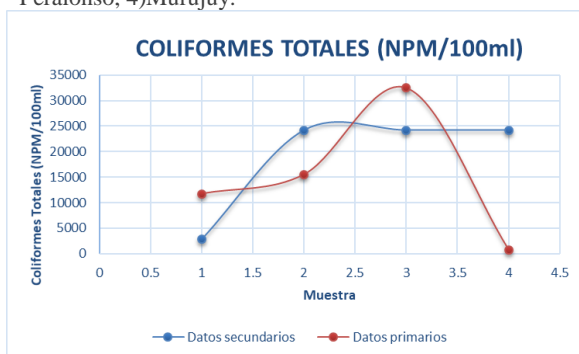
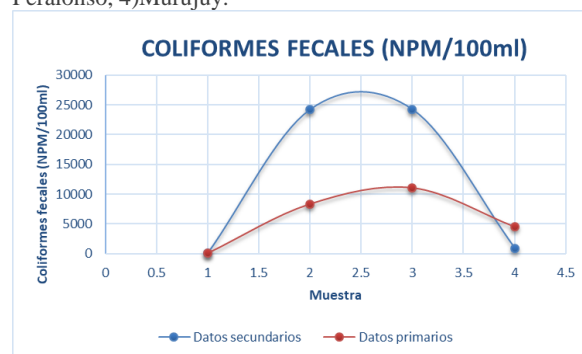


Figura 13: Comparación datos Coliformes Fecales en los puntos 1) Puente vía Acacias, 2) Aguas abajo desembocadura Caño Maizaro, 3) Aguas abajo vertimiento Peralonso, 4) Murujuy.



Este análisis bacteriológico es de gran importancia para la prevención de enfermedades en aguas contaminadas por aguas residuales u otros desechos en descomposición, que se vierten sin tratamiento adecuado. En la Figura 12, se observa que las muestras obtenidas por Cormacarena indican gran presencia de bacterias, ya que sobrepasan los límites permisibles por el Ministerio

del Medio Ambiente, lo que puede estar causando repercusiones en la salud de quienes viven aledaños al río y utilizan esta agua para diferentes tareas domésticas.

Los coliformes fecales son aquellos organismos que fermentan lactosa y que incluye bacterias del género *Escherichia* y también especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*, aunque su origen es fecal estas pueden provenir de efluentes industriales y material vegetal en descomposición. Como se evidencia en la Figura 13, en los datos obtenidos para los cuatro puntos de muestreo presentan gran variabilidad. En la muestra 3, se obtuvo un valor de 11066 NPM/100 ml y las siguientes fueron de 8358 NPM/100 ml, 4485 NPM/100 ml y para los niveles de Cormacarena las primeras dos se mantuvieron en 24196 NPM/100 ml y luego disminuye notablemente en la cuarta muestra con 41 NPM/100 ml. En ambos estudios se sobrepasaron los límites permisibles lo que puede ser consecuente por los desechos industriales, falta de alcantarillado entre otros (Poveda, 2010).

9.2 Fase 2: Validación en el proceso de la modelación y simulación

9.2.1 Proceso de construcción de la Simulación

9.2.1.1 Modelo hídrico Qual2k

- **Implementación del modelo**

El modelo Qual2K se utilizó para simular los siguientes determinantes de calidad tomados en el río Ocoa: conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, DBO, DQO, coliformes totales, SST, pH y alcalinidad. El modelo permite incluir sustancias genéricas correspondientes a otros determinantes definidos por el usuario en el cual se pueden incluir tasas de sedimentación. Seguidamente se detalla la información usada por el modelo Qual2K versión 2.12

- **Datos requeridos por el modelo**

-

En la primera hoja se da inicio al proceso de manejo de datos se inicia con información básica del modelo como son la fecha del monitoreo y el huso horario (UTC-5 para Colombia). El paso del tiempo depende del tamaño del segmento el cual corresponde ingresar en la hoja de Reach.

El número de días recomendado por Chapra y Pelletier (2008) es de al menos el doble del tiempo de viaje en el tramo de estudio y debe ser un número entero mayor o igual que 2. En este caso se escogieron 3 días para la calibración.

Los métodos para la solución general del modelo y para la solución de pH fueron dejados los que traen por defecto el software (Euler y Brent).

Se añade el nombre del río (río Ocoa) que desea modelar y añade el enlace donde se guarda el archivo, ese paso se realiza para que el programa guarde la información en el almacenamiento de datos y por defecto permita generar la simulación por el contrario aparecería error como se observa en la Figura 14.

Figura 14: Datos base para el modelo Qual2K.

QUAL2K FORTRAN Stream Water Quality Model Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier Version 2.12b1	
System ID:	
River name	Rio Ocoa
Saved file name	o_SummerAvg_zeroTribPS_TP-Chla-det_us
Directory where file saved	D:\Q2Kv2_12b1
Month	9
Day	15
Year	2019
Local time hours to UTC	-5
Daylight savings time	No
Calculation:	
Calculation step	0.1 hours
Final time	30 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Brent
Time zone	Eastern Standard Time
Program determined calc step	0.093750 hours
Time of last calculation	0.13 minutes
Time of sunrise	5:44 AM
Time of solar noon	11:48 AM
Time of sunset	5:52 PM
Photoperiod	12.14 hours

Nota: Adaptado de la hoja de trabajo Qual2k donde se información general del modelo

- **Headwater**

En esta parte de la hoja se añade información de los datos de calidad del río Ocoa al inicio del tramo recolectado por la institución Cormacarena, solicita información importante como caudal, geometría del cauce, parámetros fisicoquímicos, entre otros. Al insertar los datos de la cabecera no siempre se es necesario llenarlos todos, sin embargo, es recomendable no dejar el valor de los nitratos en cero, pues esto conlleva a que la simulación tenga errores debido a la fórmula que implementa el modelo ver Figura 15.

Figura 15: Datos de entrada a la cabecera río Ocoa.

Headwater Flow		4.636 m ³ /s										
Prescribed downstream boundary?		No										
Headwater Water Quality	Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.	
Temperature	C	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	23.30	
Conductivity	umhos	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	103.00	
Inorganic Solids	mgD/L	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	
Dissolved Oxygen	mg/L	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	
CBODslow	mgO ₂ /L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
CBODfast	mgO ₂ /L	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	
Organic Nitrogen	ugN/L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
Organic Phosphorus	ugP/L	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
Phytoplankton	ugA/L											
Detritus (POM)	mgD/L											
Pathogen	cfu/100 mL	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	2909.00	
Generic constituent	user defined											
Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
pH	s.u.	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	

Nota: Adaptado de la hoja de cálculo de cabecera donde se ingresa las condiciones de contorno y flujo del agua

El Headwater incluye datos de tributarios, para este caso se incluye los datos de afluentes que a consideración por los autores son los más importantes, debido a que estos atraviesan por medio de la ciudad. Los datos de Caño Buque fueron tomados antes de la convergencia del río Ocoa como se observa en la Figura 16, al igual que el Caño Maizaro.

Figura 16: Datos iniciales del tributario Caño Buque

<i>Downstream Boundary Water Quality (optional)</i>	<i>Units</i>	<i>12:00 a. m.</i>	<i>1:00 a. m.</i>
Temperature	C	22.40	
Conductivity	umhos	253.00	
Inorganic Solids	mgD/L	37.50	
Dissolved Oxygen	mg/L	5.50	
CBODslow	mgO ₂ /L	10.00	
CBODfast	mgO ₂ /L	22.00	
Organic Nitrogen	ugN/L	5.00	
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	3.50	
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	2.20	
Organic Phosphorus	ugP/L	3.53	
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	0.08	
Phytoplankton	ugA/L		
Detritus (POM)	mgD/L		
Pathogen	cfu/100 mL	24196.00	
Generic constituent	user defined		
Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	56.00	
pH	s.u.	7.56	

Nota: Adaptado de la hoja de cálculo de cabecera donde se ingresa las condiciones de contorno y flujo del agua

- **Reach**

Esta parte de la hoja es importante en el modelo, allí se caracterizan los segmentos matemáticos del tramo de estudio seleccionado del río Ocoa, las características fisicoquímicas, alturas, coordenadas, distancias entre tramos, pendiente del fondo y otros valores como se observa

en la figura 17. Se debe tener cuidado al ingresar los datos, deben ser consecuentes con la realidad y si no se dispone de un dato en específico se puede dejar en blanco, es importante darles nombre a los segmentos para identificar las zonas primordiales en el análisis.

Figura 17: Coordenadas geográficas calculadas por el modelo

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
Rio Ocoa (9/15/2019)
Reach Data:

Reach for diel plot:	4													
Reach Label	Downstream end of reach label	Reach length (km)	Downstream		Downstream location (km)	Elevation			Downstream Latitude					
			Latitude	Longitude		Upstream (m)	Downstream (m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds
		0		4.08	73.71	0.000		504.000	4.000	4.000	56.130	73.000	42.000	28.610
Puente via Acacias	PVA	1	12.00	4.08	73.71	12.000	504.000	338.000	4.000	4.000	53.760	73.000	42.000	29.480
Aguas abajo desembocadura	DCM	2	30.00	4.11	73.50	42.000	338.000	259.000	4.000	6.000	46.090	73.000	30.000	0.590
Aguas abajo del vertimiento	ADP	3	13.00	4.12	73.36	55.000	259.000	233.000	4.000	7.000	10.740	73.000	21.000	43.600
Murujuy	MRY	4	24.00	4.13	73.28	79.000	233.000	229.000	4.000	7.000	46.270	73.000	16.000	33.760

Nota: Adaptado de la hoja de Reach se utiliza para especificar las etiquetas de llegar, distancias y alturas.

● **Rate**

En la Figura 18, contiene todas las constantes de reacción para los procesos bioquímicos que el modelo contempla, también contiene 7 parámetros los cuales son modificables para calibrar la sensibilidad del modelo. La fórmula de reaeración del modelo es ajustable, es este caso se dejó O’connor-Dobbins debido a que las condiciones hidráulicas se ajustaron a esta fórmula.

Figura 18: Hoja de Rate

Parameter	Value	Units	Symbol
Stoichiometry:			
Carbon	40	gC	gC
Nitrogen	7.2	gN	gN
Phosphorus	1	gP	gP
Dry weight	100	gD	gD
Chlorophyll	1	gA	gA
Inorganic suspended solids:			
Settling velocity	1.304	m/d	v_s
Oxygen:			
Reaeration model	O’Connor-Dobbins		
User reaeration coefficient α	3.93		α
User reaeration coefficient β	0.5		β
User reaeration coefficient γ	1.5		γ
Temp correction	1.024		θ_a
Reaeration wind effect	None		
O2 for carbon oxidation	2.69	gO ₂ /gC	f_{oc}
O2 for NH ₄ nitrification	4.57	gO ₂ /gN	f_{on}
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential		
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60	L/mgO ₂	K_{soxf}
Oxygen inhib model nitrification	Exponential		
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sona}
Oxygen enhance model denitrification	Exponential		
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sodn}
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential		
Oxygen inhib parameter phyto resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sop}
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential		
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sob}

Nota: Tomado de documento Excel Headwater, modelo Qual2k Versión 2.12.

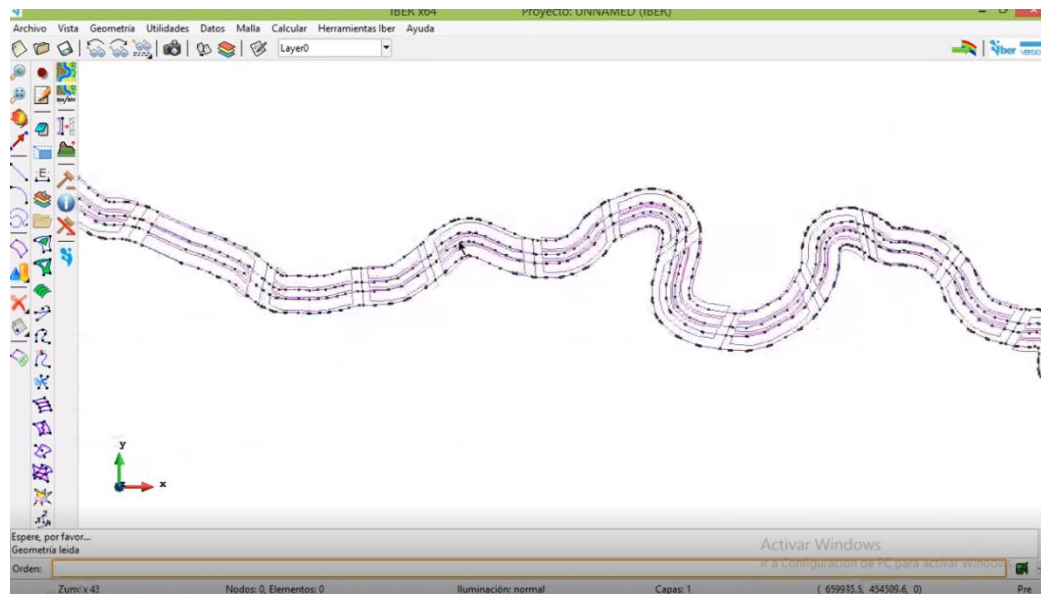
Teniendo en cuenta que los valores están por defecto en el modelo, fue necesario conocer de los valores que están constantes tomando información según su ubicación geográfica. Es importante mencionar que las constantes se rigen en los resultados directamente al alterar una constante de forma incorrecta puede implicar que los resultados sean equivocados.

9.2.1.2 Modelo hídrico Iber

- **Implementación del modelo**

Esta herramienta se utiliza para simular la calidad del agua y transporte de sedimentos en ríos, canales, entre otros. Este modelo permite añadir los datos de Temperatura, Escherichia Coli (E. Coli), Oxígeno disuelto (OD), Demanda biológica de oxígeno carbonosa (DBOC), Carbono inorgánico total (Ctot), Alcalinidad (Alk), pH, los cuales son el objeto de estudio definido para calidad del río Ocoa, el modelo se aplica luego de la modelación hidrodinámica del sistema de estudio.

Modelación hidrodinámica: Para el desarrollo hidrodinámico es importante la creación de la malla de cálculo, en este proceso se implementan diversos elementos geográficos el cual son la base para la simulación permitiendo que el nivel del detalle sea mejor en los resultados. El modelo requiere de archivos georreferenciados, los cuales se obtuvieron de herramientas externas, permitiendo generar la topografía del cauce. Las condiciones iniciales y de contorno son aplicadas al modelo, así como el coeficiente de rugosidad. Como condición de contorno de entrada, Iber permite la incorporación de curvas de caudal o niveles de agua en el tiempo. En el caso de las condiciones de contorno de salida, se puede optar por una condición de tipo suscritico. En la siguiente figura se observa una parte del enmallado generado.

Figura 19: Malla hidráulica realizada para la simulación del modelo Iber

Nota. Por Morales C, Vergara R, 2022

- **Datos requeridos por el modelo para el enmallado**

Condiciones de contorno: Se definen las coordenadas de los puntos de muestreo con su caudal respectivo, para este punto se tiene en cuenta que se toman caudales de ingreso y de salida, aunque en el aforo en el punto 4 el caudal es menor a los anteriores puntos el programa exige un dato mayor por lo tanto se toma el acumulado de los caudales de los puntos.

Tabla 6: Condiciones de contorno

N° PUNTO	DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN - WGS84 UTM 18 N		CAUDAL TOTAL (m ³ /s)
		X	Y	
1	Puente vía Acacias	643812.49	450901.66	0.43
2	Aguas abajo desembocadura del Caño Maizaro	664716.85	454101.34	5.56
3	Aguas abajo del vertimiento	683312.9	455059.31	10.29
4	Murujuy	693056.59	456462.34	2.18

Condiciones iniciales: en las condiciones iniciales se tiene en cuenta las cotas del agua en metros y el ancho del río de cada uno de los puntos como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Condiciones iniciales

N° PUNTO	DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN - WGS84 UTM 18 N		COTA DE AGUA (m)	ANCHO ESTABLE DEL RÍO (m)
		X	Y		
1	Puente vía Acacias	643812.49	450901.66	0.278	10.0
2	Aguas abajo desembocadura del Caño Maizaro	664716.85	454101.34	0.252	34.0
3	Aguas abajo del vertimiento	683312.9	455059.31	0.222	100.0
4	Murujuy	693056.59	456462.34	0.221	20.0

Usos del suelo: El modelo Iber dispone de un sistema de asignación automática, de modo que, mediante un sistema de asignación remota, dependiendo del archivo “raster” se asocia un código a cada elemento de la malla, esta metodología requiere de una base de datos externa, el cual se transformó mediante herramientas SIG. En este caso el coeficiente de rugosidad aplicado por el modelo es de Ven Te Chow. Los valores en negrilla fueron los implementados en el modelamiento.

Tabla 8: Coeficiente de rugosidad asociada por el modelo Iber

Uso del suelo	Land use	Valores
Río	River	0.025
Suelo desnudo	bare soil	0.023
Pradera	Brushland	0.050
Bosque	Forest	0.120
Arena/arcilla	sand / clay	0.023
Arbustos	Brush	0.050
Arboles	Trees	0.120
Vegetación urbana	urban vegetation	0.032
Vegetación dispersa	sparse vegetation	0.080
Vegetación densa	dense vegetation	0.180
Hormigón	Concrete	0.018
Sin clasificar	unclassified	0.032
Infraestructura	infrastructure	0.020
Edificios aislados	single buildings	0.000
Industrial	Industrial	0.100
Residencial	Residential	0.150

Nota: Ven Te Chow, Tabla 5.-6-10.

Modelación de la calidad del agua:

- **Datos requeridos por el modelo para calidad del agua**

Condiciones iniciales y de contorno: las condiciones iniciales para la calidad del agua del río Ocoa necesarias por el modelo, se necesita de variables atmosféricas y los datos de calidad de información secundaria observados en la Tabla 4. El modelo permite predecir la evolución temporal y espacial de las concentraciones de las variables de estudio. La temperatura del agua influye en prácticamente todas las cinéticas de reacción, esta se da a partir de cálculos en el modelo basa en de datos meteorológicos o bien introducirla como dato de entrada. Por su parte, la salinidad influye en la concentración de saturación de oxígeno disuelto y en la tasa de desaparición bacteriana, y puede asimismo calcularse con el modelo o introducirse como dato por el usuario. Además, a partir de la combinación del carbono orgánico total y de la alcalinidad, el modelo puede estimar el pH del agua. Asimismo, a partir de la salinidad (o sólidos totales disueltos), se puede estimar la conductividad del agua.

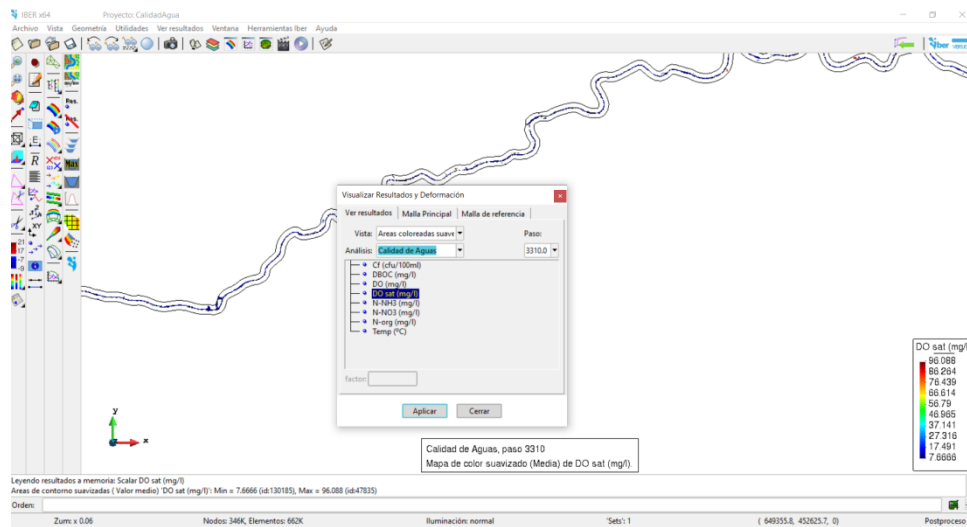
Tabla 9: Condiciones atmosféricas.

VARIABLES ATMOSFÉRICAS			
Radiación (W/m²)	Viento (m/s)	Humedad Relativa (%)	Temp (°C)
187.50	1.8	72.58	24

Nota: climate data.org – Villavicencio

Nota: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

Simulación de modelo Iber: con la información ya suministrada por el programa, se realiza la corrida de la simulación de la calidad del agua, procesando los datos para generar los cálculos, según las ecuaciones empleadas en el modelo, como se observa en la figura 9, las principales salidas de Iber son de tipo raster pudiéndose importar del programa como imágenes o como archivos identificables por aplicaciones SIG.

Figura 20: Simulación de la calidad del agua del modelo Iber

Nota. Por Morales C, Vergara R, 2022

9.2.2 Calibración del modelo

- **Modelo Qual2k**

El modelo contiene adicionalmente en la hoja "rates", esta herramienta tiene como nombre PIKAIA (Charbonneau and Knapp), realiza una técnica metaheurística, optimizando la matemática dentro de los algoritmos genéticos, con este instrumento se realiza la calibración de variables cinéticas que intervienen en el proceso de la modelación.

El funcionamiento del algoritmo genético se basa en entender el uso de las variables de entrada al modelo, en la hoja "Fitness" cómo ajuste y en la hoja denominada "Auto-calibration", con estos 3 aspectos interactúa el algoritmo genético PIKAIA

Tabla 10: Calibración AG-PIKAIA.

Auto-calibration genetic algorithm control:		
Random number seed	123456	seed
Model runs in a population (<=512)	100	np
Generations in the evolution	200	ngen
Digits to encode genotype (<=6)	5	nd
Crossover mode (1, 2, 3, 4, 5, 6, or 7)	3	icross
Crossover probability (0-1):	0.85	pcross
Mutation mode (1, 2, 3, 4, 5, or 6)	2	imut
Initial mutation rate (0-1):	0.005	pmut
Minimum mutation rate (0-1):	0.0005	pmutm n
Maximum mutation rate (0-1):	0.25	pmutm x
Relative fitness differential (0-1):	1	fdif
Reproduction plan (1, 2, or 3):	1	irep
Elitism (0 or 1):	1	ielite
Restart from previous evolution (0 or 1):	0	irestart

Nota: Tomado de documento Excel Rates, modelo Qual2k Versión 2.12

En la calibración de los datos del río Ocoa, se observa en la Tabla 10, los algoritmos genéticos PIKAIA de control en la calibración, esto depende la corrida generada en el proceso de validación. Estos datos cambian dependiendo de la información suministrada de las fuentes puntuales y fuentes difusas. El error que indica el programa sobre los datos fue de 0.6% indicando el valor allegado a la realidad. Para el análisis de calidad del río Ocoa, se tiene en cuenta el valor cercano a la realidad y si los parámetros modelados generan una representación para un control y manejo del agua con el fin de brindar solución a la problemática ambiental del recurso hídrico presente en la ciudad de Villavicencio.

Figura 21: Datos generados en la auto calibración

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model

Output from the genetic algorithm optimizer for automatic calibration

Note: the output values in this sheet are only refreshed when 'Run Auto-cal' is run from the 'Rates' Worksheet

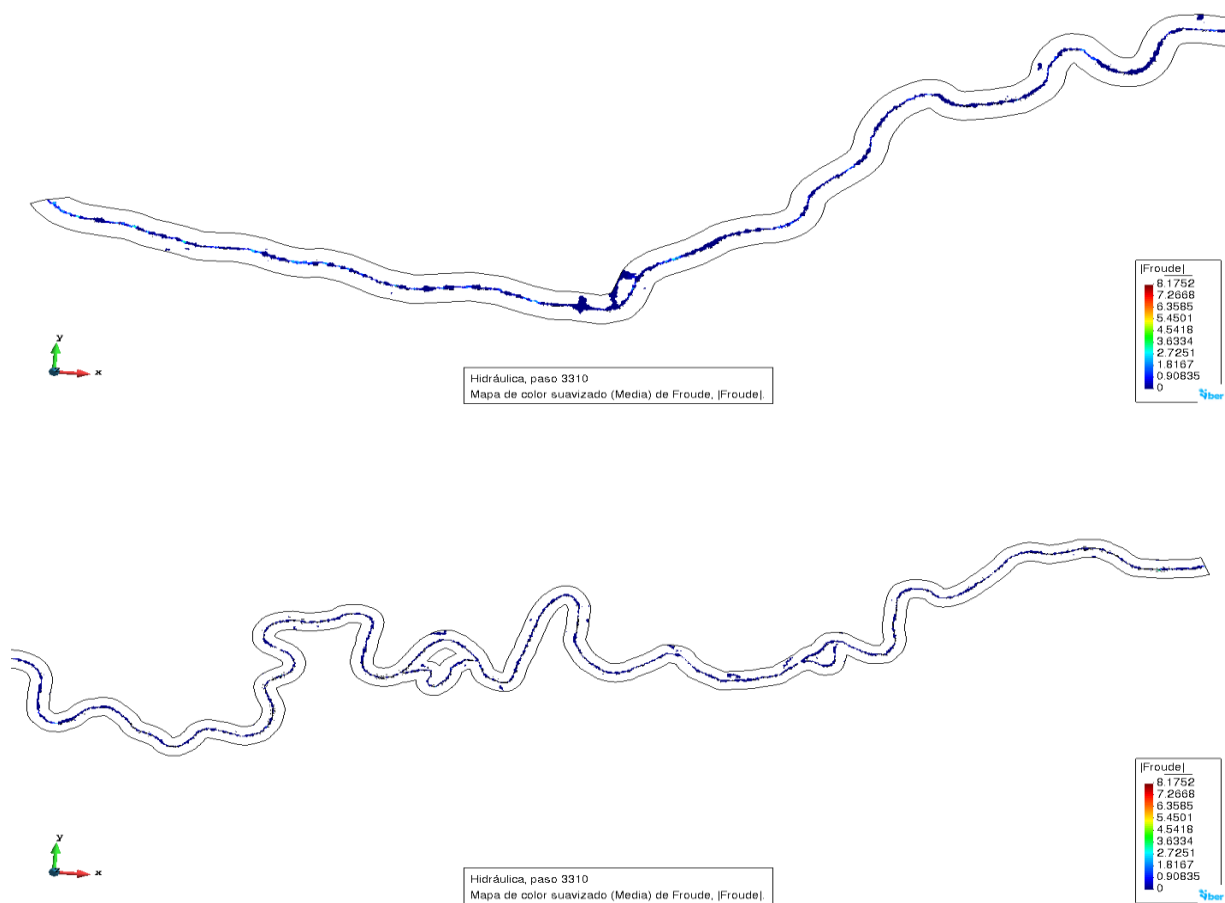
Generation	Rank	Quantile	vss	khc	kdc5	kdc	khn	von	kn	ki
0	100	99.01%	0.098785668	1.207417029	0.32274094	0.279289594	1.587971918	1.196974316	5.73609561	1.414237597
0	99	98.02%	0.086298418	4.277370958	0.297352581	0.064241723	1.012219978	0.348223919	5.584021185	1.257327423
0	98	97.03%	1.010081556	4.116994065	0.142052547	0.185030433	1.604052364	1.684659468	0.985866129	1.748781878
0	97	96.04%	1.417185408	2.3920488	0.158760623	0.340512642	1.885735424	0.533855289	8.643389888	1.014660663
0	96	95.05%	0.287475065	1.772099906	0.103458534	0.468743132	1.69971098	0.699493638	6.286911204	1.09814237
0	95	94.06%	1.400308195	0.692228941	0.458319353	0.334960555	3.880967206	1.267205471	6.376412584	1.162365463
0	94	93.07%	1.652147836	2.070465603	0.344514223	0.460460384	1.883202103	1.61948387	0.529510691	0.002113798
0	93	92.08%	0.874624216	2.463875219	0.372067272	0.593046067	1.926682171	1.150028837	5.210062487	0.985258935
0	92	91.09%	1.822538625	4.404962642	0.19517068	0.838791328	4.296191069	0.575636096	2.649862088	0.298566439
0	91	90.10%	1.544465635	2.251638718	0.385253731	0.828655495	0.029410177	1.863469114	7.587896566	1.071024724
0	90	89.11%	0.041031388	1.565283577	0.280355604	0.453621494	1.763130295	1.224978602	4.710517188	0.275035749
0	89	88.12%	0.60934902	4.716374229	0.410041009	0.895358436	4.847075092	1.264698721	1.359837377	0.142006441
0	88	87.13%	0.140639989	2.082244913	0.20442018	0.664937918	2.218235839	0.584878766	3.414628335	1.504871778
0	87	86.14%	0.760962154	1.010356143	0.090138463	0.737529078	1.2661423	1.181994087	0.182791101	0.701846309
0	86	85.15%	1.341192318	1.735933696	0.025545229	0.937370025	2.788479574	1.079005196	3.29914374	0.593491325
0	85	84.16%	1.941275269	3.24624648	0.456383762	1.005945781	3.008806651	1.242340102	4.995424158	0.823910058
0	84	83.17%	0.899335287	4.534096799	0.038658975	1.074019543	3.997356761	0.563279845	0.407009958	1.355541149
0	83	82.18%	0.091749862	2.143956922	0.094458484	1.054876734	4.954807453	1.404231338	8.254699883	0.523612098
0	82	81.19%	0.285722057	0.22347772	0.24930408	1.572584839	0.242757241	1.253909981	7.443575793	1.769417757
0	81	80.20%	0.516693237	3.24816578	0.221035975	1.275444776	1.994802266	0.440070735	3.272140754	1.901267729
0	80	79.21%	1.50122731	4.358665729	0.215338732	1.159428082	1.752924473	0.166892733	0.395469745	1.944010962
0	79	78.22%	1.320815578	2.721888366	0.327331643	1.257507585	1.148640796	0.415939309	9.031898747	1.756880849
0	78	77.23%	0.397034968	3.187290851	0.371665165	1.491573032	4.721838322	1.143054051	1.810461167	0.554199975

Nota: Datos generados en el proceso de calibración de cada uno de los parámetros

Los parámetros sensibles son DBO, DQO y Sólidos suspendidos, debido a la oxidación define el proceso de autopurificación o capacidad de asimilación de la carga orgánica (Gutiérrez J. V., 2016) en el río Ocoa, en estos valores también influye la velocidad del flujo teniendo en cuenta que cuando existe mayor escorrentía eleva el levantamiento de sólidos. Para estos parámetros se debe hacer control en la toma de muestreo para que los valores sean más reales y se pueda manejar un seguimiento y control en el río.

- **Modelo Iber**

Para desarrollar la modelación además del “shapefile”, se incluyen los datos de contorno e iniciales y de importancia los datos de rugosidad, con cuales se realiza la calibración del modelo y con los cuales el modelo computacional será más cercano a la realidad (Rodríguez & Gomez, 2018). La calibración del modelo se realizó a través de la variación de los coeficientes de rugosidad de Manning realizando una zonificación para cada tipo de uso de suelo. Además, se consideró la existencia de puentes debido a que estos provocan que estas estructuras transversales al cauce generen mayor área de inundación (Collazos, Villanueva, Briceño, & Cazenave, 2018)

Figura 22: Simulación Froude para contornos y calibración del modelo Iber.

Nota. Por Morales C, Vergara R, 2022

9.3 Fase 3: Análisis de la comparación de los modelos

9.3.1 Simulación de escenarios

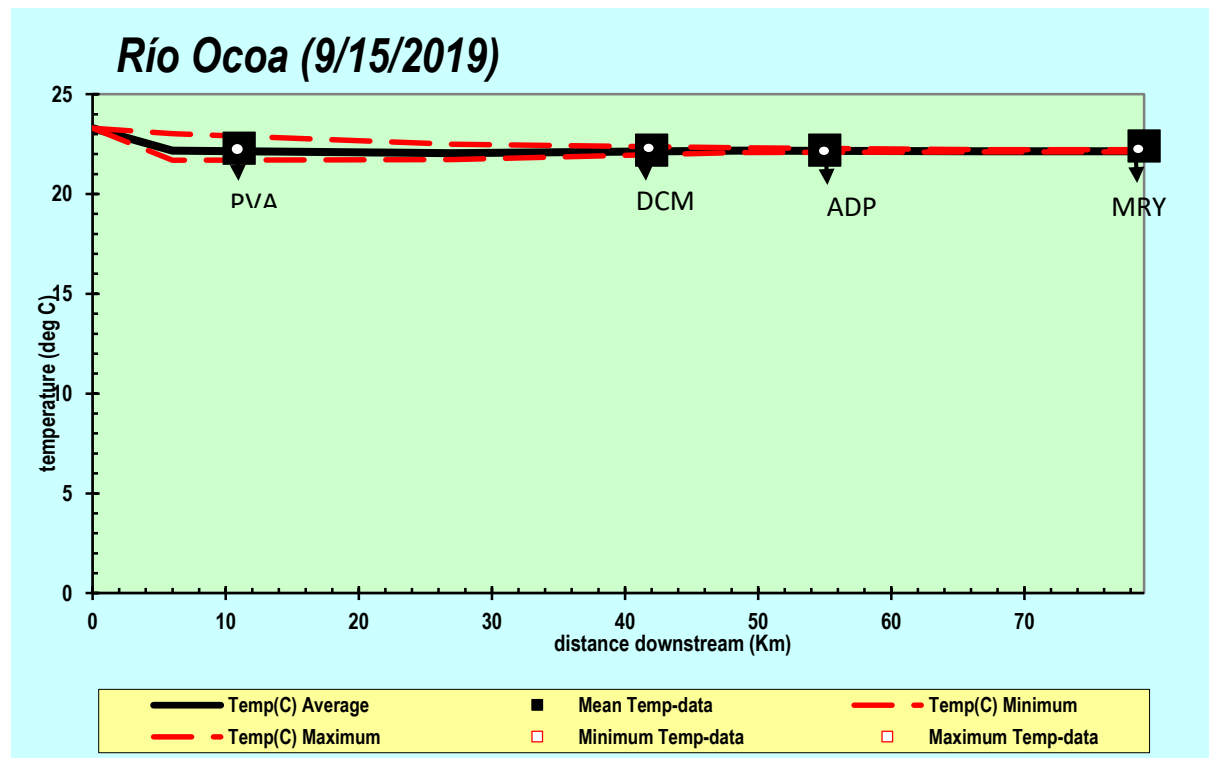
- **Modelo Qual2k**

Al realizar la simulación se genera el comportamiento de los datos modelados con respecto a la distancia del cauce en este caso el río Ocoa. Se analizan las siguientes gráficas:

Temperatura: Como se observa en la Figura 23, el comportamiento de la temperatura se ve reflejado en un valor pico de 23 °C el cual se regula y se mantiene constante durante todo el

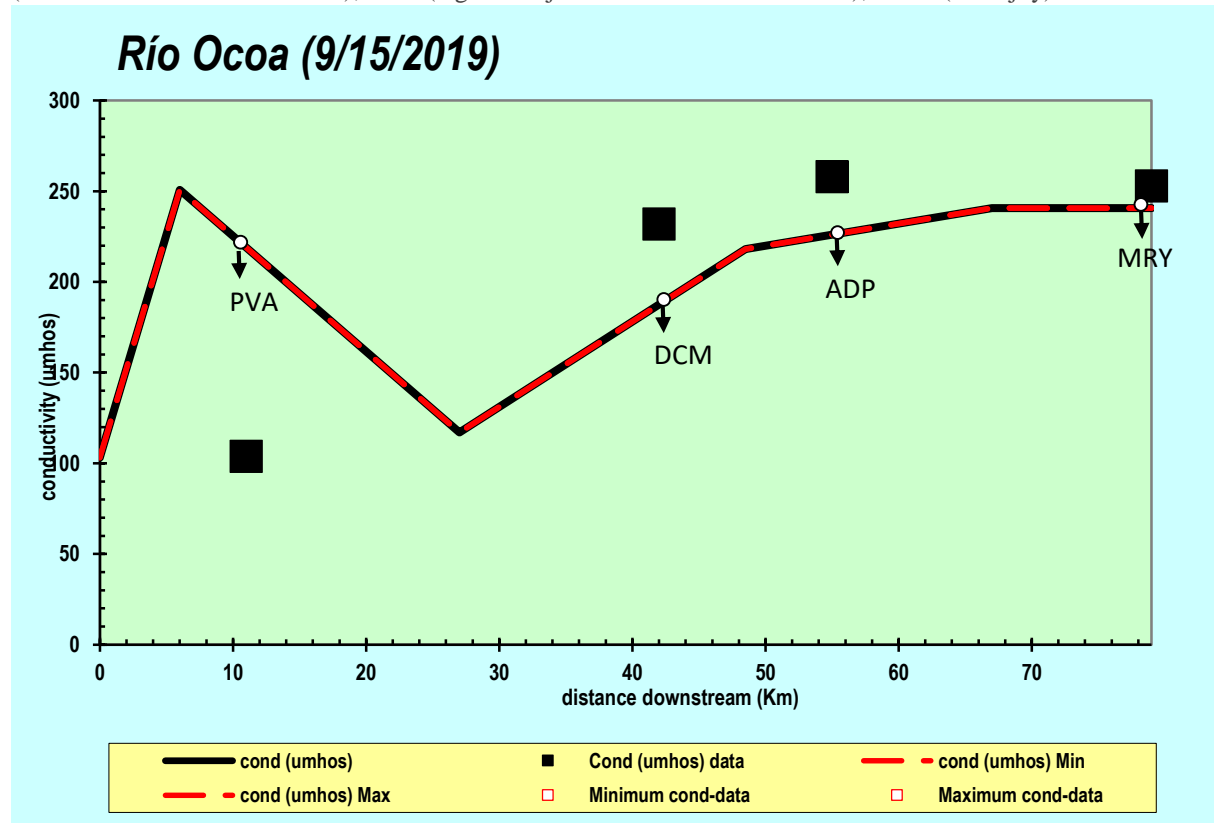
transecto con un valor de 22 °C, es decir, que comparando esta información con lo que realmente sucede en el río no se ajusta debido a las descargas de aguas residuales, pero el valor de temperatura corresponde a las lluvias presentadas día antes de la toma de muestras.

Figura 23: Comportamiento de temperatura simulada en Qual2K. PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MR Y (Murujuy).



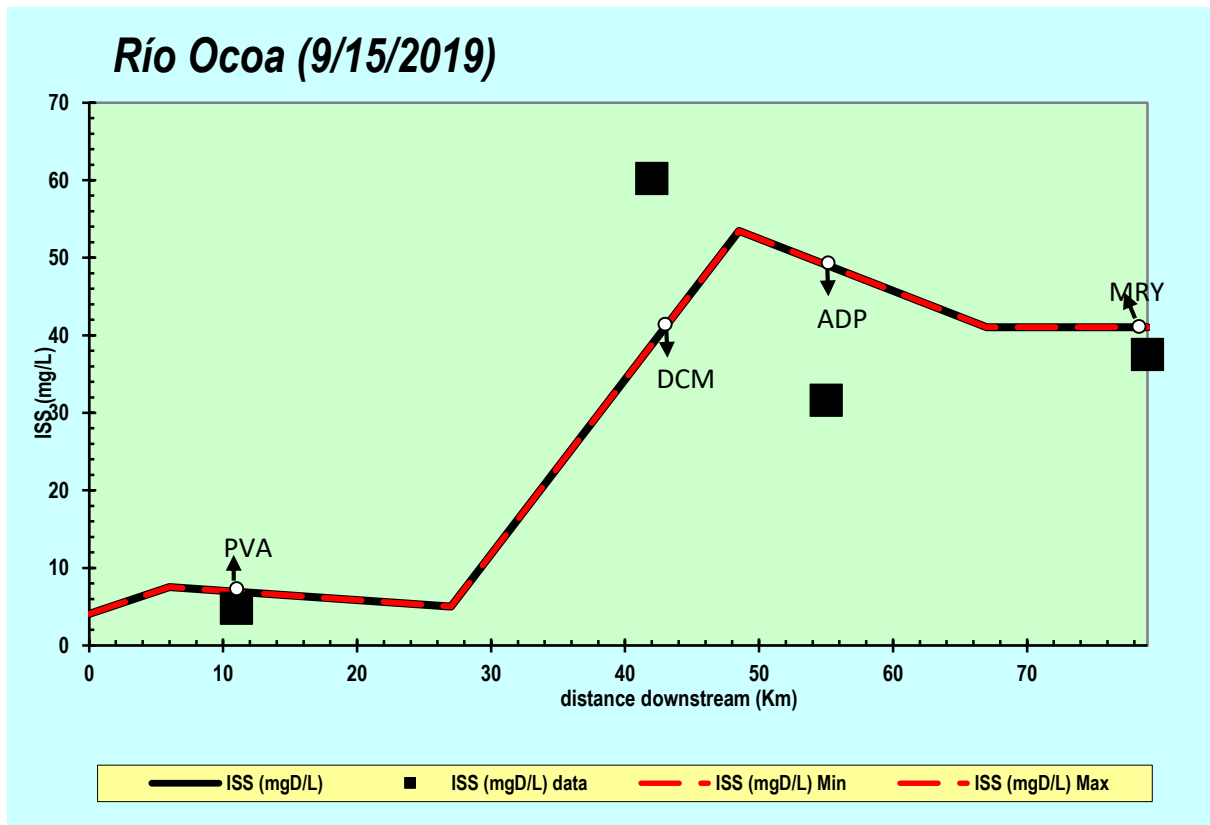
Conductividad: En la Figura 24, se observa que la conductividad varía su tendencia, esto debido al incremento de sólidos suspendidos y coloidales que reflejan turbiedad en el cuerpo de agua por efecto de la lluvia que se presentó días antes de la toma de muestras, en el PVA (Puente vía Acacias), inicia con un valor alto el cual baja su incidencia debido a la distancia entre los puntos, este valor vuelve aumentar seguidamente de la DCM (Desembocadura caño Maizaro). Los cuadros negros indican el valor medio escrito en la data, su representación indica un incremento debido a las lluvias presentadas y a la escorrentía en el transcurso del cauce, el punto PVA, es bajo a comparación del dato dado en la simulación el cual es sensible a la información de precipitación. La gráfica presenta una realidad en los datos simulados.

Figura 24: Comportamiento de la conductividad simulada en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



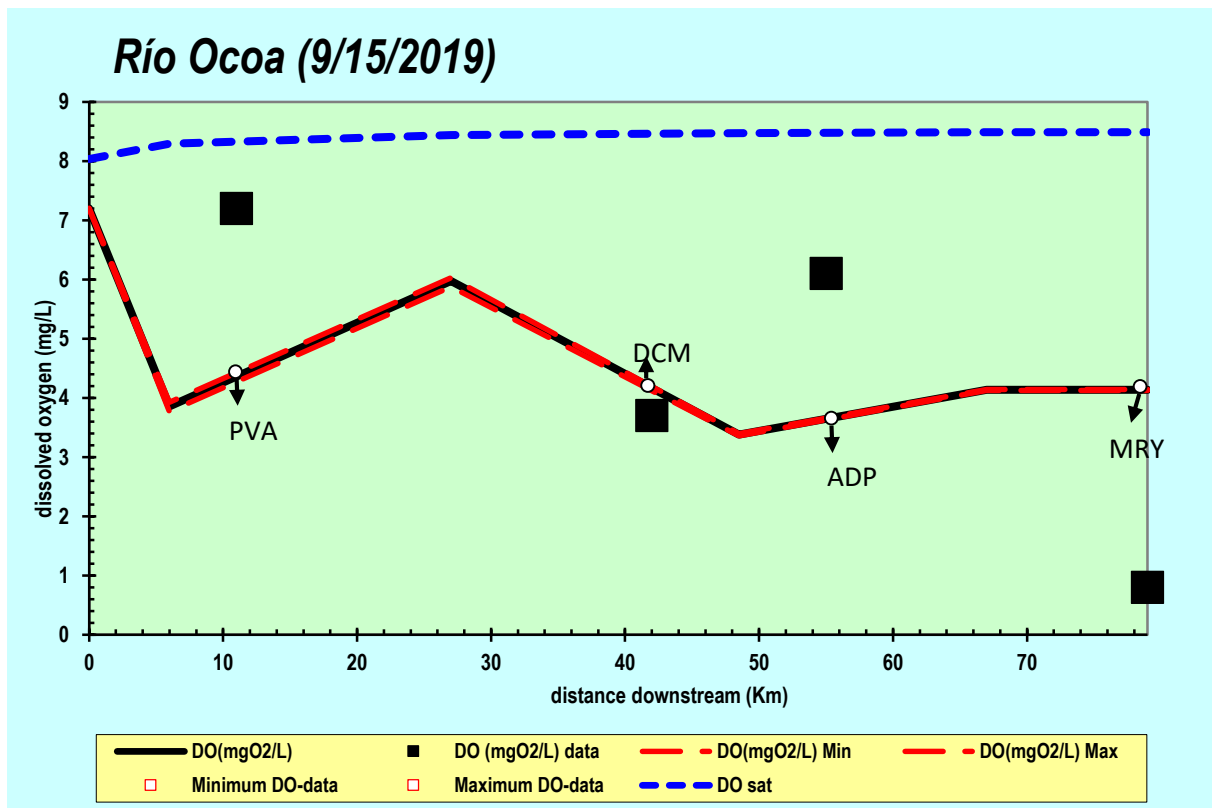
Sólidos suspendidos inorgánicos: La simulación nos indica que a medida de la distancia el valor aumenta, pero no afecta al efluente, teniendo en cuenta la norma este no debe sobrepasar los 100 mg/L, es por esto por lo que el comportamiento de la línea de máximos y mínimos esta igual a la del promedio. Los sólidos se reflejan debido a que el comportamiento del río espacialmente va en caída como se logra ver en los puntos DCM, ADP, es decir, inicia en una cota alta y termina en una cota 200 msnm de diferencia. En algunos resaltos hidráulicos se observa la dispersión de los sólidos indicando mayor presencia en la desembocadura del río, esto se puede observar en la gráfica 13. Los puntos PVA y MRY tienen relación a la simulación, mientras que los puntos DCM y ADP tomas un punto medio, esto es debido a la calibración del programa el cual interpreta los datos y los ajusta a la realidad, esto evidencia que los datos interpretan la realidad del río.

Figura 25: Comportamiento sólidos suspendidos simulados en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



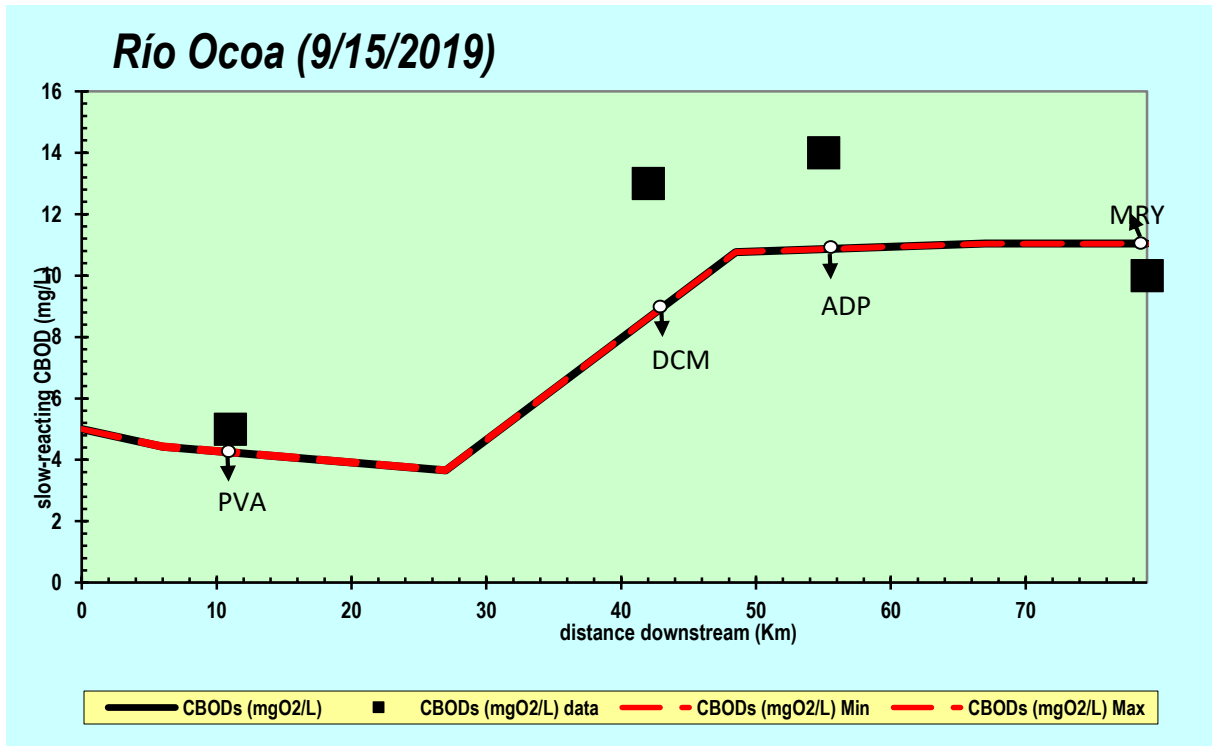
Oxígeno Disuelto: En esta Figura 26, se refleja el comportamiento de la línea azul el cual corresponde a la Saturación del Oxígeno Disuelto (SOD) el cual aumenta en el transcurso del río, la simulación del OD (Oxígeno disuelto), presenta al inicio del cauce una baja oxigenación, esto se debe a viviendas aledañas que desechan el agua residual al cauce, posteriormente esta concentración vuelve aumentar y al finalizar el transecto por los puntos de descarga esta concentración baja nuevamente. En esta parte se relacionan dos factores importantes, uno es la temperatura ambiente, teniendo en cuenta que los datos fueron tomados en verano contábamos con una temperatura promedio de 27°C lo que implica una afectación a la superficie del agua y, dos la temperatura de los caños de estudio que inciden en proveer más calor, por lo tanto, se observa una saturación que complica la vida acuática. Lo representado en la gráfica afirma lo que sucede en el río Ocoa, puesto que la baja concentración de OD en la desembocadura genera mal olor debido a la descomposición de la materia orgánica.

Figura 26: Comportamiento Oxígeno disuelto simulado en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



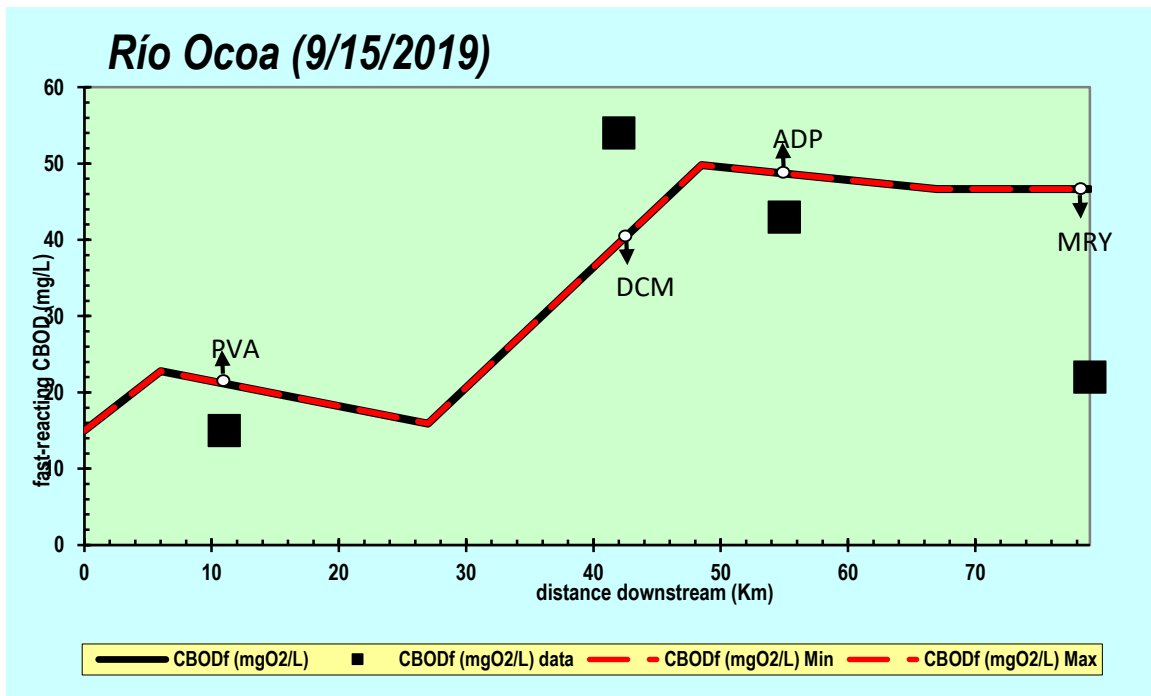
DBO lenta: El comportamiento de la DBO se atribuyen a la sedimentación de materia orgánica Particulada y dicha sedimentación se incrementa en corrientes poco profundas (Cardenas, 2015) como se representa en los puntos ADP y MRY, en el río Ocoa se ve afectación por que la turbulencia aumento debido a las precipitaciones de días anteriores, por esta razón se observa un aumento en la desembocadura del río Ocoa como se representa en la Figura 27. Esto se demuestra en los resultados obtenidos que explican la influencia de la profundidad y el caudal en valores de la toma de muestras. Profundidades y caudales bajos facilitan la capacidad de asimilación de la carga contaminante, aumentando la tasa de degradación de DBO.

Figura 27: Comportamiento DBO simulado en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



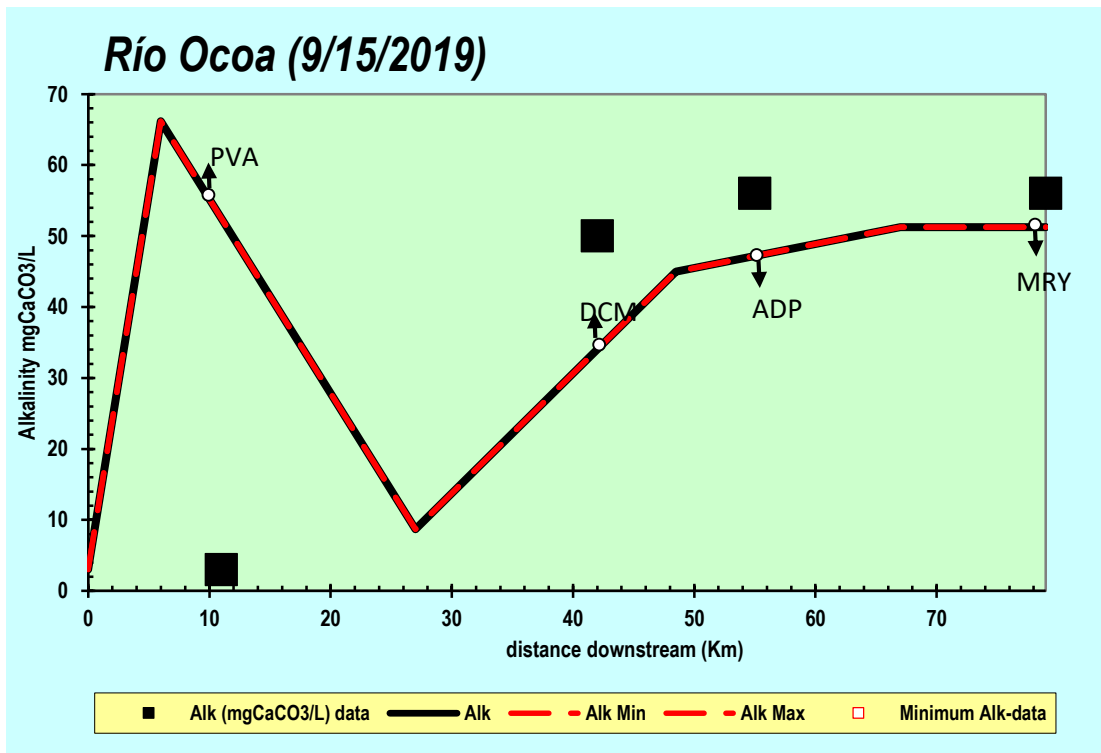
DBO rápida o DQO: Es importante aclarar que la DBO rápida es considerada en el programa como DQO debido al contenido de fórmula del programa el cual lo asemeja de esta forma. Aunque los valores están dentro de los permitidos se observa un aumento al final del cauce, el modelo al simular el comportamiento de la DQO a lo largo del río, genera una línea creciente de los datos de muestra, teniendo en cuenta que los datos aumentan durante el transepto del río y toma como acumulación en la desembocadura indicándonos una alta concentración de materia orgánica en descomposición que posibilita el aumento y crecimiento de bacterias nativas que alteran el ecosistema consumiendo gran cantidad de oxígeno (Losada, 2020). El punto ADP, aumenta la concentración debido a las descargas de empresas petroleras que se encuentran en el sector.

Figura 28: Comportamiento DQO simulada en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



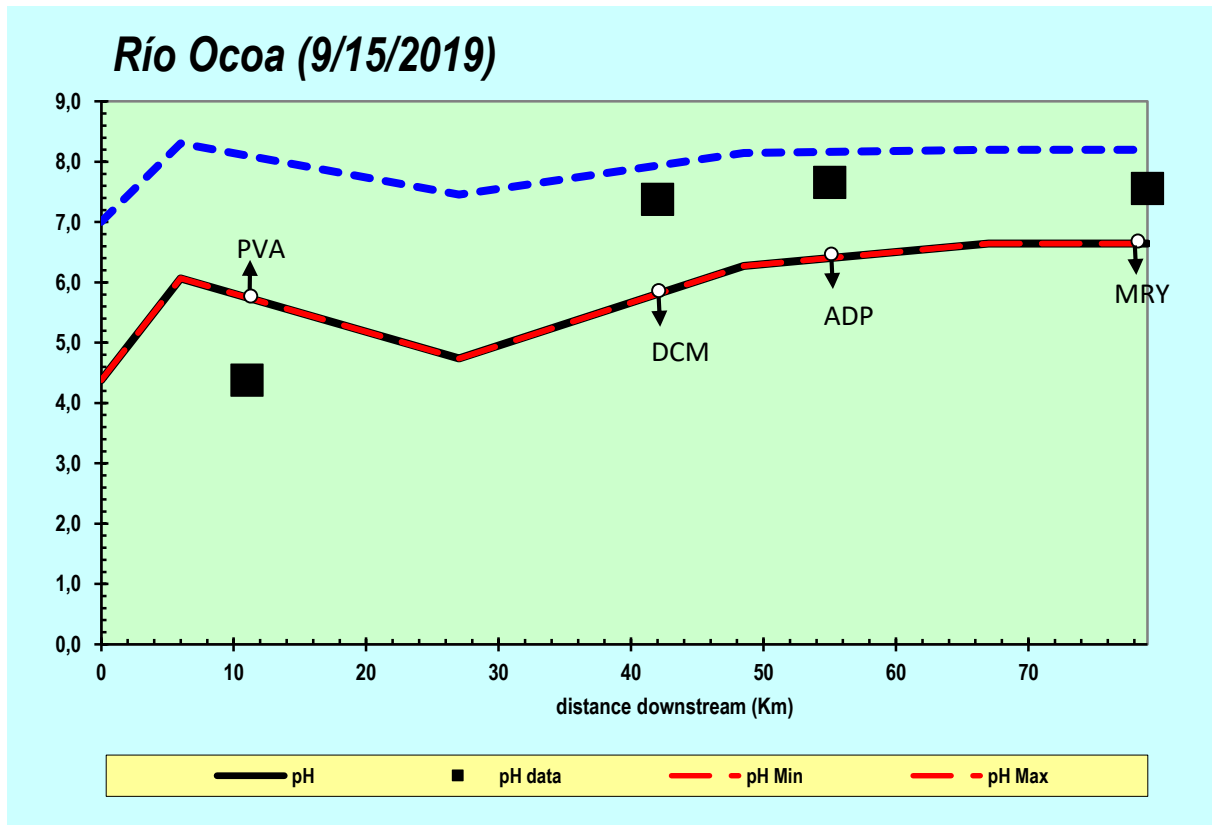
Alcalinidad: El comportamiento como se observa en la Figura 29, tiene un comportamiento variante con un punto mínimo de 8.68 mgCaCO₃/L, estando este entre los datos bajos modelados indicando tienen una capacidad de amortiguación baja y pueden ser más corrosivas para las tuberías (Ecofluidos, 2012). No hay una medida que se proponga de valor de referencia que indique efectos en la salud, aunque esta puede afectar sabor y formación de incrustaciones, el dato simulado indica un comportamiento normal ya que desde allí y en el transcurso de ella misma, se tienen varios agentes contaminantes, para así cuando se analizan las muestras agua abajo, se tienen unos valores moderados para el consumo humano o demás actividades, esto se debe que como se nombró anteriormente, en el transcurso se encuentran varias contaminaciones al río, puede ser por acciones humanas o naturales (Vasques & Valencia, 2019). En la Figura 29, es importante resaltar el resalto de datos del punto PVA, puesto que en la simulación se observa un pico bajo y sube abruptamente y cae de forma relativa, este suceso se debe a los aumentos del cauce por resaltos hidráulicos presentes en esa zona debido a que es montañosa.

Figura 29: Comportamiento Alcalinidad simulada; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



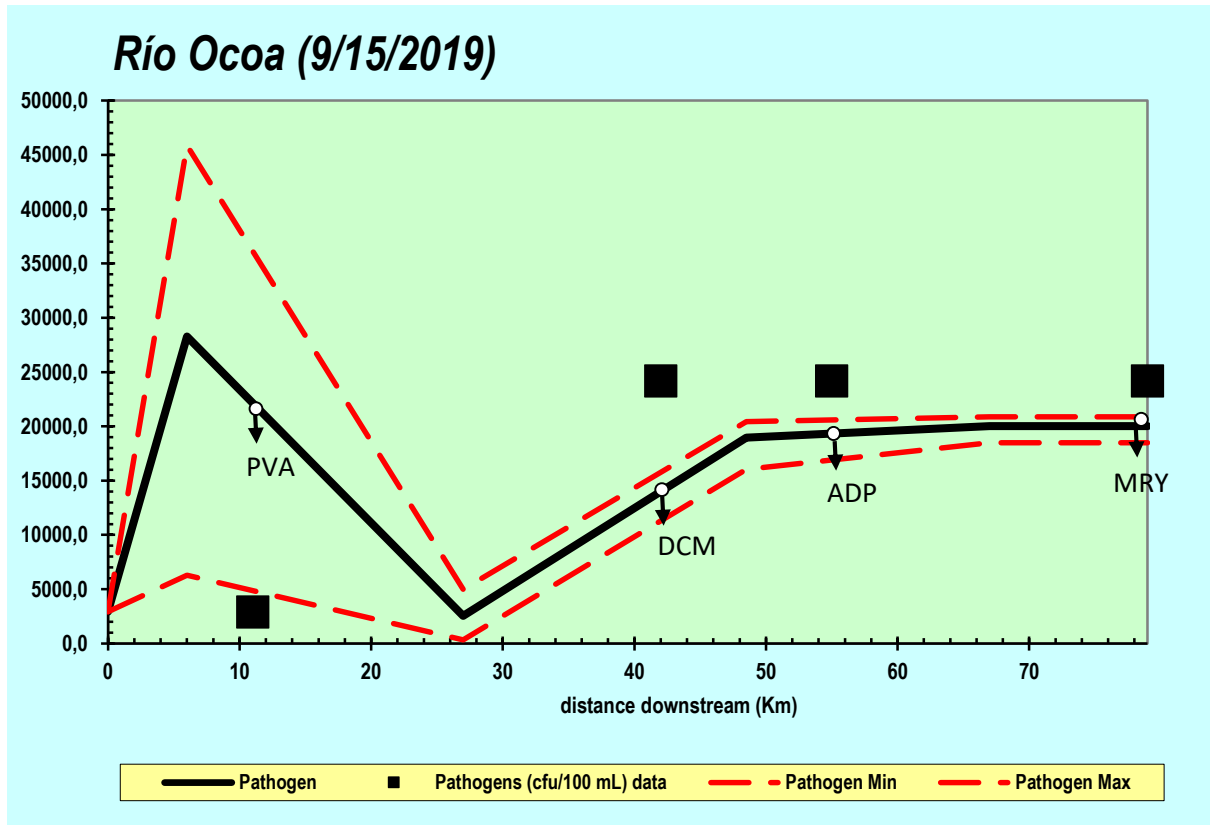
pH: Se observa en la Figura 30, que el promedio del pH esta semejado a los máximos y mínimos permisibles, por lo tanto, se observa un aumento en el pH en las distancias iniciales PVA, fuera de este rango se reduce a la diversidad por estrés fisiológico y la reproducción. El modelo usa el método numérico Newton-Raphson como predeterminado porque es más rápido, generando una posición de los datos iniciales cercanos a la realidad, debido a que indica la secuencia de los datos en el transecto del río Ocoa.

Figura 30: Comportamiento pH simulado en Qual2K; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



Coliformes totales: En la Figura 31, se logra observar que el comportamiento de este patógeno disminuye a lo largo del cauce, esto es un indicio que las aguas negras u otro tipo de desecho en descomposición si afectan el cauce, llegando a la conclusión que representa la situación actual del río por los diferentes puntos de descarga de agua residual. El cauce llega al final con un máximo de 10.000 de cfu/100 ml.

Figura 31: Comportamiento Coliformes Totales simulados en Qual2K; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



- **Modelo Iber**

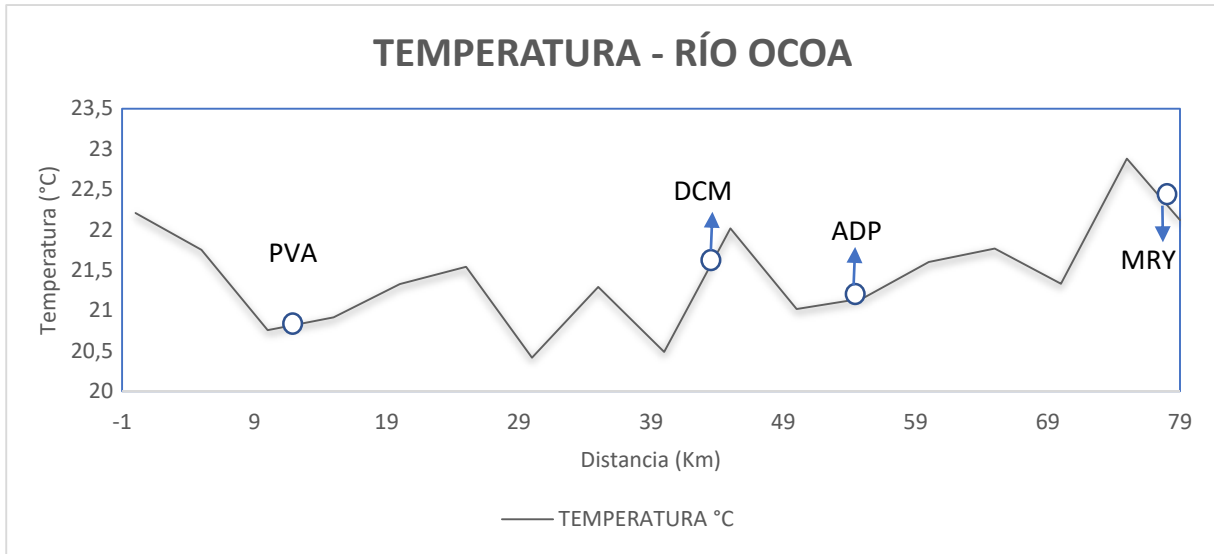
El modelo Iber, permite predecir la evolución temporal y espacial de las concentraciones de las siguientes variables: temperatura, salinidad, demanda biológica de oxígeno carbonosa, oxígeno disuelto, EscherichiaColi (E. Coli), pH.

Temperatura

En la Figura 32, se observa un comportamiento variado de la temperatura a lo largo del río Ocoa, el cual es representativo a la realidad debido a que este modelo considera los puntos de descarga de aguas residuales y se evidencian los picos en estos comportamientos, además por ser más hidráulico contempla las profundidades razón por la cual también influye en la temperatura del agua. En la figura 4, que se evidencia en el anexo 5, se muestra el comportamiento de la temperatura simulada, la cual muestra un promedio de 22°C. Este resultado arrojado muestra una

realidad de lo sucedido al final del cauce por su poca profundidad la temperatura afecta más el transecto.

Figura 32: Simulación de la temperatura en Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



Conductividad

El modelo recibe datos de conductividad, debido a que este valor es indispensable en las ecuaciones para el cálculo de calidad del agua, pero este, no simula el comportamiento del parámetro en el río. En el manual de calidad del agua del modelo Iber dice "el usuario puede estimar la conductividad del agua" como variable conservativa. Es decir, que el parámetro de la conductividad es tomado en los puntos inicial y final como el mismo valor, por lo tanto, el modelo no considera un parámetro necesario para representarlo gráficamente y el resultado es el mismo al de toma de muestra, por lo que se concluye que no se puede tener interpretación de este parámetro.

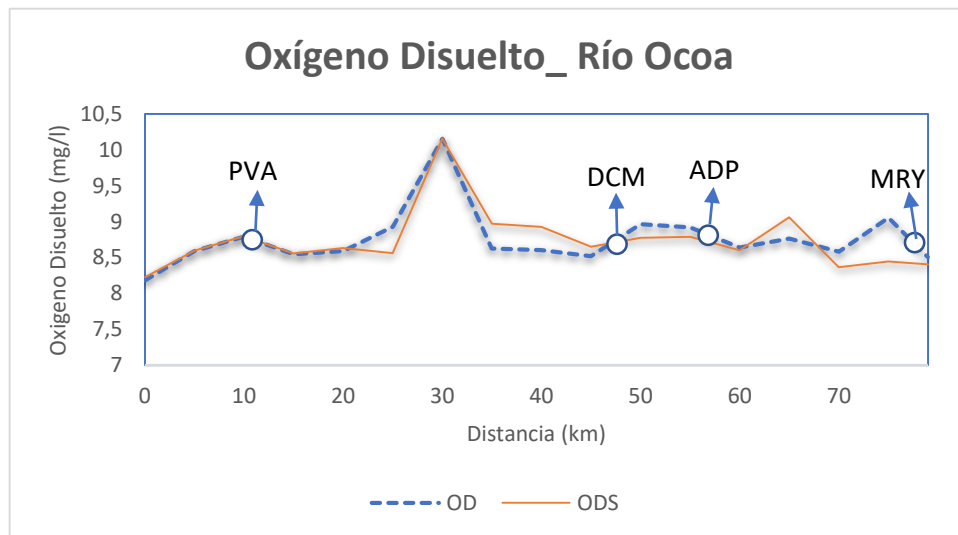
Sólidos suspendidos inorgánicos

En cuanto a este parámetro para calidad del agua, el modelo no estima sólidos suspendidos, por lo tanto, no se realiza una simulación de este, para algunos casos, como modelaciones de hidráulicas se utiliza en campo de velocidades, calados y de turbulencia proporcionado por los módulos hidrodinámico y de turbulencia, el cual no se evaluó para este ejercicio.

Oxígeno Disuelto

Observando el comportamiento simulado de la OD en la Figura 33, se presenta alteraciones de contaminación altos en el río debido a que los resultados están entre 7 a 10 mg/l, el OD Saturado presente está por debajo del promedio indicando que la cantidad de materia orgánica en descomposición en el agua, la actividad humana y el flujo de corriente hace que se vea afectado el OD y el ODS muestran relación en los datos, indicando que el OD se encuentra en estado crítico.

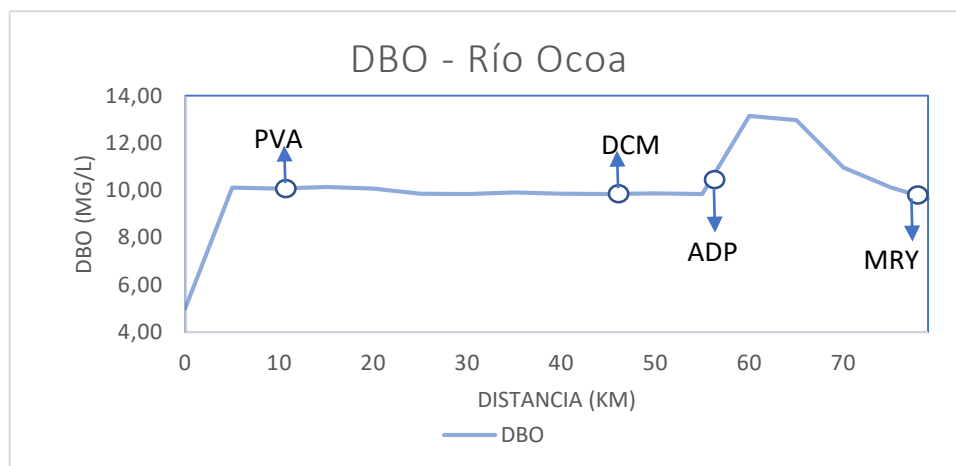
Figura 33: Simulación del Oxígeno Disuelto en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



DBO

Los resultados arrojados indican que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) esta aceptable en cuanto al rango de contaminación, es decir, con indicios de contaminación, aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Esto depende de la dilución por las precipitaciones dadas días anteriores tal como se representa en la Figura 34.

Figura 34: Simulación de la DBO en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



DQO

El modelo no cuenta con simulación de demanda química de oxígeno, por este motivo no se puede analizar el parámetro.

Alcalinidad

El modelo contempla el uso de alcalinidad como una variable conservativa, por lo que su término fuente es igual a cero. En futuras versiones se implementará un modelo de alcalinidad no conservativo como se indica en el manual.

pH

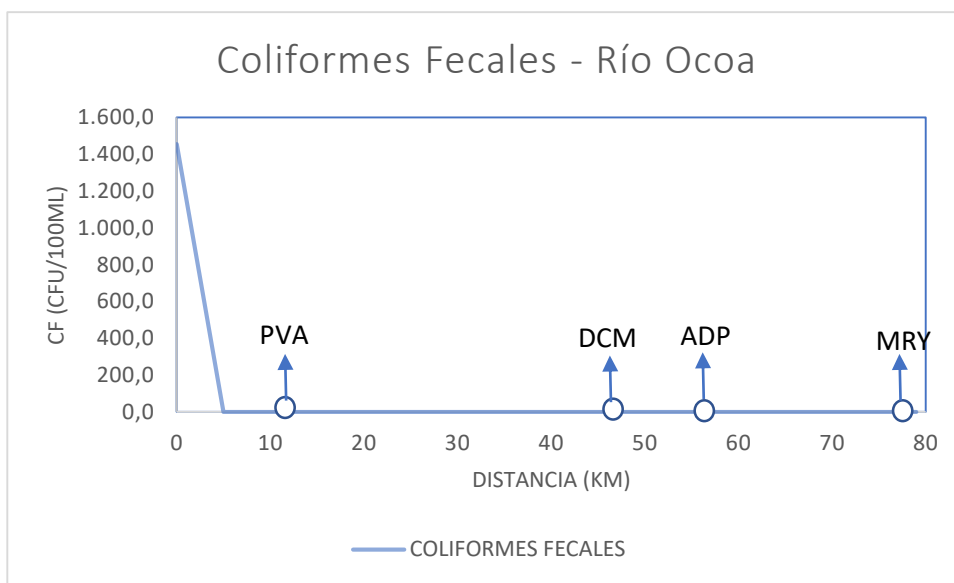
El programa tiene en cuenta el valor del pH por medios de cálculos a partir de los valores de alcalinidad y de carbono orgánico total, la entidad ambiental no contempla el dato de carbono orgánico por lo tanto no genera un comportamiento de simulación en este. Los datos de pH analizados por la entidad ambiental en laboratorio no son de utilidad para este programa.

Coliformes totales

Los datos arrojados en la simulación indican que los coliformes totales que están por debajo de los 700 NPM/100ml, indicado así presencia de bacterias en el agua dañinas para el ser humano. No se observa alteración en el transcurso del cauce. En la figura 35, se puede observar el comportamiento de los coliformes fecales, se considera que no es aceptable este resultado con la

realidad debido a las descargas de aguas que se presentan en el desde el punto PVA al DCM, los cuales componen el centro de la ciudad y hay mayor afectación, por lo tanto, no puede ser 0.

Figura 35: Simulación CF en modelo Iber; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



9.3.2 Análisis de los resultados

Teniendo en cuenta la información generada anteriormente, se realizar una comparación de datos, con los resultados del modelo Iber y Qual2k para determinar el error de cada modelo.

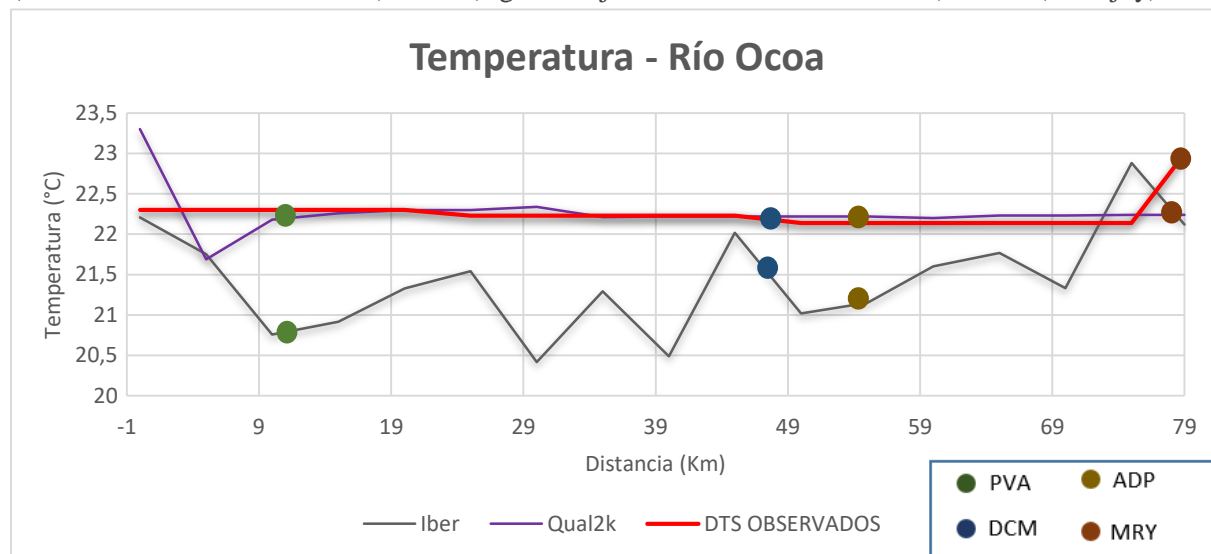
Tabla 11: Resultados de la simulación de los modelos Iber y Qual2K

Parámetros Críticos Simulados	Unidades	Modelo Iber				Modelo Qual2K			
		PVA	DCM	AVP	MRY	PVA	DCM	AVP	MRY
TEMPERATURA	°C	20.8	20.48	21.1	22.1	21.69	22.22	22.22	22.14
O2 DISUELTO	(mg O2/L)	8.58	8.51	8.91	8.5	3.92	3.4	4.12	4.14
DBO	(mg O2/L)	10.1	9.85	9.85	9.65	4.39	10.76	11.03	11.03
Coliformes Totales	(NPM/100ml)	0	0	0	0	2009	18870	18966	28075

En la comparación de la simulación de cada uno de los modelos Iber y Qual2K se observa diferencias relevantes en los datos generados, por lo tanto, haremos énfasis en los parámetros de temperatura, Oxígeno disuelto, DBO y Coliformes Totales.

Para la modelación de la temperatura se observa diferencias en los datos simulados, para el modelo Iber el dato es más cercano a la realidad con una temperatura máxima registrada de 22°C al igual que en el modelo Qual2k. Uno de los factores para que se diera este resultado en la modelación es la implementación de la ecuación para predecir la temperatura, el modelo Iber utiliza la ecuación de conservación del calor utilizando la Ley de Dalton mientras que el modelo Qual2K utiliza la ecuación de balance de calor utilizando la ley de Brady, Graves y Geyer. Los dos modelos están acordes a una representación de la realidad. En la Figura 36, se logra ver que el modelo de Qual2k tiene un 99% de concordancia con los datos reales en los puntos PVA, DCM y ADP, mientras que la línea ondular de la simulación del modelo, alcanzó una cercanía del 100% en el punto final (MRY), el punto más lejano fue el del punto inicial (PVA) con una diferencia de concordancia de 93%. En general el modelo Qual2k tiene una aproximación de 98% a los datos de muestra y el modelo Iber un 94%.

Figura 36: Comparación de la simulación de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRJ (Murujuy).



En el parámetro de Oxígeno Disuelto los modelos presentan un ajuste que puede considerarse no satisfactorio, teniendo en cuenta los puntos de descarga de aguas residuales y los

dos tributarios principales Caño Maizaro, el cual afectan el estado natural del agua, en este caso los resultados de los dos modelos varían en un 10 mg O₂/L siendo el resultado más alto el del Iber con un porcentaje de acercamiento por encima de 94% y el más bajo el del Qual2k con un acercamiento por debajo de un 88%, es decir que el modelo Iber fue más sensible para la simulación en este parámetro.

En la comparación de la Saturación del Oxígeno disuelto el Modelo Qual2k fue más sensible considerando valores superiores al Modelo Iber, las diferencias de cada uno varían alrededor de 3mg/l. El Modelo Iber presenta algunos picos altos, esto se debe considerar al punto de descarga de aguas el cual es más contemplado para este modelo que para el Qual2k.

Figura 37: Comparación de la simulación del OD de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).

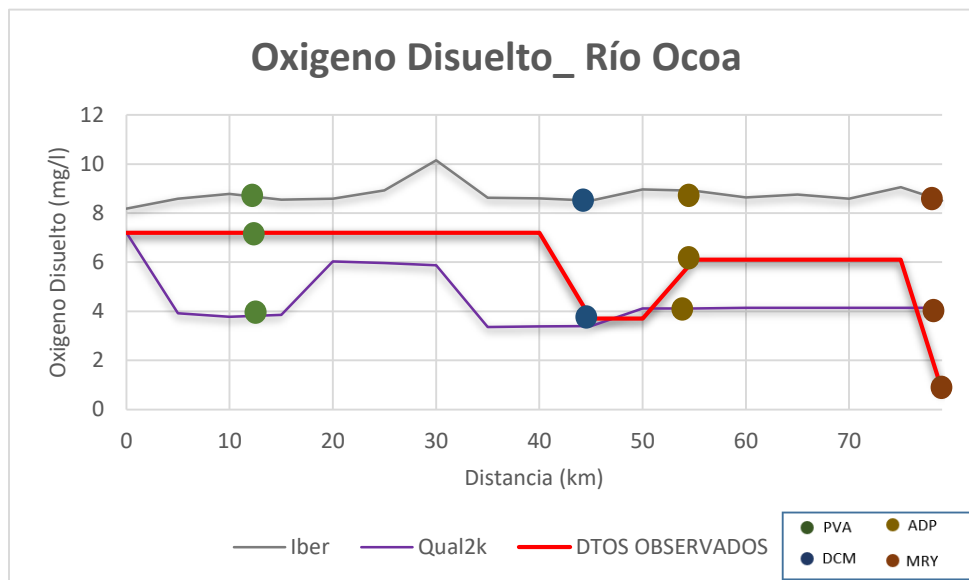
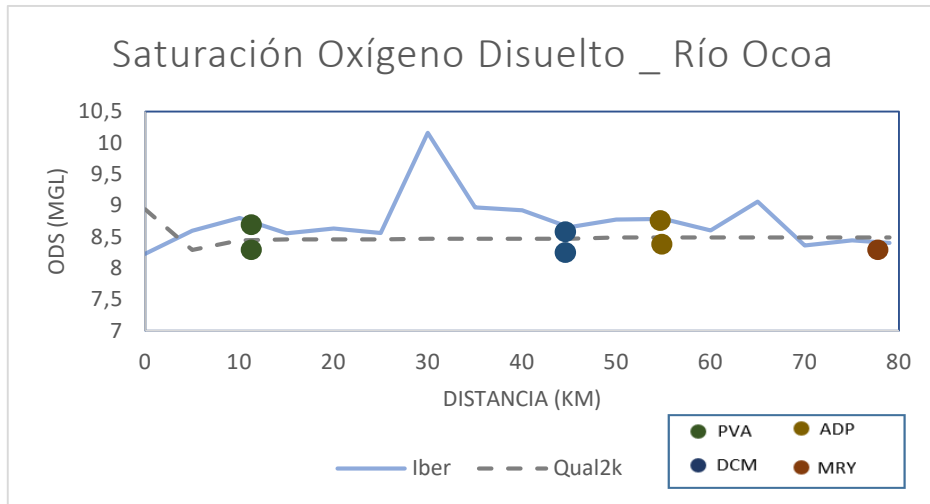
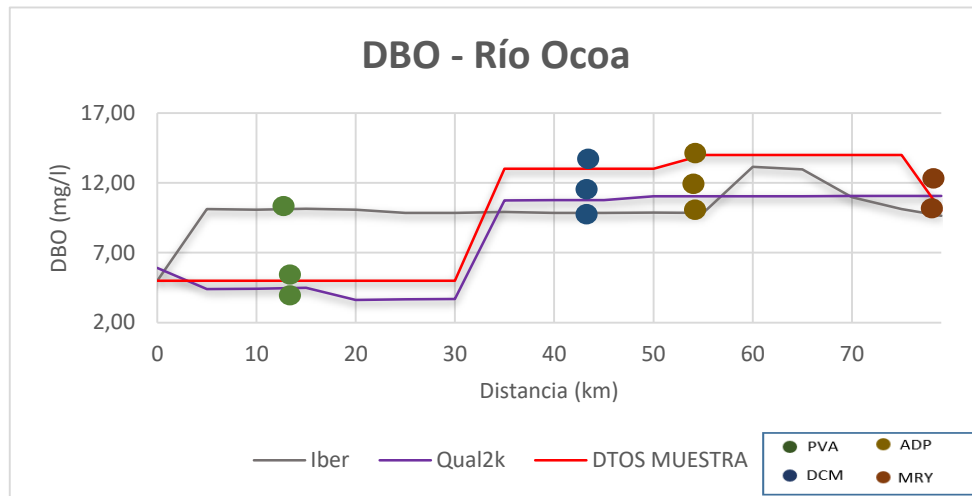


Figura 38: Comparación de la simulación del ODS de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



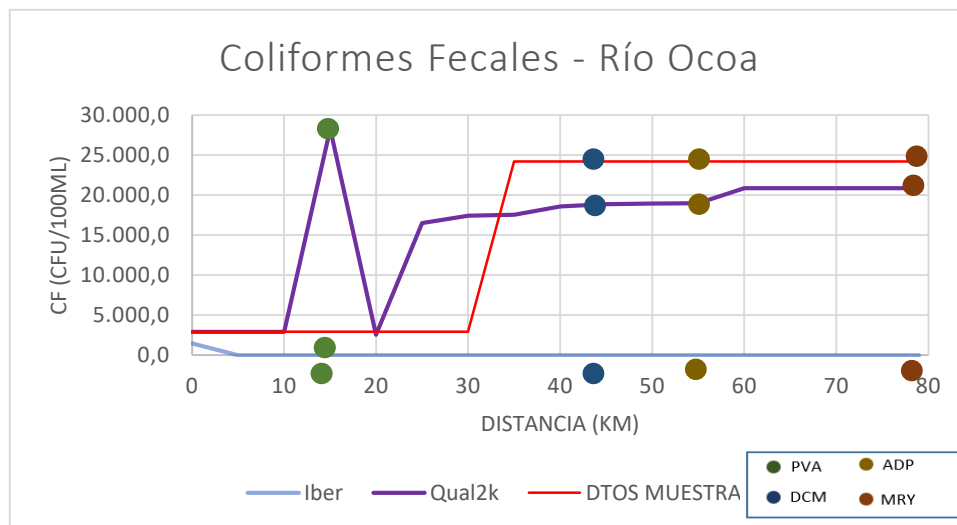
La DBO, muestra datos interesantes, el modelo Iber arrojó un resultado de 13 mg O₂/L y el modelo Qual2K un valor de 11 mg O₂/L siendo esta vez el modelo Qual2K quien fue menos sensible en la simulación de los datos. Estos datos reflejan la realidad de lo sucedido en el río Ocoa, aunque se ve similitud en el comportamiento de los datos. Por ejemplo, en el punto PVA el modelo Qual2k tuvo una similitud del 88% en comparación al modelo Iber que está por encima un 20%, existe mayor relación es en los tres puntos DCM, ADP y MRY, estando el Qual2k con una cercanía de un 89% y el modelo Iber en un 94%, concluyendo que el modelo Iber fue más sensible en la simulación de éste parámetro y es más acorde a la realidad.

Figura 39: Comparación de la simulación de DBO de los modelos Iber y Qual2k; PVA (Puente vía Acacias); DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



Los Coliformes Totales muestran una diferencia significativa en la simulación de los modelos. En el modelo Iber arrojó datos en ceros, cuando no es ajustado a una realidad. El modelo Qual2k en los puntos DCM, ADO con aproximación de un 65% y MRY tienen una cercanía aproximada de 96%. En general para este parámetro el modelo tiene una cercanía de 90% a los valores de muestra.

Figura 40: Comparación de la simulación de CF de los modelos Iber y Qual2k; PVA(Puente vía Acacias);DCM (Desembocadura caño Maizaro); ADP (Aguas abajo desembocadura Peralonso); MRY (Murujuy).



- **Índices estadísticos para la valoración de los datos:**

Coefficiente de Determinación (r²):

$$r^2 = \frac{\text{cov}(o,m)^2}{\text{sd}(o)\text{sd}(m)}$$

Ecuación 1: Coeficiente de determinación r²

Donde, cov (o, m) = covarianza entre los datos observados y modelados

Sd (o) = desviación estándar de los datos observados

Sd (m) = desviación estándar de los datos modelados

A su vez la covarianza y la desviación estándar vienen expresadas por:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}$$

Ecuación 2: Ecuación Covarianza observada y modelada

Donde,

X_i = valores grupo X (en este caso los valores de Observado)

X = valor promedio de grupo X (Observado promedio)

Y_i = valores grupo Y (en este caso los valores de Modelado)

Y = valor promedio de grupo Y (Modelado promedio)

n = número de serie de Datos

$$\text{sd}(x) = \sqrt{\frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Ecuación 3: Ecuación desviación observada y modelada

Donde,

X_i = valores grupo en cuestión

X = valor promedio de grupo

n = número de serie de Datos

Coefficiente de Determinación (NS):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}$$

Ecuación 4: Coeficiente de determinación NS

Donde,

O_i = valores observados

M_i = valores modelados

O = valor promedio de los observados

Índice de Ajuste Modificado (W):

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - O| + |O_i - O|)^2}$$

Ecuación 5: Índice de ajuste modificado W

Relación RMSE/MAE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n}}$$

Ecuación 6: RMSE- Error cuadrático medio

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - M_i|}{n}$$

Ecuación 7: MAE - Error absoluto medio

De los resultados obtenidos en laboratorio y campo llamados valores observados, los comparamos con los valores modelados que son los valores promedio determinados al generar los cálculos en la simulación como se observa en la Tabla 9.

Error entre valores observados y modelados: A Continuación, con los datos de la Tabla número 14 y 15, se calcula el Error a partir del cociente entre el valor absoluto de la diferencia entre el valor observado (X_i) y el deseado (X) entre el valor observado X_i

$$\% \text{ Error} = \frac{|X_i - X|}{X_i} * 100$$

Ecuación 8: Fórmula de error porcentual

Donde,

X_i = valor modelado (en este caso los valores de modelado)

X = valor deseado o esperado (en este caso los valores de observado)

Modelo Qual2k

En la Tabla 12, se observan los índices calculados. Aunque el índice Coeficiente de Determinación (r^2) dio un valor por debajo de 1, los otros índices nos indican que el modelo presenta valores extremos al comparar con los valores observados.

Los otros índices nos indican que el modelo presenta valores extremos. Sin embargo, estos afectan el desempeño general del modelo al encontrarse los índices por debajo de 0,5. Por lo que puede concluirse que el modelo reproduce de forma inadecuada el comportamiento real del sistema. El pequeño tamaño de la muestra también puede influir en la valoración del modelo, un mayor número de datos daría un mejor análisis. La relación RMSE/MAE fue un poco alta (un valor de 1,1-1,2 sería deseable), lo que se puede atribuir al pequeño tamaño del grupo de análisis.

Tabla 12: Índices estadísticos para la valoración del modelo Qual2k Índice Resultado.

Componentes de Calidad del Agua	Valor observado	Valor modelado	Error %	r^2	NS	W	Relación RMSE/MAE
Temperatura	23.30	15.17	53.59	0	0	8.13	0.12
Conductividad	207.00	207	0.00	0	0	0	0.00
SST	15.30	15.3	0.00	0	0	0	0.00
O2 Disuelto	7.60	9.02	15.74	0	0	1.42	0.70
DBO	11.00	11	0.00	0	0	0	0.00
DQO	44.00	36.73	19.79	0	0	7.27	0.14
Coliformes Totales	19890.00	4436.86	348.29	0	0	15453.14	0.00
Tabla 12: Continuación							
Alcalinidad Total	3.00	3	0.00	0	0	0	0.00
pH	4.55	6.29	27.66	0	0	1.74	0.57

Modelo Iber

En la Tabla número 15, se observan los índices calculados. Aunque el índice Coeficiente de Determinación (r^2) dio un valor cero, los otros índices nos indican que el modelo presenta valores extremos al comparar con los valores observados.

Los otros índices nos indican que el modelo presenta valores extremos. Sin embargo, estos afectan el desempeño general del modelo al encontrarse los índices por debajo de 0,5. Por lo que puede concluirse que el modelo reproduce de forma inadecuada el comportamiento real del sistema. El pequeño tamaño de la muestra también puede influir en la valoración del modelo, un mayor número de datos daría un mejor análisis. La relación RMSE/MAE fue un poco alta (un valor de 1,1-1,2 sería deseable), lo que se puede atribuir al pequeño tamaño del grupo de análisis.

Tabla 13: Índices estadísticos para la valoración del modelo Iber Índice Resultado

Componentes De Calidad Del Agua	Valor Observado	Valor Modelado	Error %	R ²	NS	W	Relación RMSE/MAE
Temperatura	23.30	24	2.92	0	0	0.7	1.43
Conductividad	207.00	0	-----	0	0	0	0.00
SST	15.30	0	-----	0	0	0	0.00
O ₂ Disuelto	7.60	10	24.00	0	0	2.4	0.42
DBO	11.00	8	37.50	0	0	0	0.00
DQO	44.00	0	-----	0	0	44	0.02
Coliformes Totales	19890.00	600	3215.00	0	0	19290	0.00
Alcalinidad Total	3.00	0	-----	0	0	0	0.00
pH	4.55	0	-----	0	0	4.55	0.22

9.3.3 Propuesta para el uso de los modelos más idóneo

Para tener en cuenta el uso del modelo se establecen criterios de evaluación, estos son indispensables para definir el modelo más idóneo y recomendar a la entidad ambiental con el fin de que sea usado para generar mejores resultados y determinar la calidad del agua para la gestión del recurso hídrico, de esta forma determinar acciones sobre las fuentes hídricas.

Tabla 14: Cuadro de criterios en la matriz de decisión.

CRITERIO	Qual2K	Iber
Tiene en cuenta todos los parámetros a modelar	No cuenta con todos los parámetros deseados en la investigación, pero sí considera más datos que pueden ser usados y determinar más elementos para análisis de condiciones químicas físicas y biológicas del agua.	Cuenta con todos los parámetros de la investigación, aunque el programa ofrece más determinantes para tener un índice de análisis de calidad del agua más completo.
Es de fácil entendimiento	La herramienta que presta el programa es mediante Excel, esta presenta un mejor entendimiento para el usuario, es importante tener en cuenta que el modelo tiene sensibilidad en sus datos lo cual es importante revisar la calibración e información suministrada. Cuenta con un manual explicando los componentes del modelo, pero no tiene ejemplos guías que le ayude al usuario a desarrollar la modelación y simulación.	El modelo por ser un software más dinámico hubo dificultad en entendimientos de términos y seguimiento de los pasos importantes para el desarrollo de la modelación y simulación. Sin embargo, cuenta con guías que ayudan al usuario a seguir los pasos de la dinámica que desea desarrollar. El modelo cuenta con el manual donde especifica cada uno de las fórmulas y significados que el usuario debe conocer.
Permite realizar calibraciones	Para realizar la calibración cuenta con unas ventanas de color amarilla la cual son importantes para la calibración de los datos, sin embargo, no incluye el programa PIKAIA para determinar la sensibilidad del modelo, es por esto por lo que se recurre al programa Qual2kw versión 5, este incluye el Qual2k y el programa de calibración y determinante de sensibilidad mencionado anteriormente.	El programa contiene una auto-calibración, este se basa en un enlace que contiene el cual se usa para corregir los parámetros considerados por el usuario que se deben calibrar.
Simula el contenido modelado	Si, el modelo genera tablas de los cálculos y gráficas del comportamiento de los datos simulados.	Simula el contenido, mediante animación, imagen de visualización y gráficas.

Tabla 14: Continuación

Genera gráficas 1D	El modelo genera gráficas en 1D representadas por una línea recta.	El modelo genera gráficas en 1D y 2D, es versátil en cuanto a la ilustración de los resultados en una forma más dinámica.
Economía en el modelo	El modelo sí representa una ventaja económica puesto que no requiere de pagos para la obtención del programa.	El modelo presenta economía, es gratuito su uso y descarga. Los manuales no son muy específicos en cuanto al manejo del programa, pero contiene cursos de costo monetario para aprendizaje del programa.
Disponibilidad del software	El modelo es totalmente disponible y gratuito.	El modelo cuenta con disponibilidad, es gratuito, pero al ejecutarlo falta información en los manuales para aplicabilidad.
Acercamiento a valores reales en la simulación.	El modelo presenta valores reales cercanos a la realidad.	El modelo presenta valores cercanos a los de la realidad.

Teniendo en cuenta los criterios de evaluación se recomienda a las autoridades ambientales el uso del modelo Qual2k para evaluar los datos de monitoreo de los afluentes y cauces, con el fin de determinar la calidad del agua en sus condiciones, buenas, en riesgo o mala. La generación de datos evaluada por el modelo permite a la autoridad a generar acciones de medida de control y recuperación de los cauces que se encuentran contaminados y no pueden ser usados para actividades como agropecuarias, domésticas o potabilizada para consumo humano.

Si el modelo Iber es dinámico en cuanto a su funcionalidad, pero no simula todos los parámetros que se desean, el modelo se centra en la degradación del oxígeno disuelto, en el comportamiento biodegradable, la combinación del carbono orgánico total, y en parámetros químicos que influyen en las descargas de aguas residuales. El modelo es usado comúnmente para trabajos de hidrodinámica, turbulencia, transporte de sedimentos por carga de fondo y en suspensión.

El programa Qual2k representó de forma adecuada la modelación y simulación de los parámetros, esta herramienta es funcional para simular escenarios en el río Ocoa debido que al estar tan cercano a la ciudad de Villavicencio presenta puntos de descarga de aguas residuales no controladas, allí se puede tener en cuenta estudios del cambio climático.

Conclusiones

Los datos arrojados en las dos simulaciones muestran una realidad de lo que se presenta en el río Ocoa, en el Qual2k los valores aproximados de temperatura fue de un 98% , el OD de un 88%, DBO de un 88% y CFU de un 90% y en el modelo Iber generó valores aproximados en temperatura de 94%, en OD de 94% por encima, DBO 94% y en CFU no hubo cercanía a los datos reales debido que la simulación arrojó cero. La simulación representa el estado de afectación del río por la descarga de agua residuales además de los caños tributarios Caño Buque y Caño Maizaro, los cuales vienen con una carga contaminante que recibe de la ciudad y desembocan en el río Ocoa. Por esta razón se considera realiza la Gestión de los Recursos Hídricos para tener un mayor control y proteger los recursos naturales.

El Qual2k permite una simulación de los parámetros Temperatura, Alcalinidad Total, Conductividad, DBO, DQO, O2 Disuelto, pH, SST, Coliformes Totales. El comportamiento de la DBO lenta en la simulación no reflejó una interpretación en el transcurso del cauce debido a que los datos eran bajos y la sensibilidad del modelo, no representó la degradación. Sin embargo, para los valores de la DBO rápida (DQO) si se presentó el comportamiento esperado al ser las concentraciones más altas (36.73 mg O₂/L).

El modelo Iber presentó mayor enfoque en datos espaciales, para modelar el comportamiento de calidad del agua en cuanto al flujo hidrodinámico del río Ocoa, en comparación con el modelo Qual2k, que mostró afinación a los datos de entrada exigiendo los valores de los parámetros cada 24 horas, igualmente la representación geográfica es más sencilla en Qual2K, debido a que se hace en función de distancias.

El modelo indicado para el seguimiento del recurso hídrico es el Qual2k debido a su facilidad de manejo y obtención de resultados idóneos con el fin de implementar estrategias de prevención y/o control en la contaminación del río Ocoa. Es importante verificar continuamente en temporadas secas los parámetros físicos-químicos y biológicos del río con el fin de proteger la fauna y el recurso hídrico el cual es vital para el ser humano, por lo tanto, el uso de la herramienta Qual2k. El modelo Iber, aunque es más dinámico y arrojó valores cercanos a la realidad, no me permitió analizar el comportamiento de las otras variables, considerando que son importantes para la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico.

Los modelos Iber y Qual2k no se pueden comparar debido a que son modelos diferentes en cuanto a su especialidad, el modelo Iber se especializa más en componentes de módulos hidrodinámico para la simulación de flujos de ríos que de calidad, mientras que el modelo Qual2k simula sistemas hídricos de tipo dendrítico y el cauce es considerado completamente mezclado horizontal y verticalmente.

Las modelaciones no pretenden representar la evolución de la calidad del agua frente a eventos puntuales, sino por el contrario intentan reflejar la evolución espacio-temporal de la calidad del agua en los sistemas modelados, fruto de las diferentes alternativas de gestión, depuración, contaminación y uso del recurso

Recomendaciones

Analizar la DBO en escenarios más críticos donde el caudal sea más pequeño como en tiempo de sequía, uno de los posibles efectos que se esperan aumenten debido al cambio climático, por menores precipitaciones, con el fin de comprobar si el efecto de dilución del río no es tan grande y se observa la evolución de la DBO lenta en el trayecto.

Los programas son sensibles al simular los datos de calidad del agua, se recomienda aumentar el área de modelación con el fin de considerar todos los puntos de vertimiento, realizar diferentes puntos de muestreo para una mejor calibración, además sería útil añadir los vertimientos de tipo industrial y comercial que se dan en la zona, debido a que esto puede influir en la simulación, tomando como recuperación los distanciamientos entre puntos. Los parámetros como el OD y la DBO, se ven afectados al determinar la constante de aireación, influyendo está en las características hidráulicas del río (velocidad y profundidad).

Se recomienda seleccionar tramos cortos específicos del área que se requiera investigar en cuanto a calidad del agua, debido a que los programas presentan dificultad al generar procesos de calibración y validación debido a la extensión del tramo. Se recomienda el uso de los modelos hídricos con versiones actualizadas, estos están en constante cambios, combinando los mejores componentes de modelos de simulación existentes y bien probados, como el nivel de escala espacial o temporal, la adaptabilidad, los requisitos de datos y la facilidad del uso.

Se recomienda el uso de la Guía Nacional para la Modelación Recurso Hídrico Superficial Continental, como implementación de herramientas de modelación matemática que permitan estimar la capacidad de los cuerpos de agua superficiales continentales para asimilar cargas contaminantes, así como contar con información para la toma de decisiones asociadas a la descontaminación, mediante la simulación de escenarios futuros.

El uso de más datos para la modelación, teniendo en cuenta que en la investigación realizada solo se tomó una toma de datos, es decir, de un día, por esta razón, se considera mínimo tener datos de 3 años en épocas donde el fenómeno del niño este presente para una mejor aplicabilidad y poder representar escenarios futuros.

Bibliografía

- Arenas, F. G. (Octubre de 2004). *Modelación de la calidad del agua en un río de montaña colombiano (Quebrada La Legía)*. Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21262/u250653.pdf?sequence=1>
- Arroyave, G. D. (2013). Estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia. *Revista ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 33-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/750/75029150004.pdf>
- Barrientos, F. R. (2006). Cuencas hidrográficas, descentralización y desarrollo regional participativo. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, VII(12), 113-125. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66612867008>
- Berger, L. (2016). *Informe de modelación de la calidad del agua para el río Aguacate*. Informe de proyecto publicitario. Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/ar/219701468332707905/pdf/SFG2155-V1-REVISED-EA-SPANISH-P154275-Box402888B-PUBLIC-Disclosed-2-17-2017.pdf>
- Boards, W. (2014). *Folleto Informativo*. Obtenido de Oxígeno Disuelto (OD): https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3110sp
- Camelo, P. H. (2006). *Aplicación de una herramienta para el análisis del impacto de la cuenca baja del río Bogotá en la calidad del agua del río Magdalena (Tramo Girardot.Honda)*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22513/u270690.pdf?sequence=1>
- Cardenas, N. S. (2015). *Estimación de constantes de desoxigenación carbonácea en el río Teusacá*. Proyecto de grado de Ingeniería ambiental., Universidad de los Andes, Departamento de ingeniería civil y ambiental, Bogotá DC. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17675/u714053.pdf?sequence=1>
- Careño, J. P. (09 de 03 de 2015). *Modelación de la calidad del agua río rojo, Municipio de Genóva Departamento del Quindío*. Proyecto "Pensamos en el futuro, ahorremos el agua",

- Corporación Autónoma del Quindío, Quindío. Obtenido de <https://www.crq.gov.co/2020/images/Info-Ciudadano/Descarga%20documentos/MODELACIONRIOROJO.pdf>
- Carvajal, L. (2003). Un modelo de gestión de la calidad y cantidad de agua con lógica difusa gris para el río Aburrá. (U. d. Medellín, Ed.) *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16. Obtenido de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/631/572>
- Castro, Y. S., Zuñiga, L. A., & Alvarado, D. M. (11 de Agosto de 2017). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Scielo*, 12. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n1/0379-3982-tem-31-01-35.pdf>
- Chapra, S., Pelleteir, G., & Tao, H. (29 de Mayo de 2012). Guía metodológica QUAL2K. *QUAL2K*, 97.
- Collazos, G., Villanueva, I., Briceño, N., & Cazenave, G. (2018). *Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre*. Informe de presentación , XXVIII Congreso latinoamericano de Hidráulica Buenos Aires , Buenos Aires, Argentina. Obtenido de <http://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/8958>
- Colombia, S. d. (2019). *Oferta del agua*. Obtenido de http://cifras.siac.gov.co/Portal-SIAC-web/faces/agua_inicio.xhtml
- Dasso, C., Piovano, E., Pasquini, A., Cordoba, F., Lecomte, K., & Campodonico, L. G. (2014). Recursos hídricos superficiales. En R. M. Guerreschi (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (págs. 1209-1231). Argentina. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/264935177_Recursos_Hidricos_Superficiales
- Durán, L. E. (2016). *Evaluación de la calidad del agua de los rios de Colombia usando parámetro físicos, químicos y biológicos*. Trabajo de grado. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/229944869.pdf>
- Ecofluidos, I. (2012). *Estudio de la calidad de fuentes utilizadas para consumo humano y plan de mitigación por contaminación por uso doméstico y agro químicos en Apurimac Y Cusco*. Agencia solicitante OPS/OMS, Fondo para el logro de los ODM. Peru: Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de <https://www1.paho.org/per/images/stories/PyP/PER37/15.pdf>

- Galán, Y. A. (2010). *Diagnóstico actual de los parámetros físicoquímicos como indicadores de contaminación ambiental en el Río Apulo*. Trabajo de grado, Cundinamarca-Colombia. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v15n28/v15n28a06.pdf>
- Ganoulis, J. (11 de Septiembre de 2005). Modelling river Water Quality from diffuse sources at the Catchment Scale. *XXXI IAHR Congress*. Recuperado el 2021, de [http://www.inweb.gr/files/Papers/Modelling%20River%20Water%20Quality%20from%20Diffuse%20Sources%20at%20the%20Catchment%20Scale%20\(2005\).pdf](http://www.inweb.gr/files/Papers/Modelling%20River%20Water%20Quality%20from%20Diffuse%20Sources%20at%20the%20Catchment%20Scale%20(2005).pdf)
- García, R. M. (2018). *Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en dos dimensiones del cuerpo hidrico lenticó zona sur del humedal Capellania, localidad de Fontibon, Bogota D.C. Colombia con el Software Iber*. Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14308/2018mariagarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, J. V. (2016). Determinación de las tasas de oxidación, nitrificación y sedimentación en el proceso de autopurificación de un río de montaña. *Revista chilena de ingeniería*, 4(2). doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000200013>
- Guzmán, A. I. (2012). *Modelación hidrodinámica y morfológica del Río La Estrella*. Trabajo de grado, Tecnología de Costa Rica. Obtenido de <file:///C:/Users/usuario/Downloads/9339.pdf>
- Hernández, J. (2016). *Modelación Hidrodinámica y de la calidad del agua para la evaluación ambiental de vertimientos generados a la ciénaga Mesolandia*. "Tesis de Grado", Universidad de la Costa, Barranquilla, Atlántico-Colombia. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14308/2018mariagarcia.pdf?sequence=1>
- Huertas, M. A. (2015). *Aplicación del Qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, Departamento de Caldas Colombia*. Trabajo de profundización como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería- Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55604/1053781847.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hugues, R. T. (Diciembre de 2012). Hídricos: Una herramienta de investigación y desarrollo en ingeniería costera. (I. h. ambiental, Ed.) 33(3). Obtenido de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382012000300008&lng=es&nrm=iso

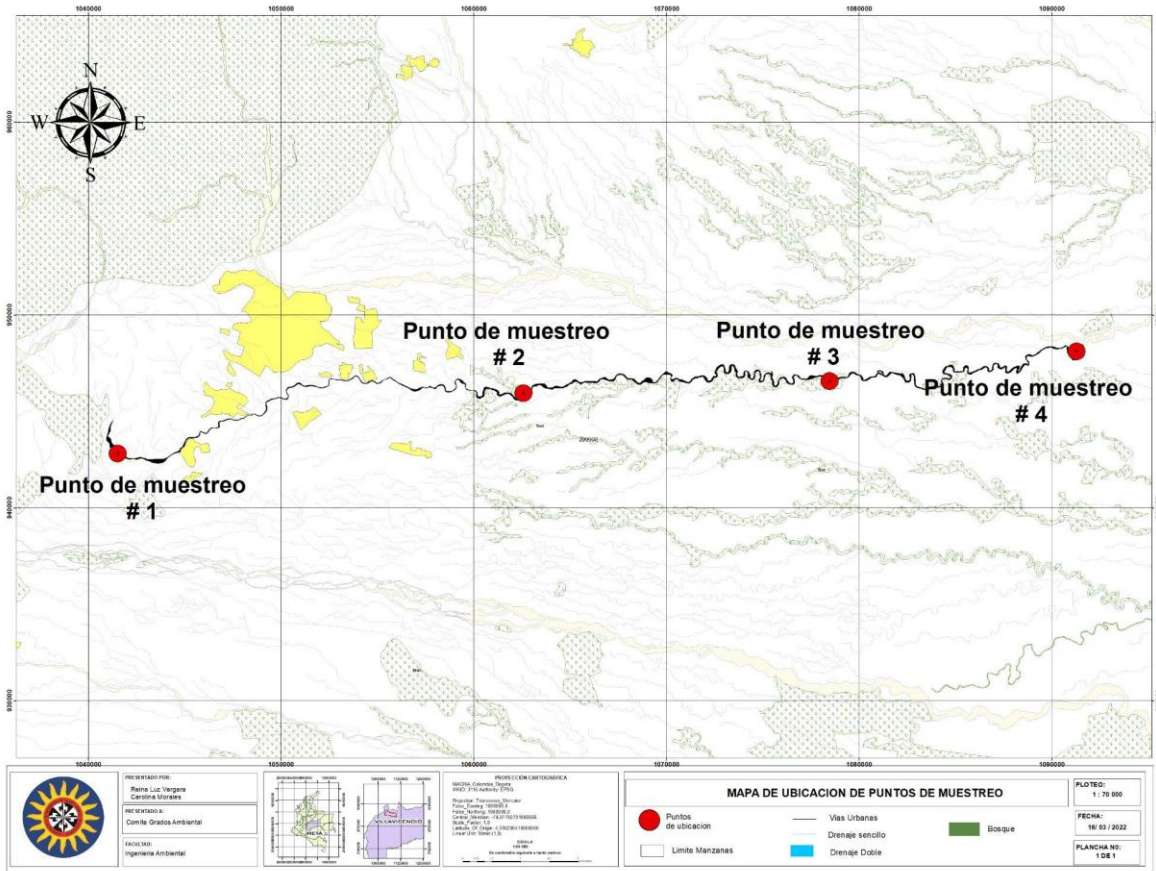
- IDEAM. (2018). *Observatorio colombiano de gobernanza del agua*. Obtenido de Administración del recurso hídrico en Colombia: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/instrumentos-de-planificacion-y-administracion-del-recurso-hidrico#:~:text=En%20Colombia%20La%20administraci%C3%B3n%20del%20recurso%20h%C3%ADrico%20est%C3%A1%20dada%20por,efectividad%20lo%20cual%20busca%20garantizar>
- Jiménez, R. A. (2018). Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Recuperado el 2021, de <file:///C:/Users/usuario/Downloads/inveseci-evaluacin-de-la-evolucion-de-cargas-contaminantes-aportadas-por-vertimientos-de-aguas-residuales-en-un-humedal-natural.pdf>
- Losada, L. R.-S. (2020). Evaluación de la calidad del agua en el embalse hidroeléctrico El Quimbo. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 107-116. doi:DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.1800>
- MADS, M. d. (2018). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*. Bogotá. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/15.-Anexo-15-Guia-Nacional-de-Modelacion-del-Recurso-Hidrico.pdf>
- Mijares, F. J. (Octubre de 1990). *Modelación hidrológica*. Obtenido de <http://posgrado.imta.edu.mx/index.php/semblanza-curricular-dr-francisco-javier-aparicio-mijares>
- Ocampo, O., & Vélez, J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n24/v13n24a04.pdf>
- Ponce, Y. C. (Octubre de 2016). *Propuesta de conservación y manejo del recurso hídrico subterráneo, para impulsar el desarrollo local sostenible*. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12807/1/TESIS%20ACOASA.pdf>
- Poveda, M. D. (Enero de 2010). Determinación de indicadores de contaminación fecal. *Grupo de Investigación en Calidad Ambiental*, 11. Obtenido de Congreso Iberoamericano de

- Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación:
file:///C:/Users/Derly%20Morales/Downloads/602-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1255-1-10-20110819.pdf
- Puerto, I. L. (2007). *Aplicación de técnica de óptomización mediante algoritmo geneticos para calibracion del modelo Qual2k como una aproximación a la modelación de calidad del agua de los principales rios de la zona urbana de Bogotá D.C.* Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de ingeniería civil, Bogotá D.C. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3805>
- Quintero, H. A., & Neira, N. O. (2008). *Modelación de la calidad del agua en corrientes naturaleza mediante sistemas llineales no aclopados.* Bogotá D.C: Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3809>
- Rodriguez, M. A., & Gomez, D. V. (2018). *Modelación Hidrodinamica de la calidad del agua en dos dimensiones del cuepo hidrico léntico zona sur del humedal Capellsnia Localidad de Fontibon Bogota D.C Colombia con el software Iber.* tesis pregrado, Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingenieria Ambiental, Bogota D.C. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14308/2018mariagarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, J. (2013). Análisis comparativo de modelos e instrumentos de gestión integrada. *Revista Ambiente y Agua*, 25. Obtenido de <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/CmwdfBcSVV3dr8bgVsJ4YBC/?format=pdf&lang=es>
- Salamea, G. T. (Octubre de 2015). *Modelamiento bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte a través del río Calabí y obras hidráulicas.* Trabajo de grado, Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23116/1/tesis.pdf>
- Sanchez, M. M. (2013). *Contribucción al estudio de la demanda bioquímica del oxígeno.* Trabajo de grado, Universidad autonoma de nuevo leon. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/7204/1/1020091184.PDF>
- Slon, H. V. (2008). *Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica.* Proyecto de Graduación –

- Licenciatura Ingeniería Civil, San José, Costa Rica. Obtenido de <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Calibraci%C3%B3n%20del%20modelo%20matem%C3%A1tico%20QUAL2K%20para%20el%20an%C3%A1lisis%20de%20calidad%20del%20agua%20para%20el%20coso%20de%20r%C3%ADo%20especifico%20en%20Costa%20Rica.pdf>
- Tolima, U. d. (Julio de 2007). *Diagnostico de calidad del agua*. Obtenido de SENA, Corpoica: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/l_211calidad_de_aguas.pdf
- Tony M, E. P. (02 de Agosto de 2016). Tech note: Determination of water quality index (WQI) of Moron river ´. *Revista INGENIERÍA UC*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/707/70746634011.pdf>
- Vasques, L., & Valencia, C. (2019). *Aportes de los parametros de la alcalinidad total y conductividad electrica para la autodepuración de corrientes superficiales*. Traba de grado para obtención de titulo de Ingeniero Civil, Universidad Católica de Colombia, Programa de ingenieria civil, Bogota DC. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24417/2/505151-Valencia-GodoyCA-y-505078-V%C3%A1squez-Nemoc%C3%B3nLF-TdeG.pdf>
- Villa, S. D., & Castillo, L. C. (2015). *Evaluación de la aplicabilidad del índice de agua potable como elemento para la determinación de la calidad de agua en el municipio de Honda Tolima*. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad de La Salle, Bogota DC. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/319?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_ambiental_sanitaria%2F319&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCove rPages
- Yimmy Montoya, Y. A. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río Negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices del ICA, el BMWP/COL y el ASPT. *revistas.unal.edu.co*, 33, 33. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36386/37981>

Anexos

Anexo 1. Mapa de ubicación



Puntos de muestreo en el tramo del río Ocoa (Autores, 2019)

Anexo 2. Modelo Qual2k

Anexo 2.1: Condiciones generales

La elección del modelo hídrico Qual2k para este estudio se determinó por las siguientes características:

- El modelo opera con la herramienta Excel, lo que facilita la captura de datos, así como la generación y presentación de resultados,
- El programa no limita la especificación de número de tramos que se pueden modelar.
- El modelo realiza un análisis unidimensional, el cual permite realizar una mezcla lateral como vertical, así mismo, se incorporan los aportes laterales de los efluentes o tributarios.
- En los cálculos de cada elemento existe un equilibrio hidrológico en flujo, en calor térmico de la temperatura y balance de masa en concentraciones.
- Permite el cálculo de las interacciones entre el agua y los sedimentos en forma explícita determinando la calidad del agua.
- El modelo considera procesos en interacción entre los sedimentos y el agua, algas inferiores, extinción de luz, pH y patógenos.
- Entre las características hidráulicas necesarias se encuentran profundidad y velocidad.
- El tiempo del recorrido es calculado en función del volumen y del flujo de este tramo.
- Utiliza reacciones bioquímicas como fotosíntesis o respiración, generación y consumo de oxígeno.

El modelo utiliza diferentes variables de modelación de los cuales solo se van a utilizar temperatura, conductividad y sólidos suspendidos totales (SST).

Tabla 15: Variables de modelación del Qual2k

<i>Water Quality Constituents</i>	<i>Units</i>
Temperature	C
Conductivity	umhos
Inorganic Solids	mgD/L
Dissolved Oxygen	mg/L
CBODslow	mgO2/L
CBODfast	mgO2/L
Organic Nitrogen	ugN/L
NH4-Nitrogen	ugN/L
NO3-Nitrogen	ugN/L
Organic Phosphorus	ugP/L
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L

Phytoplankton	ugA/L
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L
Detritus (POM)	mgD/L
Pathogen	cfu/100 mL
	mg
Alkalinity	CaCO3/L
Constituent i	
Constituent ii	
Constituent iii	
pH	s.u.

Fuente: Tomado de documento Excel Headwater, modelo Qual2k Versión 2.12

Anexo 2.2 Ecuaciones empleadas para la simulación de la calidad del agua con el modelo Qual2k

Para llevar a cabo la simulación del río Ocoa se tuvo en cuenta un balance de flujo el cual funciona bajo un régimen estacionario, lo que significa que el flujo de entrada y de salida en cada uno de los componentes que se realizan en la operación de este programa se mantienen constantes en el tiempo. Este se desarrolló mediante un esquema.

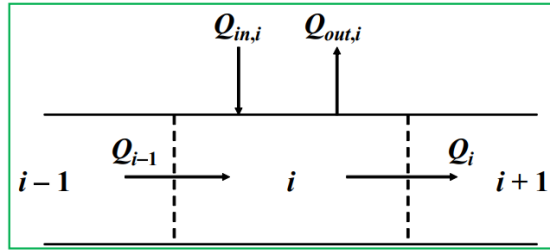
Luego se determinó el tiempo de viaje donde se tomó la sumatoria de los períodos de residencia del flujo para así mismo tener los elementos computacionales que se han definido en el transcurso de la corriente, las ecuaciones que corresponden a estos cálculos son: (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012)

$$k = \frac{V_k}{Q_k} t_{t,j} = \sum_{k=1}^j k$$

Donde:

Tk =Tiempo de Residencia de cada elemento; Vk =Volumen de Cada Elemento (m³);
Qk=Caudal en cada elemento (m³/s); tt, j = Tiempo de Viaje de la Corriente.

Balance de flujo:



En donde, \$Q_i\$: Caudal de Salida del Elemento computacional; \$Q_{i-1}\$: Caudal de Entrada del Elemento Computacional; \$Q_{in, i}\$: Entrada de Caudal neto lateral por fuentes puntuales y difusas; \$Q_{out, i}\$: Salida de Caudal neto lateral por Fuentes puntuales y difusas.

Entre las principales entradas contempladas en el software, se encuentran: Condiciones aguas arriba del tramo o los tramos a simular, características físicas e hidráulicas de la corriente, constantes de reacción físicas y químicas, y datos correspondientes al aporte y abstracción de diferentes fuentes sobre la corriente principal, entre las cuales se contemplaron las descargas tanto puntuales como difusas sobre dicha corriente (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012).

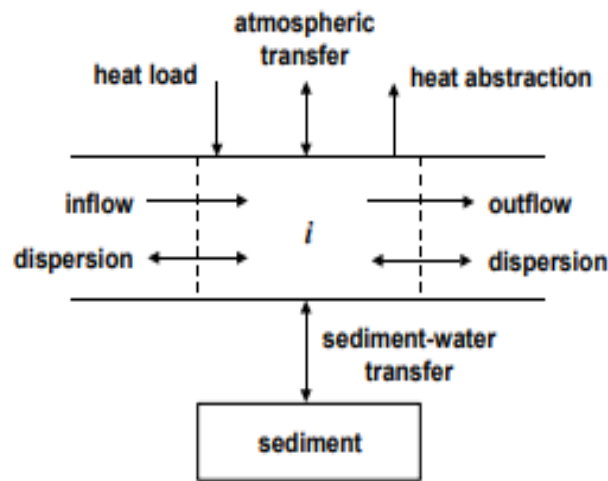
Balance térmico:

El balance de calor o de temperatura en cada uno de los elementos que conforman el sistema es función de la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de la transferencia de calor entre los sedimentos, el agua y la atmósfera, de las entradas y salidas externas al sistema (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012).

$$0 = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w * C_{pw} * V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 cm^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left(\frac{m}{100cm} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left(\frac{m}{100cm} \right)$$

En donde, \$T_i\$: temperatura en el elemento \$i\$; \$E'_i\$: coeficiente de dispersión del volumen entre los elementos \$i\$ e \$i+1\$; \$W_{h, i}\$: carga neta de calor de fuentes puntuales y no puntuales en el elemento \$i\$; \$\rho_w\$: densidad del agua; \$C_{pw}\$: calor específico del agua; \$J_{a, i}\$: flujo de calor aire-agua; \$J_{s, i}\$: flujo de calor entre agua y sedimentos (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012).

Esquema de balance térmico



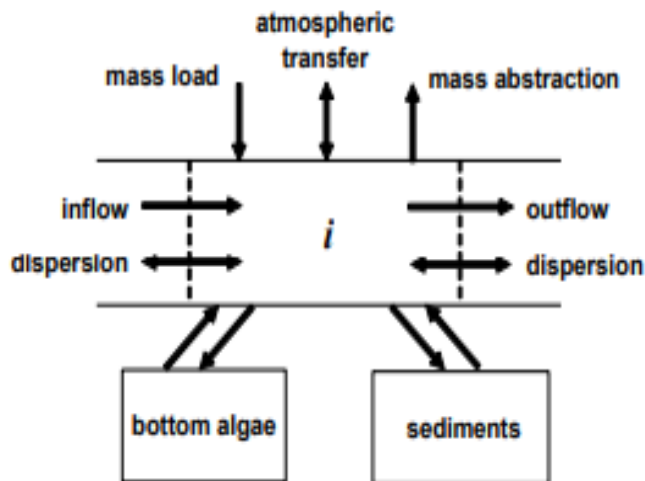
Balance de masa

El modelo Qual2K considera por cada constituyente (parámetro fisicoquímico o biológico) un balance general de masa en cada elemento computacional la cual involucra los efectos de dispersión, dilución, consumo o generación de constituyentes por reacciones químicas o bioquímicas y la generación o pérdida de nutrientes por fuentes externas o internas (descargas puntuales, captaciones, etc.) (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012).

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

En donde, C_i : Concentración; Q_i : Flujo en el i ésimo segmento; Q_{ab} : Salida en el elemento i debido a extracción puntual o difusa; V_i : Volumen incremental del i ésimo segmento; t : Tiempo; S_i : Fuentes y sumideros del constituyente debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa; E_i : Coeficiente de dispersión longitudinal entre segmentos i y $i+1$; S_i : Carga externa del constituyente en el elemento i (Chapra, Pelleteir, & Tao, 2012).

Esquema de balance de masa



Anexo 3. Modelo Iber

Anexo 3.1 Condiciones generales

El modelo contempla las siguientes características:

- Exportación de resultados en distintos formatos, entre ellos el formato ASCII de ArcInfo, que permite observar y tratar los resultados en un entorno GIS y comparar el funcionamiento hidráulico de distintos escenarios.
- Modelización 1 dimensión del flujo en lámina libre
- Esquemas numéricos en volúmenes finitos, planteados en forma integral y conservativa.
- Es posible considerar el aporte de masa de agua generado por un episodio de precipitación variable en el tiempo y en el espacio
- Tiene 3 módulos de cálculo
- Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros
- Módulo hidrodinámico: constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D).

- Módulo de turbulencia: permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad.
- El módulo de transporte de sedimentos: resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.
- Módulo de calidad del agua: cálculo de las relaciones entre materias que consumen oxígeno y la concentración de oxígeno disuelto y variación de la DBO.
- Módulo de precipitación - escorrentía: modelo hidrológico conceptual cuasi distribuido en el que se tiene en cuenta la nieve, el almacenamiento superficial y radicular, la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía superficial y la subterránea.

Anexo 3.2 Ecuaciones empleadas para la simulación de la calidad del agua con el modelo Iber

Este programa nos permite la simulación de la calidad del agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, y canales entre otros. Es un sistema dinámico unidimensional, de sencilla aplicación en sistemas con diferente grado de complejidad. Debido a su flexibilidad y velocidad. Esta herramienta combina un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, también el método de volúmenes finitos para solucionar las ecuaciones convenientes. Al módulo de cálculo se le ha adaptado una interfaz que se basa en el software de preproceso y posproceso GiD, desarrollado por CIMNE.

Módulo hidrodinámico: Ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales en general.

Ecuación 1. Ecuaciones hidrodinámicas En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\partial hU \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial X} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -g^h \frac{\partial z_s}{\partial X} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \sin \lambda u_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} \\ = -g h \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2\Omega \sin \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \end{aligned}$$

En donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, $\tau_{xx}^e \tau_{xy}^e \tau_{yy}^e$ Son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Ecuación 2. Radio Hidráulico

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h \Delta x}{\Delta x} = h$$

Ecuación 3. Coeficiente de rugosidad

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{\frac{1}{3}}}$$

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad.

Ecuación 4. Rozamiento superficial por viento

$$\tau_s = \rho C_{vd} V_{10}^2$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se puede calcular a partir de la velocidad del viento a 10 metros de altura y un coeficiente de arrastre, utilizando la ecuación de Van Dorn (1953):

Donde ρ es la densidad del agua, v_{10} la velocidad del viento a 10 metros de altura y C_{vd} es el coeficiente de arrastre superficial. Por defecto se toma un coeficiente de arrastre de $C_{vd} = 2.5 \cdot 10^6$.

Módulo turbulencia: análisis en lámina libre, este módulo es importante ya que es donde se representan los remolinos que muestran la difusión de sustancias solubles, mezcla de contaminantes, sedimentos y sólidos suspendidos etc.

Ecuación 5. Modelo de longitud de mezcla

$$Vt = [\min(0.267 \kappa h, \kappa d_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{U_f}{\kappa h}\right)^2}$$

Donde $\kappa=0.41$ es la constante de von Karman. Es un modelo algebraico relativamente sencillo, que permite obtener resultados aceptables en flujos en los que la turbulencia está generada local y principalmente por el rozamiento del fondo.

Módulo de transporte de sólido: El caudal sólido de fondo se calcula mediante una formulación empírica, pudiéndose elegir entre la formulación de Meyer-Peter Müller y la de Van Rijn. El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación de transporte turbulento promediada en profundidad.

Ecuación 6. Ecuación de conservación del sedimento

$$(1 - P) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E$$

La variación de la cota del fondo se calcula mediante la ecuación de conservación del sedimento de Exner. donde p es la porosidad de los sedimentos que forman el lecho, Z_b es la cota del fondo, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ son las dos componentes del caudal sólido de fondo. La diferencia $D-E$ representa un balance entre carga de fondo y carga en suspensión.

Ecuación 7. Meyer-Peter Müller (1948)

$$q_{sb}^* = 8 \cdot (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}} = 8 \cdot (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{\frac{3}{2}}$$

La ecuación original de Meyer-Peter y Müller, deducida para fondos de grava de hasta 30 mm de diámetro, calcula el caudal sólido de fondo con la anterior expresión.

Ecuación 8. Van Rijn (1984).

$$T < 0.3 \rightarrow q_{sb}^* = 0.053 \cdot \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}}$$

$$T > 0.3 \rightarrow q_{sb}^* = 0.100 \cdot \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

Siendo T un parámetro adimensional que mide el exceso de fricción de fondo por encima del valor crítico que define el umbral del movimiento.

Ecuación 9. Resuelve las ecuaciones integradas verticalmente para la conservación de continuidad y momento, lo que significa resolver las ecuaciones de Saint Venant para flujos en estado no permanente como para cuasi permanente (Paz, 2014)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Ecuación 10. Ecuación de temperatura

$$s_\tau = \frac{Q}{\rho C_{pw}}$$

Donde Cpw es el calor específico del agua, ρ es la densidad del agua y q es el flujo neto de calor entre aire y agua. El término ST representa las transferencias de calor a través de la interface aire-agua.

$$Q = Q_{rad} - Q_{br} - Q_{cond} - Q_{evap}$$

Donde Qrad es la radiación neta incidente (W/m²), que comprende la radiación solar de onda corta y la radiación atmosférica de onda larga, Qbr es la radiación de onda larga emitida por el agua, Qcond es el calor transferido por conducción entre el aire y el agua y Qevap es la transferencia de energía por evaporación/condensación del agua.

Ecuación 11. Ecuación de transporte

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xC) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_yC) = \frac{\partial F_{dx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{dy}}{\partial y} + S_c h$$

Donde CC es la concentración de la variable considerada (promediada en profundidad), h es el calado, (U_x, U_y) son las dos componentes de la velocidad del agua promediadas en profundidad, S_c es un término fuente/sumidero que modela la generación/degradación de la sustancia considerada, y (F_d, x, F_d, y) son flujos difusivos/dispersivos que modelan la mezcla debido a efectos como la difusión laminar, turbulencia o dispersión por oleaje.

Ecuación 12. Materia orgánica

$$S_{DBOC}^{sed} = \frac{v_{sDBOC}}{h} DBOC$$

Donde v_{sDBOC} es la velocidad de sedimentación de la materia orgánica carbonosa (con valores habituales entre 0.01 y 0.36 m/d) y h es el calado.

Ecuación 13. Oxígeno disuelto

$$S_{OD} = S_{OD}^{reair} - S_{DBOC}^{deg} - r_a S_{NH_3}^{nit} + r_{oa} S_A^{Foto} - r_{oa} S_A^{reSp} - S_{OD}^{DOS}$$

Donde S_{OD}^{reair} representa el incremento de oxígeno disuelto por reaireación, S_{DBOC}^{deg} es el consumo de oxígeno disuelto durante el proceso de degradación de la materia orgánica carbonosa, $S_{NH_3}^{nit}$ es el consumo de nitrógeno en forma amoniacal en el proceso de nitrificación, S_A^{Foto} es la generación de Chl-A por fotosíntesis del fitoplancton, S_A^{reSp} es la disminución de Chl-A por respiración del fitoplancton, r_{oa} es el consumo de oxígeno por oxidación del amonio ($r_a = \frac{4.57mgO}{mgN}$) Es la relación entre la masa de oxígeno y la masa de Chl-A en los procesos de fotosíntesis y de respiración del fitoplancton.

Ecuación 13. Reaireación

$$S_{OD}^{reair} = K_{aire} \theta_1^{(T-20)} (OD_{sat} - OD)$$

Donde K_{aire} es la constante de reaireación a 20°C, T es la temperatura del agua en °C, OD_{sat} la concentración de saturación de oxígeno disuelto y θ_1 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_1 = 1.0238$).

La constante de reaeración K_{aire} se calcula en función del calado (h), la velocidad del agua (U) y la velocidad del viento (V_{viento}) según la siguiente ecuación

$$K_{aire} = K_{aire} + \frac{K_{airew}}{h}$$

Siendo K_{aire} la constante de reaeración a 20°C basada en las características hidráulicas del río (velocidad y profundidad) y K_{aire} el coeficiente de aireación en función de la velocidad del viento.

Ecuación 14. Alcalinidad

$$Alk\left(\frac{mg}{l} CO_3Ca\right) = 50.000 \cdot Alk\left(\frac{eq}{l}\right)$$

En la versión actual del modelo la alcalinidad se trata como una variable conservativa, por lo que su término fuente es igual a cero.

Ecuación 15. pH

$$p^H = -\log_{10}[H^+]$$

Ecuación 16. Escherichia Coli

$$s_c = -K_{dec} * c$$

Donde K_{dec} es la constante de desaparición bacteriana y C es la concentración de E. Coli.

Anexo 4. Decreto 1594 de 1984

Capítulo IV: De los criterios de calidad para destinación del recurso

Artículo 38: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

Referencia	Expresado como	Valor
Amoníaco	N	1.0
Arsénico D5:D5: G25	As	0.05
Bario	Ba	1.0

Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN-	0.2
Cinc	Zn	15.0
Cloruros	Cl-	250.0
Cobre	Cu	1.0
Color	Color real	75 U, escala Platino-Cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr+6	0.05
Difenil Policlorados	C. de agente activo	No detectable
Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10.0
Nitritos	N	1.0
pH	Unidades	5.0- 9.0 Unidades
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO ₄	400.0
Tensoactivos	Activa azul metileno	0.5
Coliformes Totales	NMP	20.000 microorganismos/100ml
Coliformes Fecales	NMP	2.000 microorganismos/100 ml.

Artículo 39: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solo desinfección (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

Referencia	Expresado como	Valor
Amoníaco	N	1.0
Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1.0
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN	0.2
Cinc	Zn	15.0
Cloruros	Cl-	250.0
Cobre	Cu	1.0
Color	Color Real	20 U, escala platino-cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr+6	0.05
Difenil Policlorados	Concentración agente activo	no detectable

Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10.0
Nitritos	N	10
Ph	Unidades	6.5-8.5 unidades
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO=4	400.0
Tensoactivos	Sustancias activas azul metileno	0.5
Turbiedad	UJT	10 unidades Jackson
Coliformes Totales	NMP	1.000 microorganismos/100ml.

Artículo 40: Los criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los siguientes:

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr+6	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
Ph	Unidades	4.5-9.0 Unidades
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

Artículo 41: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso pecuario, son los siguientes (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.2
Boro	B	5.0
Cadmio	Cd	0.05
Cinc	Zn	25.0
Cobre	Cu	0.5
Cromo	Cr+6	1.0
Mercurio	Hg	0.01
Nitratos + Nitritos	N	100.0
Nitrito	N	10.0
Plomo	Pb	0.1
Contenido de sales	Peso total	3.000

Artículo 42: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario, son los siguientes (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

Referencia	Expresado como	Valor
Coliformes fecales ml	NMP	200 microorganismos/100
Compuestos Fenólicos	NMP	1.000 microorganismos/100
Compuestos Fenólicos Oxígeno disuelto	Fenol	0.002 70% C. de saturación
pH Tensoactivos	Unidades Sustancias activas al azul metileno	5.0 - 9.0 unidades 0.5

Artículo 43: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto secundario, serán los siguientes (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

Referencia	Expresado como	Valor
------------	----------------	-------

Coliformes totales ml	NMP	5.000 microorganismos/100
Oxígeno disuelto Concentración		70% saturación
Ph Tenso activos	Unidades, Sustancias activas al azul metileno	5.0 - 9.0 unidades 0.5

Artículo 44: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso estético son los siguientes (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

1. Ausencia de material flotante y de espumas, provenientes de la actividad humana.
- b. Ausencia de grasas y aceites que formen película visible.
- c. Ausencia de sustancias que produzcan olor.

Artículo 45: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarios son los siguientes (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984):

Referencia	Expresado como	Valor		
		Agua fría dulce	cálida dulce	marina y estuario
Clorofenoles	Clorofenol	0.5	0.5	0.5
Difenil		0.0001	0.001	0.001
Oxígeno disuelto	concentración de agente activo	5.0	4.0	4.0
pH	Unidades	6.5 -9.0	4.5 - 9.0	6.5 - 8.5
Sulfuro de Hidrógeno ionizado	H2S	0.0002	0.0002	0.0002
Amoníaco	NH3	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 – 50

Arsénico	As	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Bario	Ba	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Berilio	Be	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Cadmio	Cd	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Cianuro libre	CN	0.05 CL ^96 - 50	0.05 CL ^96 - 50	0.05 CL ^96 - 50
Cinc	ZN	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Cloro total residual	Cl2	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Cobre	Cu	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Cromo Hexavalente	Cr+6	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Fenoles Monohídricos	Fenoles	1.0 CL ^96 - 50	1.0 CL ^96 - 50	1.0 CL ^96 - 50
Grasas y aceites	Grasas como porcentaje de sólidos secos	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50

Referencia	Expresado como	Valor		
		Agua fría dulce	cálida dulce	marina y estuario
Hierro	Fe	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Manganeso	Mn	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50	0.1 CL ^96 - 50
Mercurio	Hg	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Níquel	Ni	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Plaguicidas organoclorados (cada variedad)	Concentración de agente activo	0.001 CL ^96 - 50	0.001 CL ^96 - 50	0.001 CL ^96 - 50
Plaguicidas organofosforados (cada variedad)	Concentración de agente activo	0.05 CL ^96 - 50	0.05 CL ^96 - 50	0.05 CL ^96 - 50
Plata	Ag	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50

Plomo	Pb	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Selenio	Se	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50	0.01 CL ^96 - 50
Tensoactivos	S. activas al azul metileno	0.143 CL ^96 - 50	0.143 CL ^96 - 50	0.143 CL ^96 - 50

Artículo 46: Corresponde a la EMAR la realización de bioensayos que permitan establecer los valores de la CL9650 de los parámetros contemplados en el artículo anterior, como también el establecimiento del NMP de coliformes totales para acuicultura y los valores para temperaturas según las diversas situaciones (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

Artículo 47: Para los usos referentes a transporte, dilución y asimilación no se establecen criterios de calidad, sin perjuicio del control de vertimientos correspondiente (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

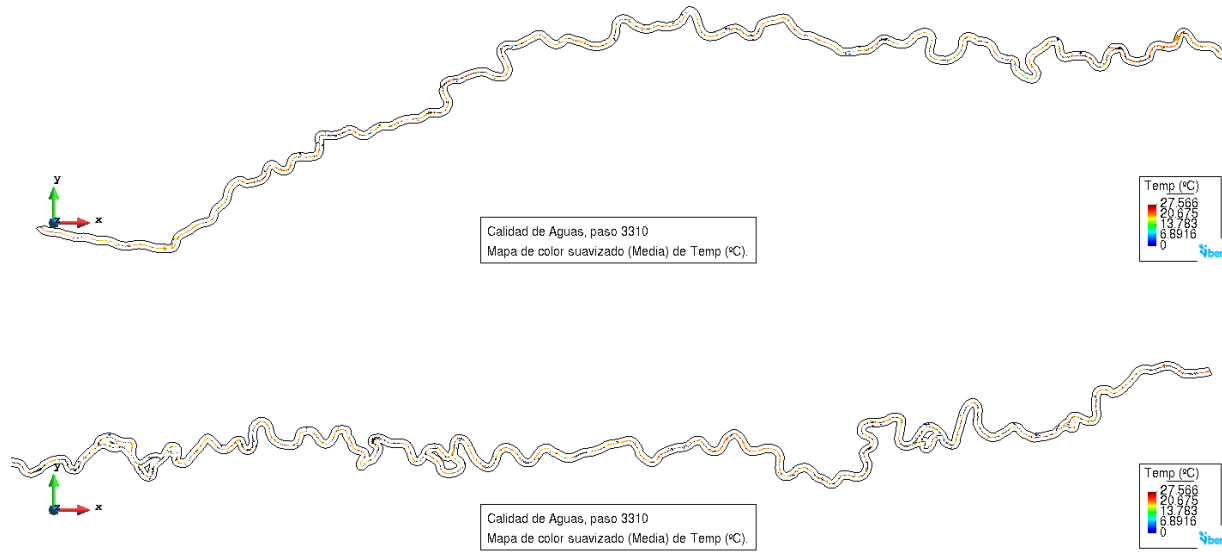
Artículo 48: Para el uso industrial no se establecen criterios de calidad, con excepción de las actividades relacionadas con explotación de cauces, playas y lechos, para las cuales se deberán tener en cuenta los criterios contemplados en el parágrafos 1 del artículo 42 y en el artículo 43 en lo referente a sustancias tóxicas o irritantes, pH, grasas y aceites flotantes, materiales flotantes provenientes de actividad humana y coliformes totales (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

Artículo 49: En los sitios en donde se asignen usos múltiples, los criterios de calidad para la destinación del recurso, corresponderá a los valores más restrictivos de cada referencia (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

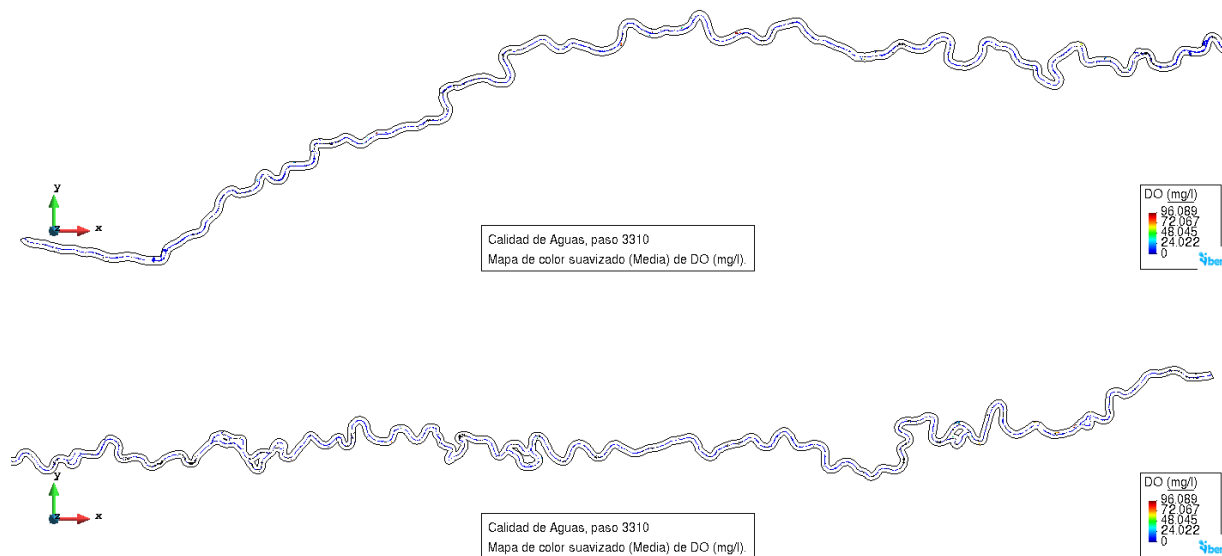
Artículo 50: El Ministerio de Salud o la EMAR podrán complementar o modificarlos criterios de calidad de agua para los distintos usos contenidos en el presente Decreto, cuando por razones de protección de los recursos naturales y de la salud humana se requiera, de acuerdo a los procedimientos establecidos en el Capítulo XI del presente Decreto (DECRETO 1594: Usos del agua y residuos líquidos, 1984).

Anexo 5. Ilustración de la simulación del modelo Iber

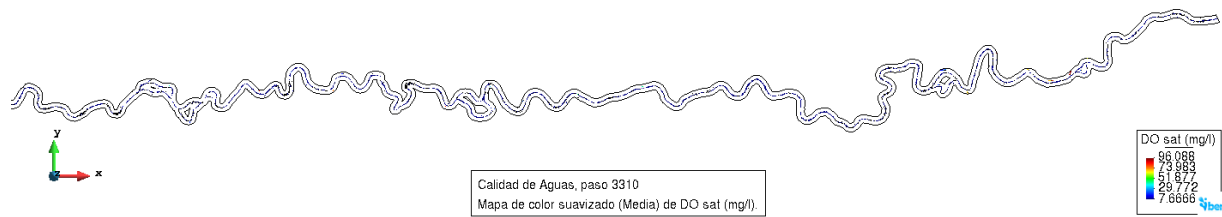
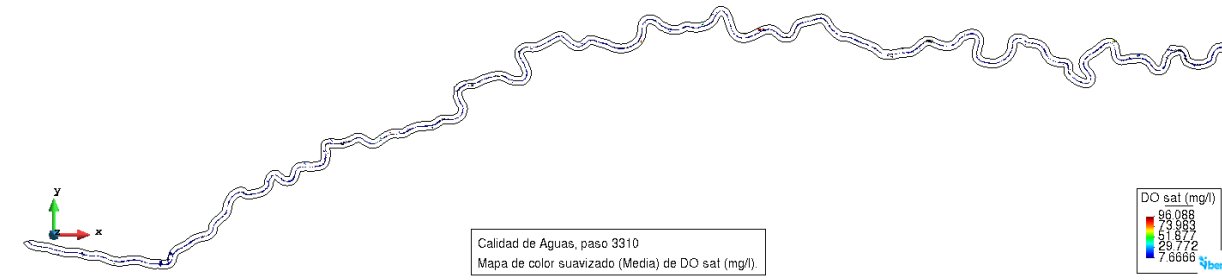
- Simulación temperatura modelo Iber



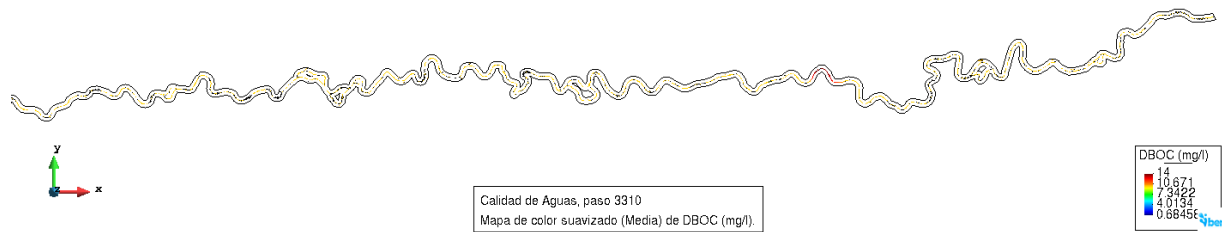
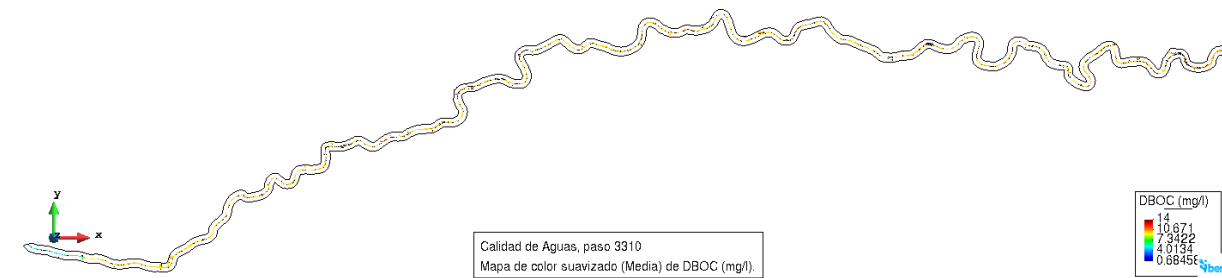
- Simulación Oxígeno disuelto en modelo Iber.



- Simulación Oxígeno disuelto saturado modelo Iber.



- Simulación DBO modelo Iber



- Simulación Coliformes totales en modelo Iber

