



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA “CALIDAD CAR” PARA MODELACIÓN
DE LA CALIDAD AGUA. CASO DE ESTUDIO: RÍO MAGDALENA**

**PRESENTADO POR:
JENNIFER GUZMÁN LOPÉZ
CODIGÒ: 505766
JUAN PABLO ORDOÑEZ MARTINEZ
CÓDIGO: 505242**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D. C.,
2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA “CALIDAD CAR” PARA MODELACIÓN
DE LA CALIDAD AGUA. CASO DE ESTUDIO: RÍO MAGDALENA**

**PRESENTADO POR:
JENNIFER GUZMÁN LOPÉZ
CODIGO: 505766
JUAN PABLO ORDOÑEZ MARTINEZ
CÓDIGO: 505242**

PROYECTO TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR DE TESIS:
PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D. C.,
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
1. RESUMEN	4
2. ANTECEDENTES	6
2.1 Río Magdalena	6
2.2 Modelo de calidad del agua Río Magdalena	7
2.3 Modelo de calidad del Agua QUAL2KW	8
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	12
5. MARCO DE REFERENCIA	13
5.1 Modelos del comportamiento de la calidad del agua	13
5.1.1 QUASAR	13
5.1.2 MIKE 11	13
5.1.3 RÍOS	14
5.1.4 QUAL2KW	14
5.2 CALIDAD CAR	15
5.2.1 Descripción del modelo	15
5.2.2 Temperatura (K)	16
5.2.3 Oxígeno disuelto (mg/L)	17
5.2.4 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (mg/L)	18
5.2.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	19
5.2.6 Nitrógeno Total (mg/L)	19
5.2.7 Amonio (mg/L)	20
5.2.8 Nitritos (mg/L)	20
5.2.9 Nitratos (mg/L)	20
5.2.10 Fosforo disuelto (mg/L)	21
5.2.11 Alcalinidad y pH (mg CaCO ₃ /L y unidades de pH)	22
5.2.12 Coliformes fecales (E coli) (NMP/100 ml)	23
5.2.13 Coliformes totales (NMP/100 ml)	24
5.2.14 Solidos suspendidos totales (TSS) (mg/L)	24
5.2.15 Grasas y aceites (mg/L)	25

5.2.16	Solidos totales disueltos y conductividad (mg/L y μ S)	27
6.	MARCO CONCEPTUAL	28
6.1	Calidad del agua:	28
6.1.1	Río Magdalena	29
6.1.2	Problemática Río Magdalena	30
6.1.3	Afectación Municipio de Neiva al Río Magdalena	30
6.1.4	Planta de tratamiento para manejo de aguas residuales	31
6.2	Modelación de la calidad del agua:	31
6.2.1	Modelación en GOOGLE EARTH PRO	32
6.2.2	Herramientas de código libre "Open Source"	32
6.2.3	Modelo de calidad del agua QUAL2KW	32
6.2.4	Modelo de calidad del agua CALIDAD CAR	33
6.2.5	Parámetros de calidad del agua	33
6.2.6	Parámetros físicos	33
6.2.7	Parámetros químicos	34
6.2.8	Parámetros biológicos	34
7.	ESTADO DEL ARTE	35
7.1	Modelo Matemático Unidimensional QUAL2KW, Modelación De La Calidad Del Agua Río Azul, Municipio De Pijao Departamento Del Quindío	35
7.2	Aplicación Del QUAL2KW En La Modelación De La Calidad Del Agua Del Río Guacaica, Departamento De Caldas, Colombia	35
7.3	Estudio Del Modelamiento De La Calidad Del Agua Del Río Sinú, Colombia	36
7.4	Integración De Los Modelos Weap Y Qual2k Para La Simulación De La Calidad Agua De Fuentes Superficiales. Caso De Estudio: Cuenca Del Río La Vieja, Colombia	36
7.5	Modelación De La Calidad Del Agua Del Humedal Córdoba Mediante El Uso Del Software Qual2k Y Su Potencial Uso Respecto A La Mejora Del Ecosistema	37
7.6	Evaluación Del Software Qual2k En Fuentes Receptoras De Vertimientos De Residuos Líquidos En Algunos Puntos Del Río Cesar (Colombia) Impactados Por Actividad Minera	38
7.7	Informe del IDEAM calidad del agua río Magdalena	39

8. OBJETIVOS	40
8.1 General	40
8.2 Específicos	40
9. ALCANCES Y LIMITACIONES	41
9.1 Alcances	41
9.2 Limitaciones	41
10. METODOLOGÍA	42
10.1 Recolección De Información	43
10.2 Modelación En Google Earth Pro	45
10.3 Perfil Del Tramo	48
10.4 Modelación QUAL2KW	49
10.4.1 Variables del flujo principal	49
10.4.2 Flujo de cabecera	51
10.4.3 Datos de alcance zona estudio	51
10.4.4 Temperatura del aire y velocidad del viento	53
10.4.5 Fuentes puntuales	56
10.5 Modelación CALIDAD CAR	59
10.5.1 Descargar Qgis, un sistema geográfico libre y de código abierto	59
10.5.2 Instalamos el plugin CalidadCAR	60
10.5.3 Archivo de entrada	61
10.5.4 Información de parámetro de la fuente	61
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
11.1 Comparación De Graficas y valores De QUAL2KW Y CALIDAD CAR	71
11.1.1 Temperatura	71
11.1.2 Oxígeno Disuelto	72
11.1.3 Nitrógenos	73
11.1.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	77
11.1.5 Sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales	79
11.1.6 PH	80
11.1.7 Coliformes totales	81
11.1.8 Alcalinidad	83
11.1.9 Fosforo orgánico	84
11.2 Comparativos de los modelos	86
11.2.1 Ventajas	88

11.2.2 Desventajas	89
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 El ciclo de oxígeno en sistemas acuáticos	17
Ilustración 2 Transformaciones de las especies de nitrógeno en agua.....	19
Ilustración 3 Reacciones de las especies de fósforo en agua	21
Ilustración 4 Reacciones del sistema carbonato para disponibilidad de iones hidronios e hidroxilos	23
Ilustración 5 Destino y transporte de grasas y aceites en columna de agua y lecho de sedimentos.....	25
Ilustración 6 Marco Conceptual.....	28
Ilustración 7 Metodología	42
Ilustración 8: Puntos de vertimientos de tramo río Magdalena. Neiva, Huila.	46
Ilustración 9 Perfil de la sección de estudio del río.	46
Ilustración 10 Distribución de tramos	48
Ilustración 11 Datos iniciales QUAL2KW	50
Ilustración 12 Variables del flujo principal	51
Ilustración 13 Datos de los tributarios	52
Ilustración 14 parámetros climáticos.....	53
Ilustración 15 Datos climáticos diciembre 2017 Neiva-Huila.....	54
Ilustración 16 Temperatura media del aire.....	55
Ilustración 17 Velocidad del viento.....	56
Ilustración 18 Fuentes puntuales	57
Ilustración 19 Pagina web Qgis.....	59
Ilustración 20 plugin CALIDAD CAR	60
Ilustración 21 Controles CALIDAD CAR #1	60
Ilustración 22 Controles CALIDAD CAR #2	61
Ilustración 23 Crear archivo de entrada	61
Ilustración 24 Resultados QUAL2KW #1	68
Ilustración 25 Resultados QUAL2KW #2	69
Ilustración 26 Resultados CALIDAD CAR.....	70
Ilustración 27. Comparación temperatura QUAL2KW.....	71
Ilustración 28 Comparación temperatura CALIDAD CAR	71
Ilustración 30 Comparación Oxígeno Disuelto CALIDAD CAR	72
Ilustración 31 Comparación amonio.....	73
Ilustración 32 Comparación nitrógeno orgánico.....	74
Ilustración 33 Comparación Nitrito QUAL2KW	75
Ilustración 36 DBO CALIDAD CAR.....	75

Ilustración 34 comportamientos de los nitrógenos	76
Ilustración 35 Comparación DBO.....	77
Ilustración 37 comportamiento de parámetros en función del oxígeno disuelto....	78
Ilustración 38 Comparación TDS QUAL2KW.....	79
Ilustración 39 Comparación TDS CALIDAD CAR	79
Ilustración 40 Comparación PH QUAL2KW	80
Ilustración 41 Comparación PH CALIDAD CAR	80
Ilustración 42 Comparación Coliformes totales QUAL2KW	81
Ilustración 43 Comparación Coliformes totales CALIDAD CAR.....	81
Ilustración 44 Comparación Alcalinidad QUAL2KW.....	83
Ilustración 45 Comparación Alcalinidad CALIDAD CAR	83
Ilustración 46 Comparación Fosforo orgánico QUAL2KW	84
Ilustración 47 Comparación Fosforo orgánico CALIDAD CAR.....	84
Ilustración 48 Reacciones de las especies de fosforo en agua	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Longitud, nivel y coordenadas de los vertimientos.....	47
Tabla 2. Datos iniciales de sección del río.....	47
Tabla 3. Información de parámetro de la fuente	62
Tabla 4. Consolidadas aguas arriba y aguas abajo.	64
Tabla 5 Consolidados laboratorio aguas arriba y aguas abajo de la sección de estudio río Magdalena, Neiva- Huila	65
Tabla 6. Resultados de caracterización de cada vertimiento.....	66
Tabla 7 . Resultados de análisis por vertimiento.....	67
Tabla 8 Resumen de resultados comparativo QUAL2KW CALIDAD CAR	86

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Modelo de calidad del agua Río Magdalena.....	7
Anexo 2 Caracterización de vertimientos Neiva 2017 EPN	43
Anexo 3 HITModCal180725.....	43
Anexo 4 Estación meteorológica Neiva / Benito Salas - 803150 (SKNV) año 2017	54
Anexo 5 Resultados programa modelación QUAL2KW	68
Anexo 6 Resultados CALIDAD CAR.....	70

INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos para comprender y predecir la dinámica de la calidad del agua han aumentado con los años. Eventos como inundaciones y sequías, la contaminación del agua potable y las leyes más estrictas han intensificado la conciencia pública sobre el manejo adecuado de este recurso.

Los modelos de calidad del agua se han utilizado ampliamente en la gestión de los recursos hídricos para mejorar la comprensión del sistema y apoyar la toma de decisiones.

Por tal motivo, la búsqueda de herramientas que con lleven a una mejor gestión del recurso hídrico es una tarea constante en los entes dedicados a estas actividades. La Corporación Autónoma Regional CAR gestionó el desarrollo de una herramienta de modelación de calidad de agua pensado en las necesidades de los usuarios.

En el presente proyecto de grado se realizó una validación de esta herramienta a través de un ejercicio de modelación de calidad de agua comparando los resultados con una herramienta ampliamente utilizada en el país como lo es QUAL2KW utilizando como caso de estudio un tramo del río Magdalena circundante a la ciudad de Neiva.

Esta validación se llevó a cabo sobre el tramo comprendido entre las coordenadas aguas arriba N: 2°56'33" W75°18'33" Altitud 432 msnm y aguas abajo N: 2°59'33" W: 75°16'11" Altitud msnm. 420. Las características fisicoquímicas de la calidad del agua del río se evaluaron teniendo en cuenta 13 puntos de vertimiento de agua residual que caen sobre el río en este tramo mediante seguimientos compuestos por 48 horas y comparando el programa CALIDAD CAR con QUAL2KW para así mismo mostrar las ventajas y desventajas de la herramienta en desarrollada.

1. RESUMEN

En el presente proyecto de grado se realizó la validación de la herramienta CALIDAD CAR a través de un ejercicio de modelación de calidad de agua comparando los resultados con una herramienta ampliamente utilizada en el país como lo es QUAL2KW utilizando como caso de estudio un tramo del río Magdalena circundante a la ciudad de Neiva.

Modelando a partir de información recopilada de la campaña de monitoreo realizada en el año 2018 por Construcsuelos suministros LTDA y el estudio de modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores. Donde se tiene como propósito evaluar la calidad del agua del río Magdalena analizando su problemática que afecta directamente al municipio de Neiva en donde actualmente no cuenta con planta de tratamiento la cual busca acondicionar el agua del material residual, modelando así el comportamiento de (Temperatura, Conductividad, Sólidos inorgánicos, Oxígeno disuelto, CBOD lento, CBOD rápido, Nitrógeno orgánico, NH4-Nitrógeno, Nitrógeno NO3, Fósforo orgánico, Fósforo inorgánico, Patógeno, Alcalinidad, pH) , analizando los parámetros del agua y así plantear la pregunta *¿Qué ventajas y desventajas tiene el modelo de calidad del agua (CALIDAD CAR) respecto a modelos utilizados en Colombia como es QUAL2KW?*

Como resultado la herramienta CALIDAD CAR es muy intuitiva a comparación de QUAL2KW, la forma de descarga e ingresar facilita al usuario el proceso de modelación. Esto se puede evidenciar en la simplicidad de la interface y la descripción de los pasos para la correcta digitación de los datos tomados en campo ya que se percibe que el programa fue desarrollado pensando en el tipo de usuario que se tiene en Colombia. Por otro lado, la principal desventaja de la herramienta CALIDAD CAR es que no contempla dentro de su desarrollo la modelación hidrodinámica del río en cuestión. Es por esto que para poder realizar las tareas de modelación de calidad de agua es necesario tener los perfiles de velocidad para poder solucionar las ecuaciones de transporte de los parámetros fisicoquímicos.

Donde al final de la validación de la herramienta no presentó problemas de inestabilidad dado que internamente cuenta como un algoritmo para modificar el número de pasos necesarios para pasar de t a $t+i$ de tal forma que el modelo sea estable, lo cual difiere de la herramienta usada normalmente en Colombia para este tipo de tareas como lo es QUAL2KW.

ABSTRACT

In the present degree project, the CAR QUALITY tool was validated through a water quality modelling exercise comparing the results with a tool widely used in the country such as QUAL2KW, using as a case study a stretch of the Magdalena river surrounding the city of Neiva.

Modeling from information gathered from the monitoring campaign conducted in 2018 by Construcsuelos supplies LTDA and the study of water modeling code HITGInDiDe180502 of 2018 HIDROSAN consulting engineers. Where the purpose is to evaluate the quality of the Magdalena river water analyzing its problems that directly affect the municipality of Neiva where currently has no treatment plant which seeks to condition the water of the waste material, thus modeling the behavior of (Temperature, Conductivity, inorganic solids, dissolved Oxygen), Slow CBOD, Fast CBOD, Organic Nitrogen, NH4-Nitrogen, Nitrogen NO₃, Organic Phosphorus, Inorganic Phosphorus, Pathogen, Alkalinity, pH), analyzing the water parameters and thus asking the question What advantages and disadvantages does the water quality model (CAR QUALITY) have with respect to models used in Colombia such as QUAL2KW?

As a result, the CAR Quality tool is very intuitive compared to QUAL2KW, the way of downloading and entering facilitates the modeling process to the user. This can be seen in the simplicity of the interface and the description of the steps for the correct typing of the data taken in the field since it is perceived that the program was developed thinking about the type of user that you have in Colombia. On the other hand, the main disadvantage of the CAR QUALITY tool is that it does not include within its development the hydrodynamic modeling of the river in question.

Where at the end of the validation of the tool did not present problems of instability given that internally counts as an algorithm to modify the number of steps necessary to pass from t to $t+i$ in such a way that the model is stable, which differs from the tool normally used in Colombia for this type of tasks such as QUAL2KW.

2. ANTECEDENTES

2.1 Río Magdalena

La cuenca del alto Magdalena comprende un área de drenaje de aproximadamente 54.453 km² que corresponde a los departamentos del Huila, Tolima y parte de Cundinamarca y Cauca. Desde su nacimiento hasta Honda (arriba de la confluencia con el río Gualí) la longitud del cauce principal es de 567 km y la elevación media de 1.720 metros sobre el nivel del mar. Entre los centros urbanos ubicados en esta parte puede mencionarse San Agustín, Garzón, Neiva, Ibagué, Girardot, Espinal, Armero y Honda. Se distinguen nueve sectores diferentes, con características propias.¹

En un estudio adelantado por consorcio Neiva 2009 se enuncia que al menos el 92,5% de la ciudad tiene cobertura del servicio de alcantarillado, que en su mayoría es combinado (inicialmente proyectado como sanitario). De acuerdo con la topografía del terreno, topología de las redes y cobertura de la ciudad, inicialmente los diseños sanitarios planificaron que el agua residual de la ciudad se descarga al río Magdalena, ya sea directa o indirectamente (a través de sus afluentes).²

El crecimiento urbano y la violencia de los años 50, dio origen al fenómeno social del desplazamiento de población campesina hacia los centros urbanos del país. Tal fenómeno se vio acrecentado como consecuencia de la modernización de las ciudades que se volvieron atractivas para la gente del sector rural, que emigró hacia ellas en busca de mejores condiciones de vida. (4) Neiva, al igual que las demás ciudades de departamento, sintió el impacto del desplazamiento y la migración, con la consecuencia de un crecimiento poblacional vertiginoso que demandó la construcción de nuevos barrios y dio lugar al surgimiento de asentamientos subnormales de gran pobreza, con todo lo que ello implica para el manejo de la ciudad. Ahora la capital del Huila tiene una población cercana a los 350.000 habitantes, cantidad lejanamente superior a los 105.501 que residían en el perímetro urbano en 1973.³

¹ DUFFO, EUFRASIO BERNAL. El río Magdalena escenario primordial de la patria. 2013

² BORRERO, JOAQUIN GARCIA. El Huila y sus aspectos. 1935

³ SANCHEZ, LUCIA. IANACION. Tres meses Neiva tendrá diseño final pta 2018

2.2 Modelo de calidad del agua Río Magdalena

En el trabajo modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena por Jorge Luis Sánchez Lozano de la universidad Nacional de Colombia. Donde la modelación hidrológica e hidráulica de toda la cuenca media y baja del río Magdalena, en el que se aprendió del régimen de flujo del río Magdalena y sus principales tributarios. La innovación de este trabajo está en la aplicación de modelación hidrológica e hidráulica acoplada en conjunto con las metodologías de análisis de incertidumbre y sensibilidad en el sistema de los ríos Magdalena y Cauca, ayudando a entender los principales procesos hidrológicos en los tributarios y las mayores dificultades a considerar en la modelación hidráulica. Este acople desarrollado puede ser utilizado en diferentes escenarios de modelación en el río Magdalena y/o puede ser replicado en otros ríos y/o considerar en la inclusión de otros temas de interés, tales como calidad de agua, transporte de sedimentos, modelamiento de hábitat acuático, entre otros. A pesar de las deficiencias de la información en mapas meteorológicos, secciones transversales, modelo de elevación del terreno, elementos elevados lineales, curvas de calibración de caudales, cotas cero y la complejidad de la red de drenaje del río Magdalena, el cual presenta diferentes bifurcaciones; el modelamiento hidrológico e hidráulico acoplado, permitió reproducir el proceso lluvia-escorrentía y el tránsito hidráulico en la cuenca media y baja del río Magdalena.⁴

Para modelar la elevación del terreno, elementos elevados lineales y curvas de calibración de caudales en el informe modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena por Jorge Luis Sánchez Lozano de la universidad Nacional de Colombia. Según los resultados se utilizaron la información climatológica, mapas de uso y tipo de suelo, donde al no trabajar con informes de prácticas realizadas *in-situ*. Los mapas de tipo y uso de suelo no están actualizados, ni se presenta la misma escala, en un mismo sistema de coordenadas. Por lo cual se tienen errores asociados a las proyecciones y a la escala de los datos.

Anexo 1 Modelo de calidad del agua Río Magdalena

⁴ LOZANO, JORGE LUIS SÁNCHEZ. Modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena. bogota : s.n., 2017.

2.3 Modelo de calidad del Agua QUAL2KW

En Colombia varios estudios de modelación de la calidad del agua se han realizado utilizando el programa QUAL2KW por consultorías en ingeniería para la gestión del recurso hídrico. Sin embargo, varias consideraciones sobre su aplicación son reflejadas en estos estudios. Un ejemplo de esto es el estudio realizado para la modelación de la calidad del agua del Río Guacavía departamento Caldas Colombia realizada por la Universidad Nacional de Colombia se concluyó que el modelo de calidad del agua QUAL2KW implementado en el río Guacavía, puede ser ajustado posteriormente a partir de la realización de otras campañas de monitoreo para ser consolidado como una herramienta confiable y eficaz para la autoridad ambiental, que contribuya a la planificación del recurso hídrico, en el trabajo de Aplicación Del QUAL2KW En La Modelación De La Calidad Del Agua Del Río Guacavía, Departamento De Caldas, Colombia. Mayra Andrea Castro Huertas. Universidad Nacional De Colombia. Facultad De Ingeniería Y Arquitectura, Departamento De Química. Manizales, Colombia. 2015. Donde los resultados permitieron evidenciar un tramo crítico del río Guacavía sobre la corriente, el cual tiene problemas de contaminación desde su nacimiento debido a las actividades antrópicas que se realizan en la zona (cultivos de papa, ganadería y vertimientos de aguas residuales domésticas), sin embargo, el mayor impacto que se observa es en el punto en el cual el río recibe a la quebrada Olivares con una alta carga contaminante, lo cual ocasiona que los niveles de todos los contaminantes se incrementen considerablemente y deterioren la calidad del agua en ese tramo.⁵

Para la correcta implementación del modelo de calidad del agua QUAL2KW, se recomienda contar con la siguiente información que normalmente no es recopilada: características hidráulicas de la corriente por tramos (ancho, profundidad, velocidad, pendiente, etc.), parámetros y constantes cinéticas que permitan determinar la DBO lenta y DBO rápida (carbono orgánico disuelto, DBO filtrada, KDBO filtrada), constantes de re aireación por tramos, identificación y caracterización de fuentes puntuales y difusas, georreferenciación de los puntos de monitoreo, estudio de trazadores por tramos (tiempo de viaje) y las variables meteorológicas del día en el que se realizó el monitoreo.⁶

⁵ HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. La modelación de la calidad del agua del río Guacavía. Departamento De Caldas : s.n., 2015.

⁶ LADY MILENA SANCHEZ AMADO, SERGIO ANDRÉS LEAL NORIEGA. modelamiento del déficit de oxígeno disuelto y aplicación del ICA global para la estimación de la calidad del agua del segmento (parque industrial - puente Nariño) en el río de oro, departamento de Santander. Bucaramanga: s.n., 2016.

El análisis propuesto en el trabajo de aplicación del QUAL2KW en la modelación de la calidad del agua del Río Guacavia, donde se concluye según los resultados que para la correcta implementación del modelo de calidad del agua QUAL2KW, se recomienda recopilar características hidráulicas de la corriente por tramos (ancho, profundidad, velocidad y pendiente) la cual se logra en práctica in-situ y utilizando diferentes herramientas de medición.

3. JUSTIFICACIÓN

La sociedad de hoy cada vez es más consciente de la necesidad de preservar las fuentes hídricas a futuro lo cual ha motivado la realización de una serie de investigaciones sobre la contaminación en los diferentes ríos y cuencas hídricas, desafortunadamente dichas investigaciones no son susceptibles de implementarse efectivamente bien sea porque no son de fácil acceso para la comunidad o porque no proponen una solución viable que permita mejorar la calidad de agua.⁷

Es por esto que es necesario el desarrollo de herramientas que permitan la facilidad de implementación, así como el fácil manejo y entendimiento de sus resultados de tal manera que tanto las entidades ambientales como todas las personas involucradas en usos del agua puedan realizar ejercicios de modelación para la pertinente identificación de los posibles impactos que puedan generar sobre los cuerpos de agua.⁸

Por lo anterior es muy importante 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. Un cuerpo de agua de importancia para estudio en Colombia es el Río Magdalena donde la ciudad de Neiva realiza las descargas de vertimientos de las aguas residuales directamente al río por la falta de una planta de tratamiento. Debido a esto, es de gran valor realizar ejercicios de modelación de calidad de agua en esta zona para evidenciar, describir y comprender los diferentes procesos relacionados con la calidad del agua en esta zona y posibles afectaciones a las comunidades aguas abajo.

En ese orden de ideas, se validó el uso de las herramientas CALIDAD CAR y QUAL2KW, las cuales se utilizarán para modelar la calidad del agua a partir de información recopilada de la campaña de monitoreo realizada en el año 2018 por Construcsuelos suministros LTDA y el estudio de modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores. La implementación de estos modelos tiene como propósito evaluar el comportamiento de (Temperatura, Conductividad, Sólidos inorgánicos, Oxígeno disuelto, CBOD lento, CBOD rápido, Nitrógeno orgánico, NH₄-Nitrógeno, Nitrógeno NO₃, Fósforo orgánico, Fósforo inorgánico, Patógeno, Alcalinidad, pH) , donde al final de este ejercicio se validó la herramienta de modelación de calidad de agua “CALIDAD CAR” mediante el caso de estudio de parámetros contaminantes que afectan el Río Magdalena y su comunidad comprendido sobre el tramo entre las coordenadas aguas arriba N: 2°56'33" W75°18'33" Altitud 432 msnm y aguas abajo N: 2°59'33" W: 75°16'11" Altitud msnm. 420 de una longitud de 8.4 km.

⁷ Propio

⁸ JAVERIANA, UNIVERSIDAD. Article S0301479719303500 2016.

A la fecha no existen investigaciones de ningún tipo de la herramienta CALIDAD CAR , por esta razón se planteó la posibilidad de participar en este proyecto dentro de la línea de investigación de INGENIERÍA PARA LA SUSTENTABILIDAD, GRUPO GRIIS para otorgar el título de “Ingeniero Civil”, donde se puedan poner en práctica los conocimientos adquiridos y adicionalmente resaltar el compromiso que tiene la Universidad Católica de Colombia, con cada uno de los estudiantes en fomentar el bienestar , desarrollo social, cultural e intelectual.

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

Con la influencia de las actividades económicas humanas, la degradación ambiental y las zonas de actividad (por ejemplo, abastecimiento de agua, agricultura, energía hidroeléctrica y pesquerías), la calidad del agua se ve amenazada por la contaminación de fuentes puntuales y no puntuales. En Colombia muchos de los efluentes provenientes de actividades económicas industriales y domésticas se vierten de manera indiscriminadas a los cuerpos de aguas, especialmente a los ríos, este vertimiento produce una problemática ambiental en el sentido del adecuado funcionamiento de estos ecosistemas en temas de recreación y la preservación ecológica.⁹

Una de las herramientas que ha surgido para sobrellevar estas afectaciones es el desarrollo de modelos de calidad del agua, el cual consiste en diversos modelos complejos de calidad del agua (unidimensional, bidimensional o incluso tridimensional) que se han desarrollado y aplicado ampliamente para evaluar la respuesta de la calidad del agua del río a varios escenarios de gestión, sin embargo, cada uno posee sus ventajas y limitaciones que llevan a una buena o mala aplicación del poder de la modelación.¹⁰

Por lo tanto, el mayor desafío es encontrar un equilibrio entre la complejidad de los modelos y la confiabilidad de los resultados, por tal motivo, se hace necesario el desarrollo de herramientas confiables que incluyan los procesos biológicos y fisicoquímicos que sufren las especies en medio acuático, pero que sean flexibles y de código abierto que permitan la modelación adecuada de la calidad del agua. Una de las herramientas es “CALIDAD CAR” la cual ha sido desarrollada por investigadores colombianos (Universidad Javeriana y la CAR), y que pretende sobrellevar las mencionadas dificultades, pero que en la actualidad no se han realizado validaciones de esta, por tal motivo se plantea la pregunta *¿Qué ventajas y desventajas tiene el modelo de calidad del agua (CALIDAD CAR) respecto a modelos utilizados en Colombia como es QUAL2KW?*

⁹ JAVERIANA, UNIVERSIDAD. Article S1877343518300319 2016.

¹⁰ JAVERIANA, UNIVERSIDAD. Article S1364815216308830 2016.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Modelos del comportamiento de la calidad del agua

Entidades como la Agencia de Protección Ambiental (EPA), perteneciente al gobierno de los Estados Unidos, han desarrollado una serie de modelos matemáticos mediante los cuales se puede estudiar el comportamiento de la calidad del agua en una fuente natural. Entre los modelos desarrollados por esta entidad se pueden mencionar: WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), QUAL2K y QUAL2KW (Water Quality Model), entre otros. Otras instituciones de reconocimiento internacional también se han preocupado por el estudio y desarrollo de este tipo de herramientas, tal es el caso del Instituto de Hidráulica Danés, (DHI por sus siglas en inglés: Danish Hydraulic Institute), quien en 1999 desarrolló el modelo MIKE11; el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), a través de su División de Salud y Ambiente (HEP), desarrolló el modelo de calidad del agua RÍOS en 1995 (García Q., 2008). Finalmente, otro software muy utilizado para modelar la calidad del agua en corrientes superficiales es el modelo Quality Simulation Along River Systems.¹¹

Descripción modelos comerciales de simulación de la calidad del agua Modelo Características:

5.1.1 QUASAR

Descripción: Este software modela un río como una serie de tramos definidos por confluencias de tributarios, vertederos, tomas públicas de abastecimiento de agua o descargas de efluentes, y puede ser corrido en dos modos diferentes: modo planificación y modo dinámico.

Parámetros modelados: Caudal, amoníaco, pH, nitratos, temperatura, E. Coli, demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, contaminante conservativo o trazador.

Implementado en: Cuenca el Virrey (Colombia).

Desarrollado por: Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R., 1997.

5.1.2 MIKE 11

Descripción: Este modelo simula los procesos de reacción de sistemas multicompuestos incluyendo la degradación de la materia orgánica, la fotosíntesis y

¹¹ HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de caldas, Colombia. Manizales : s.n., 2015

respiración de las plantas, la nitrificación y el intercambio de oxígeno con la atmósfera. El modelo se acopla al modelo básico de dispersión, lo cual significa que el modelo simula los procesos de transformación de diferentes compuestos y el modelo AD es utilizado para simular los procesos de transporte simultáneamente

Parámetros modelados: Temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica (DBO), amoníaco/amonio, fósforo, nitratos, coliformes totales y fecales.

Implementado en: Río Cauca (Colombia), río Magdalena (Colombia).

Desarrollado por: Instituto de Calidad del Agua de Dinamarca (DHI), 1999.

5.1.3 RÍOS

Descripción: Este modelo proporciona un método estándar, basado en la ciencia para el manejo de cuencas en contextos en todo el mundo; combina datos biofísicos, sociales y económicos para ayudar a los usuarios a identificar las mejores ubicaciones para la protección y las actividades de restauración con el fin de maximizar el retorno de la inversión ecológica, dentro de los límites de lo que es socialmente y políticamente factible.

Parámetros modelados: Oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada, coliformes y análisis simplificados de sustancias tóxicas conservativas y no conservativas

Implementado en: Río Acelhuate, Sucio, y Suquiapa (El Salvador).

Desarrollado por: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1995.

5.1.4 QUAL2KW

Descripción: El QUAL2KW es un modelo gratuito de calidad del agua que tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario.

Parámetros modelados: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.

Implementado en: Río Cauca, río Bogotá, río Chinchiná, quebrada Manizales, río Palo, río Sinú, río Aburra (Colombia).

Desarrollado por: Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008.¹²

5.2 CALIDAD CAR

Calidad-CAR es una herramienta para la modelización matemática de la calidad del agua en los ríos. Esta herramienta supone que el usuario ya tiene los resultados del modelado del movimiento del agua con el sistema de modelado Hec-Ras. Calidad-CAR donde no requiere módulos adicionales aparte de los módulos de Python ya instalados dentro de QGIS.

5.2.1 Descripción del modelo

Primeramente, se debe establecer matemáticamente como la masa de un contaminante varía en un determinado punto del volumen de agua, debido a los diferentes procesos que tienen lugar en el sistema.

Para este propósito, se plantea la ecuación de transporte compuestos no conservativos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S - r$$

Donde C es concentración de la especie de interés, u es el perfil de velocidad expresado en **(m/s)**, D es el coeficiente de difusión, S son fuentes y sumideros, r velocidad de reacción de la especie.

Esta ecuación tiene en cuenta los diferentes fenómenos que pueden ocurrir en los Hidrosistemas donde:

$\frac{\partial C}{\partial t}$: representa la evolución en el tiempo

$\frac{\partial(uC)}{\partial x}$: representa el transporte de advección

$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)$: es el transporte difusivo o de dispersión

r: Las reacciones de producción o consumo que pueda sufrir el componente de interés.¹³

a) Modelo Advección

¹² WHITEHEAD, P.E., WILLIAM, R.J. AND LEWIS, D.R. Quality simulation along rivers (QUASAR). 1997.

¹³ DEEN, W. M. Analysis of Transport Phenomena. 1998.

Para compuestos y/o situaciones donde el perfil de velocidad es muy elevado de tal forma que sea el factor dominante en el proceso, se describe un modelo simplificado de advección descrito por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x}$$

b) Modelo Difusión

Para escenarios donde el perfil de la velocidad no es el factor dominante, tanto que puede ser despreciado, no existen reacciones compuestas y el fenómeno difusivo predomina, se describe un modelo simplificado de difusión descrito por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

c) Modelo Difusión predominante

Para casos donde el perfil de la velocidad tiene lugar el fenómeno difusivo predomina, pero no existen reacciones compuestas, se describe un modelo simplificado de difusión descrito por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

5.2.2 Temperatura (K)

La temperatura del sistema influye enormemente en las propiedades fisicoquímicas del agua, así como en el valor de las constantes cinéticas que lleva a influir en las velocidades de las reacciones que ocurren en el Hidrosistemas.

Para el modelamiento del perfil de temperatura se utiliza la ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{H_v}{\rho C_p}$$

Donde k es la conductividad térmica del agua, C_p es la capacidad calorífica del agua y HIV representa una entrada de energía de fuentes externas por unidad de volumen.¹⁴

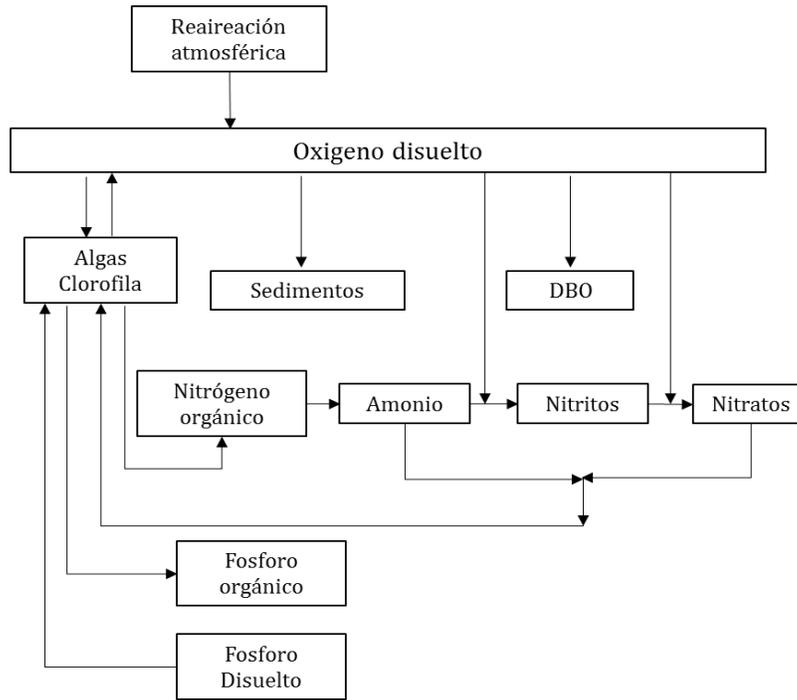
¹⁴ TECH, TETRA. WATER QUALITY MODULE. S.L. : The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 3, 2007.

5.2.3 Oxígeno disuelto (mg/L)

Se requiere oxígeno disuelto para la existencia de formas de vida superiores. La disponibilidad de oxígeno determina la distribución de organismos y los flujos de energía y nutrientes en un ecosistema. El oxígeno disuelto es un componente central del modelo de calidad del agua.

En los sistemas acuáticos, los procesos de producción y consumo de oxígeno ocurren simultáneamente. El proceso de producción de oxígeno proviene principalmente de la reacción atmosférica y la fotosíntesis de algas y plantas acuáticas. La figura a continuación muestra el ciclo del oxígeno en sistemas naturales acuáticos, de los cuales se desprenderán las reacciones que sufre el oxígeno disuelto en estos ambientes.¹⁵

Ilustración 1 El ciclo de oxígeno en sistemas acuáticos



Fuente: P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. 2011.

Combinando estos factores, la ecuación equilibrada de oxígeno en agua puede escribirse como:

¹⁵ P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. 2011.

$$r_{OD} = D_A + k_a(C_s - OD) - k_{DBO}DBO\theta_{DBO}^{(T-20)}\varphi - \alpha_{NH_3}k_{NH_3}NH_3\theta_{NH_3}^{(T-20)}\varphi - \alpha_{NO_2}k_{NO_2}NO_2\theta_{NO_2}^{(T-20)}\varphi - k_{SOD}/h_1$$

$$\varphi = \frac{OD}{k_s + OD} \quad D_A = \varepsilon_p A \mu - \varepsilon_T A \pi$$

$$C_s = \exp\left[c_0 + \frac{c_1}{T} + \frac{c_2}{T^2} + \frac{c_3}{T^3} + \frac{c_4}{T^4}\right] \quad k_a = 5.32 \frac{U^{0.67}}{h_1^{1.85}}$$

Donde k_a es el coeficiente de re-aireación, k_{DBO} degradación de DBO, k_{NH_3} y k_{NO_2} constantes de reacción de transformación de amonio a nitrito y nitrito a nitrato respectivamente; OD, NH_3 y BDO son las concentraciones de oxígeno disuelto, amonio y demanda biogeoquímica de oxígeno en mg/L respectivamente; C_s es la concentración de saturación de oxígeno a la temperatura del sistema, k_s es la constante de media saturación de oxígeno disuelto requerida para la oxidación de la demanda química de oxígeno, α_{NO_2} y α_{NH_3} son los consumos de oxígeno para la transformación de nitrito a nitrato y amonio a nitrito respectivamente, θ_i son los coeficientes de Arrhenius para el ajuste de temperatura, D_A variación neta de oxígeno disuelto debido a la actividad de las algas, ε_p es la cantidad de oxígeno liberado por la concentración unitaria de algas, μ aumento de la concentración de algas, ε_T es cantidad de oxígeno restada por la unidad de concentración de algas, π es la tasa de respiración, A es concentración de algas y h_1 es la profundidad.

La concentración de algas puede ser modelada por:

$$\frac{dA}{dt} = \mu A - \rho A - \frac{\sigma_1}{h_1} A$$

5.2.4 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (mg/L)

La demanda biológica del Oxígeno (mg O₂/L) puede ser definida como como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por vía biológica. Esta puede expresarse como:¹⁶

$$r_{DBO} = -k_{DBO}DBO\theta_{DBO}^{(T-20)}\varphi - k_{sed-DBO}DBO\theta_{DBO}^{(T-20)}$$

Donde se tiene en cuenta la velocidad de oxidación y la pérdida por sedimentación de la DBO. $k_{sed-DBO}$ Es la constante de sedimentación de DBO.

Dado que las mediciones en campo de DBO son normalmente realizadas por el método de DBO₅, es necesario establecer la relación de conversión para la DBO última:

¹⁶ MODELING, E. Environmental modeling. New York : s.n., 2000.

$$DBO = \frac{DBO_5}{1 - e^{-5 \cdot k_{DBO}}}$$

5.2.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)

La demanda química de oxígeno es la concentración de sustancias reducidas que son oxidables por medios inorgánicos. Cabe tener en cuenta que la DQO debe ser mayor a la DBO.

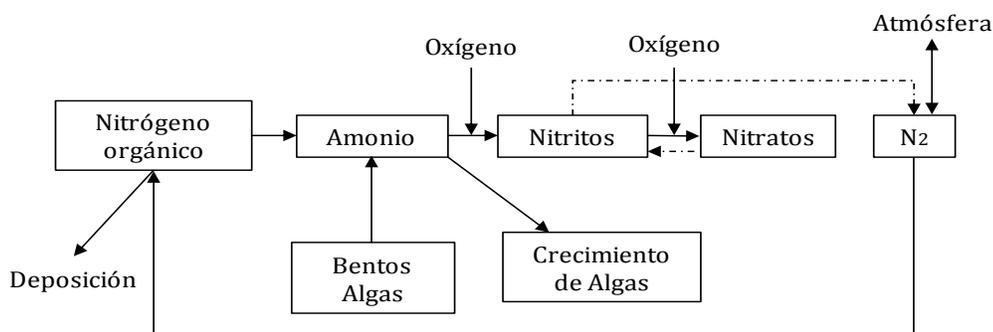
$$r_{DQO} = -k_{DQO} DQO \theta_{DQO}^{(T-20)} \varphi$$

5.2.6 Nitrógeno Total (mg/L)

El nitrógeno primero se divide en fracciones orgánicas y minerales. Las variables de estado de nitrógeno orgánico son nitrógeno orgánico disuelto y nitrógeno orgánico particulado. Se consideran dos formas de nitrógeno mineral: amonio y nitrato. Ambos se utilizan para satisfacer los requerimientos de nutrientes de las algas, aunque se prefiere el amonio de las consideraciones termodinámicas. La razón principal para distinguir los dos es que el amonio es oxidado por las bacterias nitrificantes en nitrato. Esta oxidación puede ser un importante sumidero de oxígeno en la columna de agua y los sedimentos. También existe un intermedio en la oxidación completa de amonio, nitrito. Las concentraciones de nitrito son generalmente mucho menores que el nitrato, y para fines de modelado, el nitrito se combina con nitrato.¹⁷

Por lo tanto, la variable de estado de nitrato en realidad representa la suma de nitrato más nitrito. El esquema de las reacciones de nitrógeno es:

Ilustración 2 Transformaciones de las especies de nitrógeno en agua



Fuente: MODELING, E. Environmental modeling. New York : s.n., 2000.

Con base a esto la reacción general del nitrógeno total sería.

$$r_{NT} = \alpha_A \gamma A - k_{NT} NT - k_{SNT} NT$$

¹⁷ MODELING, E. Environmental modeling. New York : s.n., 2000.

Donde α_A es la fracción de biomasa de las algas expresada en forma de nitrógeno y cuantificada como nitrógeno por unidad de masa de algas, γ es tasa de respiración de las algas, A es concentración de algas, k_{NT} es la tasa de transformación de nitrógeno orgánico a amonio, k_{SNT} es la tasa de sedimentación de nitrógeno orgánico.¹⁸

5.2.7 Amonio (mg/L)

Las fuentes y sumideros de nitrógeno amoniacal incluidos en el modelo son:

- Metabolismo basal de las algas, depredación y captación
- Mineralización a partir de nitrógeno orgánico disuelto
- Nitrificación a nitrato

Por lo cual:

$$r_{NH_3} = k_{N-org}N_{org}\theta_{NT}^{(T-20)} - k_{NH_3}NH_3\theta_{NO_2}^{(T-20)}\varphi + \frac{k_{S-NH_3}}{h} - \alpha_A\gamma\mu A$$

Donde k_{NH_4-Sed} es la tasa de producción de amonio desde los sedimentos.^{19,20}

5.2.8 Nitritos (mg/L)

Aunque sean un intermediario entre las otras formas de nitrógenos, los nitritos también dan indicativo de la calidad del agua. La ecuación cinética para estos es:²¹

$$r_{NO_2} = k_{NH_3}NH_3\theta_{NO_2}^{(T-20)} - k_{NO_2}NO_2\theta_{nit}^{(T-20)}$$

5.2.9 Nitratos (mg/L)

Las fuentes y sumideros para nitrógeno de nitrato incluidos en el modelo son:

- Nitrificación de amonio
- Desnitrificación

La ecuación cinética que describe estos procesos es:

$$r_{NO_3} = k_{NO_2}NO_2\theta_{nit}^{(T-20)}\varphi - k_{NO_3}NO_3\theta_{NO_3}^{(T-20)} - (1 - F)\alpha_A\mu A$$

¹⁸ G. J. PELLETIER, S. C. CHAPRA, AND H. TAO. QUAL2KW – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. s.l. : Environ. Model. Softw, 2006.

¹⁹ P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams. 2011.

²⁰ M. R. L. OUBOTER, B. T. M. VAN ECK, J. A. G. VAN GILS, J. P. SWEERTS, AND M. T. Villars,. Water quality modelling of the western Scheldt estuary. 1998 : Hydrobiologia.

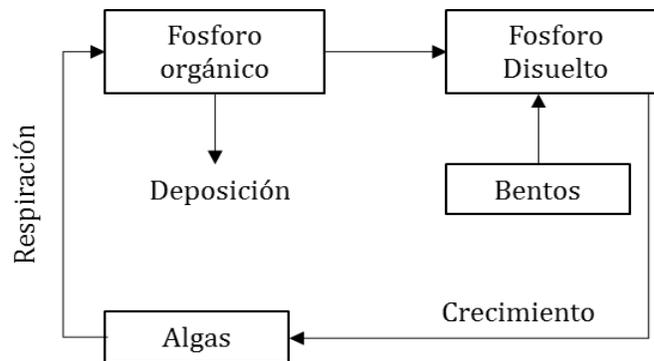
²¹G. J. PELLETIER, S. C. CHAPRA, AND H. TAO. QUAL2KW – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. 2006.

Donde k_{NO_3} es la constante de velocidad para la desnitrificación, θ_{NO_3} es la constante de Arrhenius para el efecto de la temperatura y F es la fracción de nitrógeno en las algas.²²

5.2.10 Fosforo disuelto (mg/L)

Al igual que con el carbono y el nitrógeno, el fósforo orgánico también da un indicativo del grado de contaminación que puede tener un Hidrosistemas. Normalmente, solo se considera una sola forma mineral, fosfato total. El fosfato total existe en varios estados dentro del ecosistema modelo: fosfato disuelto, fosfato absorbido a sólidos inorgánicos y fosfato incorporado en las células de algas.²³

Ilustración 3 Reacciones de las especies de fosforo en agua



Fuente: A. SHAKIBAEINIA, Y. B. DIBIKE, S. KASHYAP, T. D. PROWSE, AND I. G. DROPPPO. A numerical framework for modelling sediment and chemical constituents transport in the Lower Athabasca River. s.l. : J. Soils Sediments, 2017.

En este caso se tiene en cuenta el fosforo en forma de orgánico particulado y orgánico disuelto a través de:²⁴

$$r_{p-org} = \vartheta\gamma A - k_{p-org}P_{org} - k_{p-sed}P_{org}$$

$$r_{p-Dsto} = k_{p-org}P_{org} + \frac{k_{S-P_{Dsto}}}{h} - \vartheta\mu A$$

Donde ϑ es la fracción fosforo contenida en la biomasa de las algas expresada en forma de como masa de fosforo por unidad de masa de algas, k_{p-org} es la tasa de transformación de fosforo orgánico, k_{p-sed} es la tasa de sedimentación de fosforo orgánico.

²² J. LIANG, Q. YANG, T. SUN, J. D. MARTIN, H. SUN, AND L. LI. MIKE 11 model-based water quality model as a tool for the evaluation of water quality management plans. s.l. : J. Water Supply Res, 2015.

²³ TECH, TETRA. The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 3: water quality module. 2007.

²⁴ A. SHAKIBAEINIA, Y. B. DIBIKE, S. KASHYAP, T. D. PROWSE, AND I. G. DROPPPO. A numerical framework for modelling sediment and chemical constituents transport in the Lower Athabasca River. s.l. : J. Soils Sediments, 2017

5.2.11 Alcalinidad y pH (mg CaCO₃/L y unidades de pH)

Debido a varias de las reacciones anteriormente mencionadas y a las propiedades fisicoquímicas del agua, hay una liberación y/o transformación de especies químicas en el agua que generan un cambio en las condiciones de disponibilidad de iones hidroxilos. El pH y la alcalinidad son dos parámetros que miden esta disponibilidad de iones. El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, debido a que permite identificar las condiciones ácidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. En la figura 5 se puede ver las reacciones que predominan y definen mayoritariamente la disponibilidad de estos iones. El sistema de ecuaciones que definen este sistema y estos parámetros son:²⁵

$$\text{Alcalinidad} = [HCO_3^-] + [H_2CO_3^*] + [CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+]$$

$$r_{H_2CO_3^*} = W_{atm} + W_{r/p} + k_3[H_2CO_3^*] + k_4[H^+][HCO_3^-]$$

$$r_{HCO_3^-} = k_3[H_2CO_3^*] + k_4[H^+][HCO_3^-] - k_5[HCO_3^-] + k_6[H^+][CO_3^{2-}]$$

$$r_{CO_3^{2-}} = k_5[HCO_3^-] - k_6[H^+][CO_3^{2-}]$$

$$W_{atm} = v_v A_s ([H_2CO_3^*]_s - [H_2CO_3^*]) \quad W_{r/p} = 0.5 a_{co} A_s$$

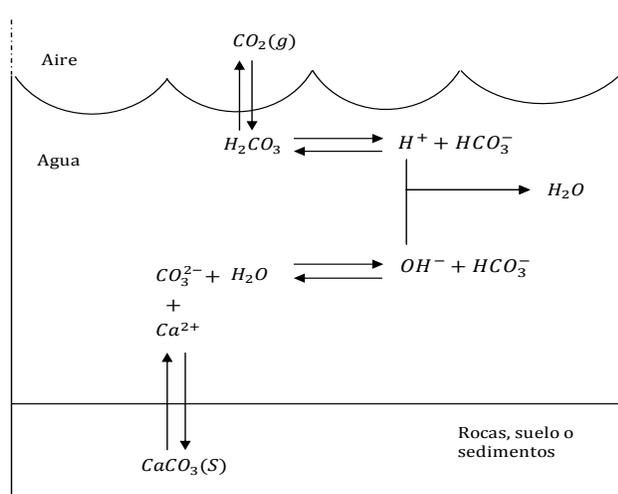
$$[H_2CO_3^*]_s = \exp \left[\left(\frac{2385.73}{T} + 0.0152642T - 14.0184 \right) \right] P_{CO_2}$$

$$[H^+] = K_w K_{bas} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad pH = -\log[H^+]$$

$$\frac{k_3}{k_4} = 4.5 \times 10^{-7} \quad \frac{k_5}{k_6} = 4.7 \times 10^{-11}$$

²⁵ BAIRD, C. Química ambiental. s.l. : Editorial Reverté, 2001.

Ilustración 4 Reacciones del sistema carbonato para disponibilidad de iones hidronios e hidroxilos



Fuente: BAIRD, C. Química ambiental. s.l. : Editorial Reverté, 2001.

Dónde:

K_{bas} : Constante de reacción ácido carbónico

K_w : Constante de equilibrio del agua

k_3, k_4, k_5 y k_6 son constante de reacción las especies de carbono.

P_{CO_2} : Presión parcial de saturación del dióxido en la atmosfera (atm)

a_{co} : Factor de conversión estequiométrico

A_s : Área superficial de la interface aire-agua

5.2.12 Coliformes fecales (E coli) (NMP/100 ml)

El parámetro de Coliformes fecales está completamente desacoplada del resto del modelo de calidad del agua y está incluida en el modelo por conveniencia en aplicaciones de TMDL que consideran las deficiencias de nutrientes y patógenos. Las bacterias coliformes fecales son indicativas de organismos del tracto intestinal de humanos y otros animales y pueden usarse como bacterias indicadoras como medida de salud pública. En el modelo actual, las bacterias coliformes fecales no tienen interacción con otras variables de estado, y tienen un solo término de sumidero, muerte. De igual forma se establecer que el principal aporte a este tipo

de patógeno está dominado por la *E coli*. La ecuación cinética, incluidas las cargas externas, se puede escribir como:²⁶

$$r_{E.coli} = -k_{E.coli} \cdot EC \cdot \theta_{E.coli}^{(T-20)}$$

La constante de reacción de coliformes es función de la salinidad, la intensidad lumínica, tasa de muerte natural y las pérdidas por sedimentación:

$$k_{E.coli} = (0.8 + 0.02 \cdot S)1.07^{T-20} + \frac{\alpha I_0}{k_e H} (1 - e^{-k_e H}) + F_p \frac{V_s}{H}$$

Donde S es la salinidad en ppt, α es una constante de proporcionalidad, I_0 es la energía solar en la superficie (lyh-1), K_e es un coeficiente de extinción (m^{-1}), H la profundidad del agua (m), F_p es la fracción de bacterias adheridas a los sólidos y V_s es la velocidad de sedimentación ($m.d^{-1}$).

5.2.13 Coliformes totales (NMP/100 ml)

Las bacterias Coliformes, frecuentemente utilizadas como indicadores de contaminación por patógenos, también tienen un ciclo vital de crecimiento y descomposición que puede ser interpretado por medio de expresión de primer orden, normalmente limitado a la fase de extinción:

$$r_{total-coliform} = -k_{TC} \cdot TC \cdot \theta_{TC}^{(T-20)}$$

5.2.14 Sólidos suspendidos totales (TSS) (mg/L)

La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática.

$$r_{TSS} = -\frac{W_s \cdot TSS}{h_1} + \frac{R_s}{h_1} + \frac{R_p}{h_1}$$

Donde W_s es la velocidad de sedimentación de los sólidos, R_s la tasa de suspensión, R_p es la tasa de producción.²⁷

Sólidos sedimentables (SS) (mg/L)

²⁶ KANSAL, D. SHARMA AND A. Assessment of river quality models: A review. s.l. : Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2013.

²⁷ J. VIEIRA, A. FONSECA, V. J. P. VILAR, R. A. R. BOAVENTURA, AND C. M. S. BOTELHO. Water quality modelling of Lis River, Portugal. s.l. : Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 20, 2013.

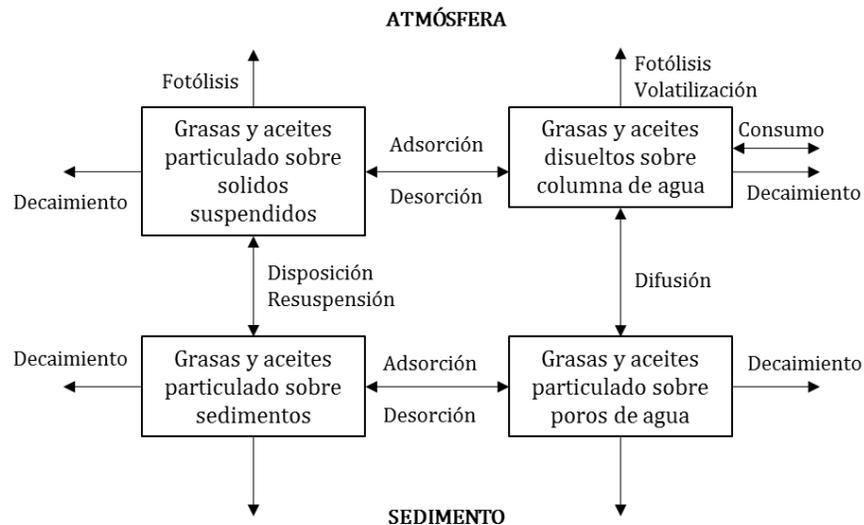
Esta fracción de sólidos es la asociada a la que formara parte del sedimento:

$$r_{TSS} = -\frac{W_s \cdot SS}{h_1} + \frac{R_s}{h_1} + \frac{R_p}{h_1}$$

5.2.15 Grasas y aceites (mg/L)

Los desechos orgánicos tóxicos (aceites y grasa) causan daños ecológicos a los organismos acuáticos, vegetales, animales e, igualmente, mutagénicos y cancerígenos para el ser humano. Se descargan de diferentes fuentes para formar una capa en la superficie del agua que disminuye el oxígeno disuelto. La capa de grasas y aceites reduce la actividad biológica del proceso de tratamiento donde se forma la película de aceite alrededor de los microbios en materia suspendida y agua. Esto lleva a disminuir los niveles de oxígeno disuelto en el agua. A continuación, las moléculas de oxígeno son difíciles de ser oxidativa microbiana en las moléculas de hidrocarburos y causar daños ecológicos a los cuerpos de agua.²⁸

Ilustración 5 Destino y transporte de grasas y aceites en columna de agua y lecho de sedimentos



Fuente: M. BENEDINI, G. Tsakiris, and Water. Water quality modelling for rivers and streams. s.l. : Springer, 2013.

Los cambios en la concentración del contaminante en la columna de agua son causados por advección, difusión (mezcla), carga externa, adsorción, desorción, volatilización, fotólisis, descomposición microbiana, sedimentación, intercambio con el lecho, captación y depuración por los organismos acuáticos, etc. (Figura 6). Se pueden determinar los contaminantes disueltos y absorbidos separadamente utilizando el modelo de partición no en equilibrio o la concentración total asumiendo las fases disueltas y absorbidas en el estado de equilibrio.

²⁸ M. BENEDINI, G. Tsakiris, and Water. Water quality modelling for rivers and streams. s.l. : Springer, 2013.

Con base en esto, la concentración de este tipo de contaminantes se puede describir a través de:²⁹

$$r_{GyA} = \frac{J_{abw}}{h_1} + \frac{q_{t,ex}}{h_1} - (K_N + K_H[H^+] + K_{OH}[OH^-])f_{dw}C_{GyA} - K_pC_{GyA} - K_bC_{GyA} - \frac{K_v}{h_1} \left(\frac{C_g}{H/RT} - f_{dw}C_{GyA} \right)$$

Donde.

C_{GyA} : Concentración total de grasas y aceites

f_{dw} : Fracción disuelta de grasas y aceites en la columna de agua

J_{abw} : Flujo de difusión vertical entre la columna de agua y la capa de sedimentos $\approx \frac{9.7632}{h_1} (T - 273.15)^{1.53}$

$q_{t,ex}$: Tasa de intercambio total del contaminante debido a la erosión de sedimentos y deposición.

K_N : Constante de reacción de hidrolisis neutra

K_H : Constante de reacción de hidrolisis catalizada por ácidos

K_{OH} : Constante de reacción de hidrolisis catalizada por bases

$[H^+]$: Concentración molar de iones hidronios

$[OH^-]$: Concentración molar de iones hidroxilos $\approx 10^{-(\text{Log}[H^+]+14)}$

K_p : Constante de fotolisis

K_b : Constante de biodegradación

K_v : Constante de volatilización

H : Constante de Henry para grasas y aceites

R : Constante de los gases (atm·m³/mol·K)

C_g : Concentración en la fase gaseosa de las grasas y aceite

²⁹ HAMAM, S. E. M. Diffusion of crude oil in water. s.l. : J. Environ. Sci. Heal. . Part A Environ. Sci. Eng., vol. 22, 1987.

5.2.16 Sólidos totales disueltos y conductividad (mg/L y µS)

Los TDS (Sólidos Totales Disueltos) son la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua. Esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea molécula de agua pura y sólidos en suspensión. La modelación de este parámetro es:³⁰

$$\frac{\partial TDS}{\partial t} + u \frac{\partial TDS}{\partial x} = D \left[\frac{\partial^2 TDS}{\partial x^2} \right] + W + P$$

Donde W son las cargas adicionales y P representa las fuentes y sumideros.

En cuanto a la conductividad se utiliza una relación directa desarrollada experimentalmente donde:

$$\text{Conductividad} = k_{cond} \cdot TDS$$

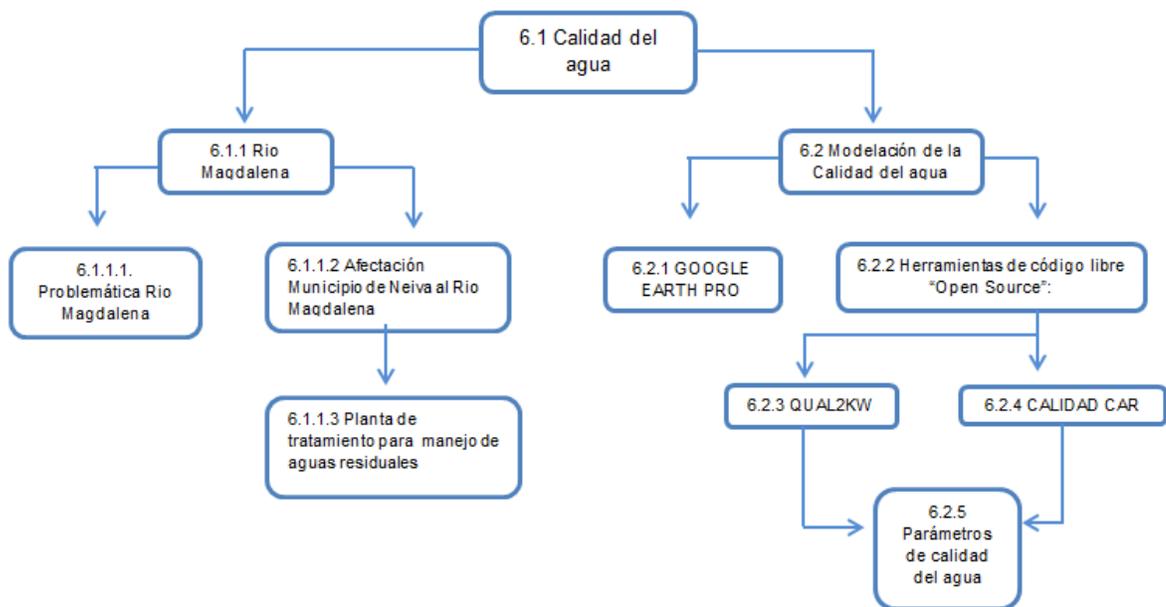
En la que k_{cond} es la constante de correlación con un valor aproximado de 1.92.

³⁰ M. R. L. OUBOTER, B. T. M. VAN ECK, J. A. G. VAN GILS, J. P. SWEERTS, AND M. T. VILLARS. Water quality modelling of the western Scheldt estuary. 1998.

6. MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual se enfoca principalmente en los estudios de la calidad del agua, ¿Cómo ha sido la problemática del el río de Magdalena?, su afectación en el municipio de Neiva, ¿Cómo funciona una planta de tratamiento para el manejo de aguas residuales?, ¿Cuál es el concepto de modelación de la calidad de agua?, ¿Qué es la herramienta google earth pro y la herramienta de código libre?, ¿Que función cumplen los modelos QUAL2KW y CALIDAD CAR? , ¿Y qué parámetros se analizan para la calidad del agua?.

Ilustración 6 Marco Conceptual



Fuente: Propio

6.1 Calidad del agua:

La calidad del agua no presenta una importancia en el planeta solo se toma como un recurso el cual cada vez se encuentra más escaso, la calidad del agua se define como una fuente de agua limpia que permita crear vida. Por lo cual es importante que la evaluación de la calidad del agua se realice usando técnicas analíticas. Para que los resultados de estas determinaciones sean representativos, es necesario dar

mucha importancia a los procesos de muestreo y a las unidades y terminología empleadas.³¹

Para una correcta interpretación de los datos obtenidos, los resultados de los análisis deben manejarse estadísticamente, teniendo en cuenta la correlación de iones, los factores que gobiernan el comportamiento de los componentes del agua, etcétera. El uso de gráficos ayuda a mostrar las relaciones físicas y químicas entre el agua, las fuentes probables de contaminación o polución y el régimen de calidad y, por tanto, a realizar adecuadamente la evaluación de los recursos hídricos.³²

6.1.1 Río Magdalena

El río Magdalena nace en el extremo suroccidental del país, a 3.685 metros de elevación, en la laguna de la Magdalena, localizada a los 01° 55' 40" de latitud norte y 76° 35' 08" de longitud oeste, ubicada en una pequeña planicie del Páramo de las Papas, correspondiente al Macizo colombiano, en el Departamento del Huila. Su longitud, según la fuente, varía de 1.528 a 1.600 km, de los cuales 886 son navegables. En el Estrecho, el lugar donde el río es más angosto, mide 2.20 metros de ancho y en el municipio de Plato, Magdalena, tiene una anchura de 1.073 metros. Vierte sus aguas en el mar Caribe, en el sitio conocido como Bocas de Ceniza, a los 11° 06' de latitud norte y 74° 51' de longitud oeste. El canal del Dique también le sirve como tributario de sus aguas, que llegan al mar en la bahía de Cartagena. En su trascurso recibe más de 500 ríos y numerosas quebradas. Su caudal promedio registra entre pocos metros cúbicos por segundo al comienzo, hasta 6.700 en su desembocadura.

Después de su nacimiento, el río Magdalena fluye de sur a norte por un valle interandino ubicado entre las cordilleras Central y Oriental de los Andes. El nivel de las aguas del Magdalena y del Cauca, su principal afluente –y en general de todos los ríos– presenta variaciones a causa de las fuertes precipitaciones locales y en áreas de sus afluentes, más evidentes en sus sectores alto y medio. En la parte baja se reduce el volumen de lluvia y, como corresponde a una zona cenagosa con poder de regulación y amortización, la variación de niveles y caudales es menor.

³¹ CASTRO DE ESPARZA, MARÍA LUISA. Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Lima, CEPIS. 1987.

³² CASTRO DE ESPARZA, MARÍA LUISA. Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Lima, CEPIS. 1987.

En datos del caudal medio en función del área de la cuenca, se aprecia el ascenso continuo desde pocos litros en su desembocadura hasta 7.100 m³/s a la altura de Calamar, en donde se desprende el canal del Dique y aún más en su desembocadura.³³

6.1.2 Problemática Río Magdalena

Existe un conflicto por los vertimientos de aguas residuales, que vienen de los municipios y de origen doméstico, que se realizan a las fuentes hídricas en diferentes municipios. Este conflicto se ve agudizado por la dificultad (económica y de procedimientos) de tramitar los permisos correspondientes. Este es un problema que afecta, a nivel macro y micro, el territorio. A nivel macro, existen varios municipios que no cuentan con una PTAR, por lo que las aguas residuales se están vertiendo de forma directa en las fuentes de agua. A nivel micro, a partir del cambio normativo dictaminado por el Artículo 41 del Decreto 3930 de 2010, se estableció que todos los predios que realicen vertimientos deben contar con el permiso de la autoridad ambiental correspondiente, en este caso la CAR. Esto ha implicado un conflicto, pues son muy pocos los predios que cuentan con los permisos, o con los recursos, y disponibilidad para realizar dicho trámite. Esta normatividad ha afectado a poblaciones de bajos recursos, para quienes resulta sumamente complicado costear los procesos para pedir dichos permisos (alrededor de los 4 millones de pesos, según los funcionarios del área técnica de la CAR). Esto lleva a un problema de ilegalidad, pues para las personas resulta tan engorroso y costoso cumplir la norma que las habitantes prefieren permanecer en la ilegalidad.³⁴

6.1.3 Afectación Municipio de Neiva al Río Magdalena

Los 20 municipios que ya tienen planta de tratamiento de aguas residuales solo vierten el 15 % aproximadamente de la carga contaminante sobre el río Magdalena en el departamento del Huila. Los 17 municipios restantes emiten el otro 85%, dentro de los cuales está Neiva con el 55.37%, Pitalito con 11%, Garzón con 4.73% y La Plata con 3.90%, que vierten alrededor del 75% de carga contaminante al afluente.³⁵

³³ DUFFO, EUFRASIO BERNAL. El río magdalena escenario primordial de la patria.2013

³⁴ CAR. Caso de interés OPAM Vertimientos a fuentes hídricas en alto magdalena

³⁵ MACHADO, AMAURY. Radiografía de las aguas negras en el Huila. 2018, La nación.

6.1.4 Planta de tratamiento para manejo de aguas residuales

Una planta o estación de tratamiento de agua potable (ETAP) es un conjunto de estructuras y sistemas de ingeniería en las que se trata el agua de manera que se vuelva apta para el consumo humano.

El tratamiento de aguas y las plantas de tratamiento de agua son un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es que a través de los equipamientos elimina o reduce la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales.

La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.

Debido a que las mayores exigencias en lo referente a la calidad del agua se centran en su aplicación para el consumo humano y animal estos se organizan con frecuencia en tratamientos de potabilización y tratamientos de depuración de aguas residuales, aunque ambos comparten muchas operaciones.³⁶

6.2 Modelación de la calidad del agua:

Los modelos de calidad del agua son representaciones matemáticas de los procesos que afectan a los constituyentes del agua. Los componentes pueden ser material sólido o disuelto (por ejemplo, los sedimentos en suspensión o el oxígeno disuelto). En un sistema de agua los componentes experimentan dos procesos diferentes: el transporte y la transformación. El transporte es principalmente determinado por la velocidad de la corriente y por lo tanto los modelos de calidad del agua frecuentemente dependen de modelos hidrodinámicos.

En el mundo hay necesidad de proteger los recursos hídricos de los posibles impactos que genera el desarrollo urbano, industrial y agrícola. Los modelos de calidad del agua son herramientas importantes para contribuir en el proceso de toma de decisiones y por lo tanto fortalecer el desarrollo sostenible. Estos modelos son útiles para entender las variaciones en la calidad del agua asociada por ejemplo a la descarga de un contaminante, a cambios en el uso de la tierra o a los efectos de cambios en el clima. Este tipo de herramientas juegan un rol importante en ayudar a las autoridades ambientales a entender relaciones causa - efecto asociadas a las descargas de contaminantes a las corrientes receptoras.

También pueden ser utilizados para evaluar beneficios de la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales, estudios de impacto ambiental y planes de saneamiento. Los modelos de calidad de agua son con frecuencia integrados con modelos de flora y fauna para estudiar impactos ecológicos. Por ejemplo, para

³⁶ AGUASISTEC. Planta de tratamiento de aguas residuales

estudiar los problemas de eutrofización un modelo que represente los componentes de los nutrientes normalmente se integra con un modelo que represente los procesos de crecimiento y mortalidad de algas y/o macrofitas.³⁷

6.2.1 Modelación en GOOGLE EARTH PRO

Google Earth es un programa informático que muestra un tipo de globo virtual que permite visualizar, por ejemplo, la múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital; Google Earth fue creado bajo el nombre de EarthViewer 3D por la compañía Keyhole Inc, y luego fue comprada por Google en 2004.³⁸

6.2.2 Herramientas de código libre “Open Source”

Es una expresión de la lengua inglesa que pertenece al ámbito de la informática. Aunque puede traducirse como “fuente abierta”, suele emplearse en nuestro idioma directamente en su versión original, sin su traducción correspondiente.

Open source Se califica como open source, por lo tanto, a los programas informáticos que permiten el acceso a su código de programación, lo que facilita modificaciones por parte de otros programadores ajenos a los creadores originales del software en cuestión.

Es importante distinguir entre el software open source, que dispone de la mencionada característica de presentar su código abierto, y el software libre (que puede descargarse y distribuirse de manera gratuita). Existe software libre que no brinda acceso al código (y que, por lo tanto, no puede considerarse como open source), y programas open source que se distribuyen de manera comercial o que requieren de una autorización para ser modificados.³⁹

6.2.3 Modelo de calidad del agua QUAL2KW

QUAL2KW funciona en visual Basic Microsoft Office Excel como un marco para la simulación de la calidad del agua en arroyos y ríos. El presupuesto dinámico de temperatura y la cinética de la calidad del agua se calculan para sistemas unidimensionales de flujo constante. La macro incluye un algoritmo genético para facilitar la calibración del modelo en aplicación a cuerpos de agua particulares. El algoritmo genético se utiliza para encontrar la combinación de parámetros y

³⁷ FLOWNET. Desarrollo de modelos matemáticos para la gestión del agua modelos de calidad del agua. 2018

³⁸ IIEMD. Que es concepto google earth pro 2017

³⁹ JULIÁN PÉREZ PORTO Definición open source .2014

constantes de velocidad cinética que resulta en una mejor opción para una aplicación modelo en comparación con los datos observados. El usuario tiene la flexibilidad de seleccionar cualquier combinación de parámetros para la optimización y especificar cualquier función apropiada para resultados óptimos.⁴⁰

6.2.4 Modelo de calidad del agua CALIDAD CAR

Calidad-CAR es una herramienta para la modelización matemática de la calidad del agua en los ríos. Esta herramienta supone que el usuario ya tiene los resultados del modelado del movimiento del agua con el sistema de modelado Hec-Ras. Calidad-CAR donde no requiere módulos adicionales aparte de los módulos de Python ya instalados dentro de QGIS.⁴¹

6.2.5 Parámetros de calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua son un conjunto de características físicas, químicas y biológicas propias del agua. Donde su comportamiento es subjetivo, con el objetivo de analizar los agentes dañinos y actuar frente a ellos.

6.2.6 Parámetros físicos

No son índices absolutos de contaminación, sino indicadores relativos, sus valores normales pueden variar considerablemente en cada caso hay que medir la desviación respecto al valor normal. Los cambios pueden ser tan apreciables que un sólo parámetro llegue a dar una idea del grado de contaminación y de la extensión de la zona afectada

Principales parámetros físicos:

- Turbidez
- Sólidos en suspensión (SS)
- Transparencia
- Propiedades organolépticas (color, olor, sabor)
- Temperatura
- Conductividad

⁴⁰ J.PELLETIER, GREGORY – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. QUAL2Kw. 2005.

⁴¹ JAVERIANA, UNIVERSIDAD. Calidad-CAR. 2018.

6.2.7 Parámetros químicos

Son muy importantes para definir la calidad del agua permiten identificar y cuantificar agentes causales de contaminación, si el agua no ha recibido vertidos urbanos o industriales, deben analizarse los siguientes parámetros:

- Iones más importantes (bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio y sodio) → Dureza, SS, Salinidad (→ Conductividad)
- Oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO)
- Carbono orgánico disuelto (COD) o total (COT)

Si es necesario realizar observaciones más detalladas (por la finalidad específica del estudio o por el grado de contaminación), pueden incluirse otros parámetros:

- Compuestos de nitrógeno, fosfatos, hierro, cloro, azufre; DBO5, pH
- Fenoles, derivados del petróleo, detergentes, pesticidas
- Fósforo orgánico e inorgánico, contaminantes traza (metales pesados, fluoruros, etc.)

6.2.8 Parámetros biológicos

- Indicadores biológicos como alternativa a las limitaciones de los parámetros físico-químicos (complementarios, no como alternativa a los parámetros en sí mismos)
- Se basan en la utilización de organismos vivos como indicadores de la calidad del agua, representan la actividad biológica en el agua mediante el control de la presencia, abundancia, estructura, etc., de organismos vivos
- Permiten estimar la calidad del agua al resultar indicadores de sus características físico-químicas, también pueden indicar la presencia de vertidos de aguas residuales (p.e: microorganismos entéricos).⁴²

⁴² RAMOS, DAVID SÁNCHEZ. ingeniería ambiental Calidad de las aguas, Tema 11 Calidad del agua y su control. 2015.

7. ESTADO DEL ARTE

7.1 MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2KW, MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RÍO AZUL, MUNICIPIO DE PIJAO DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO

El estudio considera el muestreo en dos puntos sobre el río Azul. En la vereda El Verdal del municipio de Pijao, inicia el tramo de estudio antes de la captación de agua para la empresa de truchas ACUAZUL LTDA y finaliza a 663.3 metros aguas abajo del punto anterior, en el puente localizado sobre el río Azul a 1.5 kilómetros antes de la confluencia con el río Lejos.

El tramo seleccionado de 663.3 metros sobre el río Azul, obedece a la inspección de campo realizada sobre esta fuente hídrica donde el mayor impacto que podría afectar la calidad de sus aguas, sería el asociado al vertimiento producido por la industria de truchas ACUAZUL LTDA.

El río Azul posee una oferta hídrica cercana a los 2.5 m³ /s, con un mínimo de 0.920 m³ /s y máximo de 4.33 m³ /s, para los meses de agosto y noviembre respectivamente.

La modelación se realizó mediante el modelo dinámico unidimensional Qual2k, simula la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, asume zonas anóxicas y tramos longitudinalmente heterogéneos, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas.⁴³

7.2 APLICACIÓN DEL QUAL2KW EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA

Uno de los modelos más ampliamente utilizados en el país es el QUAL2KW, el cual es un software gratuito desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y se constituye como un modelo unidimensional que simula

⁴³ CARREÑO, JOHANA PÉREZ. modelación de la calidad del agua rio azul, municipio de Pijao departamento del Quindio. Armenia: s.n., 2015.

el impacto de cargas contaminantes puntuales y distribuidas en un flujo permanente, no uniforme. Este trabajo presenta los resultados de la calibración y confirmación del modelo de calidad del agua QUAL2KW para el río Guacaica, en el tramo comprendido entre el nacimiento del río en la vereda San Pablo del municipio de Neira, y su desembocadura en el río Chinchiná en la vereda Colombia del municipio de Manizales.⁴⁴

7.3 ESTUDIO DEL MODELAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SINÚ, COLOMBIA

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 Urrá y la desembocadura al mar Caribe, usando el modelo QUAL2KW que incorpora el algoritmo genético PIKAIA, que permite la calibración de las constantes cinéticas. Específicamente, se presenta la metodología usada para la caracterización hidráulica, la segmentación de la corriente y el uso del método de muestreo Monte-Carlo para determinar los parámetros de calidad de agua de mayor sensibilidad, y demostrar que el modelo QUAL2KW no pudo ser calibrado para el río Sinú con la información de campo disponible, debido a que varias combinaciones de los parámetros producen soluciones igualmente óptimas⁴⁵ (45).

7.4 INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS WEAP Y QUAL2K PARA LA SIMULACIÓN DE LA CALIDAD AGUA DE FUENTES SUPERFICIALES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO LA VIEJA, COLOMBIA

En esta investigación se evaluó el impacto de las aguas residuales domésticas y agroindustriales en la cuenca del río La Vieja, Colombia, considerando como factores para la evaluación el crecimiento poblacional, el desarrollo agroindustrial y los efectos de la variabilidad y el cambio climático. La evaluación de la calidad del agua se logró mediante la integración de las herramientas de modelación WEAP (Water Evaluation And Planning System) y QUAL2K, que permitió realizar el análisis dendrítico (sistema ramificado de 11 fuentes hídricas que tributan al cauce principal) del comportamiento de la cantidad y la calidad del agua del río La Vieja. La cuenca del río La Vieja se localiza al centro sur de Colombia, con una extensión

⁴⁴ HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia. Manizales : s.n., 2015.

⁴⁵ ARROYAVE GOMEZ, DIANA MARCELA. estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia. 2013.

aproximadamente de 2.880 km². Las principales ventajas de la integración de los modelos corresponden a la posibilidad de modificar la cinética de degradación de los contaminantes por tramo de río en el modelo QUAL2K y la dinamización de los resultados de este modelo en pasos de tiempo mensual, beneficio que aporta el modelo de planificación WEAP. La integración de modelos tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio temporal de los parámetros de calidad del agua Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Temperatura (T) en una escala de agregación mensual en el año de línea base considerado como 2011 y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café. Los valores de concentración de DBO no superan los 5 mg/L en el escenario de línea base. La concentración de OD se encontró entre 4 y 9.5 mg/L. Los resultados obtenidos, representan el comportamiento del río La Vieja, que cumple con la normatividad local para los usos actuales del agua.⁴⁶

7.5 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL HUMEDAL CÓRDOBA MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE QUAL2K Y SU POTENCIAL USO RESPECTO A LA MEJORA DEL ECOSISTEMA

En el distrito capital, aunque se ha avanzado mucho en materia de la conservación de los Parques Ecológicos Distritales de Humedal PEDH, aún existen muchas tensiones presentes, que favorecen el detrimento de estos importantes ecosistemas y a los que es imperativo hacerles frente, en favor de la mejora de la calidad de vida tanto de la fauna y flora endémica del humedal como de los habitantes de la ciudad. El aumento de las conexiones independientes de alcantarillado (conexiones erradas) a los canales aferentes a los humedales, la disposición inadecuada de Residuos Sólidos Orgánicos RSO's y Residuos de Construcción y Demolición RCD's por parte de los habitantes que colindan con estos ecosistemas, la constante contaminación de los caudales ecológicos, ronda hídrica y zona de manejo y preservación ambiental ZMPA, son algunas de las causas del deterioro de la calidad del agua presente en los humedales. Este documento presenta los resultados obtenidos en la modalidad de trabajo de grado de pasantía que se desarrolló en la

⁴⁶ JARAMILLO, MARÍA FERNANDA. Integration of Weap and Qual2k models for the simulation of water quality surface sources. Case study: La Vieja river basin, Co. 2016.

Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y que consistió en la modelación de los parámetros físico químicos del PEDH Córdoba enfocado en sus canales aferentes por medio del software Qual2k con el fin de proponer algunas estrategias para la recuperación de la calidad de agua del humedal Córdoba, dentro del proceso de implementación del Plan de Intervención y Corrección de Conexiones Erradas PICCE adelantado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.⁴⁷

7.6 EVALUACIÓN DEL SOFTWARE QUAL2K EN FUENTES RECEPTORAS DE VERTIMIENTOS DE RESIDUOS LÍQUIDOS EN ALGUNOS PUNTOS DEL RÍO CESAR (COLOMBIA) IMPACTADOS POR ACTIVIDAD MINERA

En este estudio se aplicó el software qual2k , teniendo en cuenta la dinámica individual de ríos afluentes del río Cesar: río Tocuy (en la Jagua de Ibirico), río Maracas (en Becerril) y río Calenturitas (La Loma corregimiento del municipio de El paso Cesar); los aportes de carga contaminante y las diferentes características fisicoquímicas de cada uno de estos, reconociendo procesos de contaminación que surgen en cada subcuenca, los cuales inciden en la calidad del agua del cuerpo receptor y finalmente la calidad del agua del río Cesar; para ello fue necesario la realización de modelaciones de cada río de forma independiente. Una vez seleccionado el modelo se programaron campañas de muestreo para la calibración del mismo. En lo que se requiere al modelo de calidad del agua podemos decir que los resultados de la modelación son satisfactorios, ya que se aplicó correctamente la metodología requerida y se establecieron los análisis necesarios en cada zona de los ríos estudiados. El desempeño del modelo es aceptable puesto que la variación entre los parámetros medidos y los calculados se encuentran en un rango admisible, por lo que se puede decir que el modelo fue satisfactoriamente calibrado.⁴⁸

⁴⁷ FERNÁNDEZ, NICOLÁS BELTRAN. modelación de la calidad del agua del humedal córdoba mediante el uso del software qual2k y su potencial uso respecto a la mejora del ecosistema. 2019.

⁴⁸ LORENA BRACHO VARGAS, LUIS ANGULO ARGOTE Y LUIS DÍAZ MUEGUE. Evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar. 2015.

7.7 INFORME DEL IDEAM CALIDAD DEL AGUA RÍO MAGDALENA

De acuerdo con los resultados para el ICAg en las corrientes estudiadas, y con los valores para cada uno de los parámetros, se pueden calificar el recurso hídrico bajo monitoreo, entre buena y alta disponibilidad tanto por su cantidad como por la calidad.

Ya se tiene una parte importante en el proceso de la construcción de la línea base del recurso. Cumplidas ocho campañas de monitoreo se puede establecer una línea base para algunos parámetros como AMONIO, NITRITOS, SULFATOS, O.D. y DBO, aunque no para todas las estaciones por lo menos para algunas o la mayoría de ellas según cada variable lo permita. Sin embargo, para la mayoría de variables monitoreadas, este proceso debería continuarse para tener una línea confiable para cada una de las variables seleccionadas y que se están estudiando desde Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

De acuerdo con los resultados obtenidos hasta ahora, se tienen mejores criterios para tomar decisiones sobre las variables a considerar en los monitoreos futuros, es decir poder ajustar el proceso de acuerdo con las necesidades que impone el mismo comportamiento de cada variable y la información que cada una puede entregar.⁴⁹

⁴⁹ PICÓN, DOCTOR RICARDO JOSÉ LOZANO. instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial república de Colombia. 2016.

8. OBJETIVOS

8.1 GENERAL

Validar la herramienta de modelación de calidad de agua “CALIDAD CAR” mediante el caso de estudio de parámetros contaminantes que afectan el Río Magdalena y su comunidad comprendido sobre el tramo entre las coordenadas aguas arriba N: 2°56'33" W75°18'33" Altitud 432 msnm y aguas abajo N: 2°59'33" W: 75°16'11" Altitud msnm. 420 de una longitud de 8.4 km.

8.2 ESPECÍFICOS

- Calibrar el modelo desarrollado interpretando resultados a partir de la información de campaña de monitoreo realizada en el año 2017 por Construcsuelos suministros LTDA y el estudio de modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores, para los programas CALIDAD CAR y QUAL2KW.
- Modelar la calidad del agua del tramo del Río Magdalena proveniente de los trece (13) puntos de vertimiento en la ciudad de Neiva con la herramienta CALIDAD CAR, QUAL2KW y GOOGLE EARTH.
- Realizar la comparación y el análisis de información obtenida producto de la modelación del tramo indicado.
- Establecer las fortalezas y debilidades de la herramienta CALIDAD CAR para la modelación de la calidad de aguas en ríos teniendo en cuenta la gestión integral del recurso hídrico.

9. ALCANCES Y LIMITACIONES

9.1 ALCANCES

- Análisis del tramo del Río Magdalena que pasa por la ciudad de Neiva
- Modelar información en CALIDAD CAR y QUAL2KW
- Analizar los resultados y comparar la herramienta de CALIDAD CAR con QUAL2KW

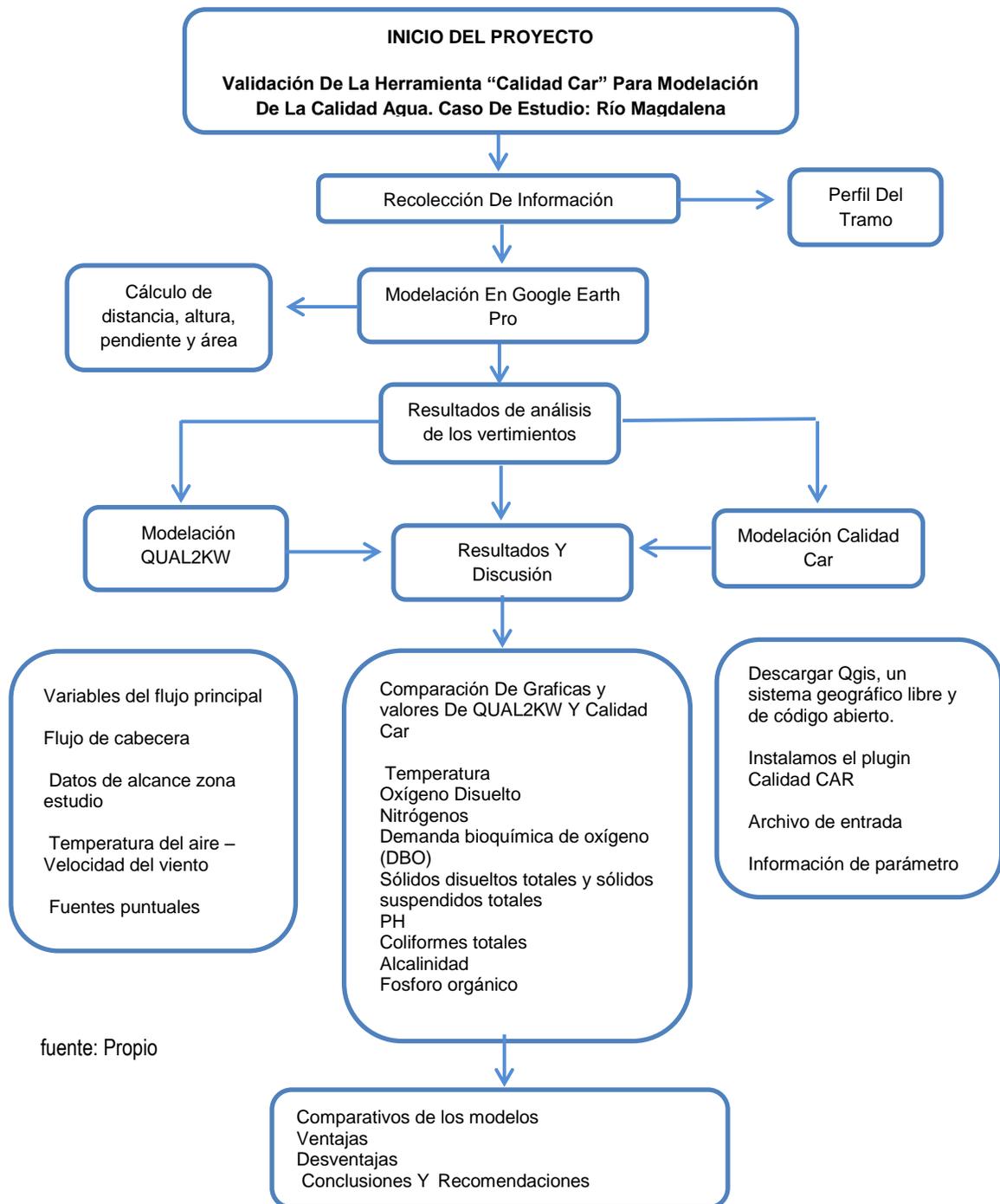
9.2 LIMITACIONES

- La herramienta CALIDAD CAR no contiene un módulo de optimización por lo que la calibración de los parámetros se debe realizar a través de un proceso de prueba y error.
- Capacidad computacional: El procesamiento de la información y la funcionalidad de las herramientas requieren de unos sistemas operativos de alta capacidad, de unas mínimas especificaciones como RAM de 4 gb, memoria interna 500gb y un procesador icore i5.
- Manejo e ingreso de información en herramientas: Un correcto ingreso de los parámetros e información obtenida en cada herramienta.
- Interpretación y validación de información suministrada: No realizar un acertado análisis de los resultados obtenidos de la modelación de cada herramienta.
- La herramienta CALIDAD CAR no contempla dentro de su desarrollo la modelación hidrodinámica del río en cuestión. La herramienta fue desarrollada bajo el marco que se tienen los datos hidrodinámicos para así realizar la modelación de la calidad del agua y ver las afectaciones de vertimientos sobre el cuerpo de agua receptor.

10. METODOLOGÍA

El desarrollo del proceso deberá seguir el siguiente proceso lógico para efectuar un trabajo óptimo.

Ilustración 7 Metodologia



10.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La modelación se realizó a partir de información secundaria que fue suministrada por el Centro de Investigación CENIGAA el cual tiene la información recolectada en campañas de monitoreo realizada en el año 2017 por ⁵⁰Construcselos suministros LTDA y el estudio de modelación del agua código ⁵¹HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores, para los programas CALIDAD CAR y QUAL2KW, de la siguiente manera:

Modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores:

- Profundidad media 1.140 m

Cuando se trata de aforos líquidos las profundidades de medición de velocidades se toman o hacen desde la superficie hacia el fondo; se puede realizar la medición de la profundidad directamente con una varilla graduada colocada en el lecho de la corriente, en caso de que la medición se realice mediante vadeo, según la modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores ; si se utiliza el sistema de malacate de tambor con cable coaxial, escandallo y molinete ya incorporado para la medición, el equipo se hacen descender hasta que el eje del molinete, centro de la hélice, quede arras con la superficie del agua, se coloca el contador de profundidad en ceros, seguidamente se sumergirá el escandallo hasta que toque el lecho del río y se anotará la profundidad registrada por el respectivo contador. Es necesario cuidar que el cable de suspensión del equipo no pierda tensión para asegurarse que el escandallo efectivamente estas arras del fondo.

- Velocidad media 4.936 m/s

Velocidad Media La velocidad media de un objeto se define como la distancia recorrida por un objeto dividido por el tiempo transcurrido. La velocidad es una cantidad vectorial y la velocidad media se puede definir como el desplazamiento dividido por el tiempo.⁵²

Anexo 2 Caracterización de vertimientos Neiva 2017 EPN

Anexo 3 HITModCal180725

⁵⁰ Los resultados se encontrarán anexos fuera del documento, como anexo 4. HITModCal180725

⁵¹ Los resultados se encontrarán anexos fuera del documento, como anexo 3. Caracterización de vertimientos Neiva 2017 EPN

⁵² UNZUETA, XOCHITL. Velocidad Media La velocidad media de un objeto se define como la distancia recorrida por un objeto dividido por el tiempo transcurrido. La velocidad es. 2017.

- Caudal del río tomado directamente de 770 m³/s,

El caudal del río se tomó con el método de caudal volumétrico promedio del líquido, porque es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia, determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día (Kg/d).

Donde se calculó con aforos de caudal, este procedimiento consistió en realizar una serie de mediciones en campo permite posterior e indirectamente calcular el caudal de un corriente, el cual está referenciado a un nivel de agua. Se define aforo líquido como el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de una corriente en una unidad de tiempo, generalmente se expresa en m³/s o lts/s. El caudal puede medirse en un tiempo dado por varios métodos diferentes como lo son:

Aforo volumétrico este método se aplica para tubería o canal abierto, cuando el vertimiento presenta una caída de agua en la cual se pueda interponer un recipiente.

Aforo con molinete este método, como el de flotadores, se fundamenta en la expresión $Q = S \times V$, pero en este caso la velocidad se puede determinar en distintos puntos trabajando sobre la misma sección transversal con un aparato que se denomina molinete hidrométrico. Este es un equipo que contabiliza las revoluciones que efectúa la hélice al ser sumergida en una corriente de agua. La velocidad se obtiene mediante una curva de calibración que relaciona las revoluciones por segundo con la velocidad. Esta curva de calibración es única para cada aparato y para cada hélice. Básicamente están compuestos por:

- Un sistema accionante, hélice o rotor.
- Un interruptor, mecánico o magnético.
- Un sistema de señal, acústico/sonoro o eléctrico digital.
- Un sistema de sujeción, barras o cable y contrapeso.

Aforo por suspensión este método se emplea mediante la precisión de las medidas del caudal depende del número de verticales en las que se hagan las mediciones de profundidad y velocidad. Deberán aumentarse el número de verticales cuando por primera vez se realicen mediciones en un nuevo emplazamiento, de modo que se pueda determinar con precisión la distribución de las velocidades en la sección.

El monitoreo de los puntos de los vertimientos los realizó de forma organizada para verificar el contenido de compuestos orgánicos, inorgánicos y de las características

bacteriológicas con respecto a la normativa dispuesta en la resolución 0631 de 2015(transitoriamente vigente).

La metodología de recolección de las muestras, tipo de muestra, análisis en situ, registros en campo, envío de muestras y procedimientos de garantía y calidad en el trabajo de campo por parte de CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS LTDA.

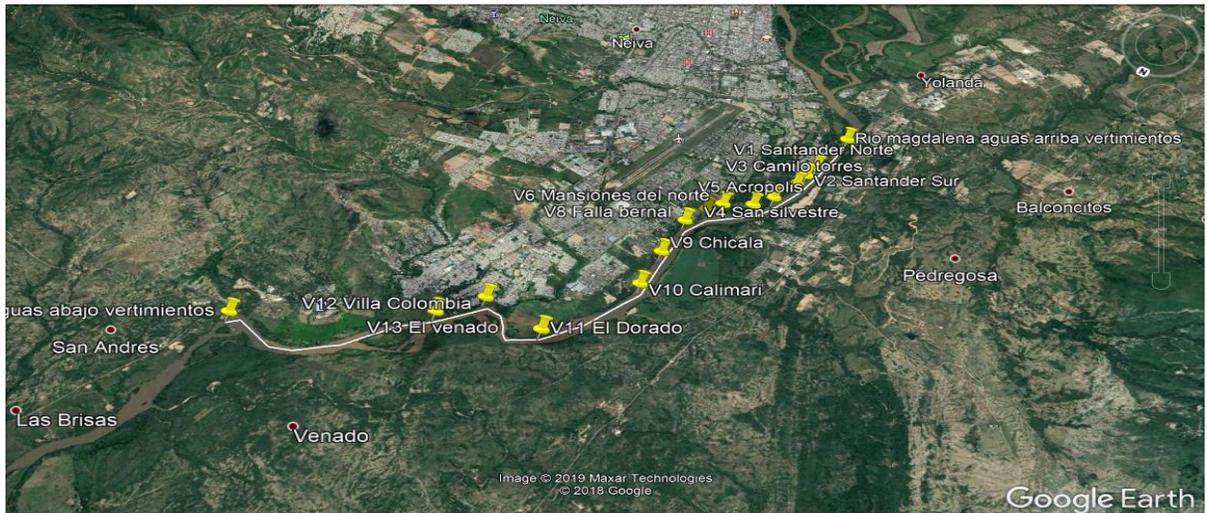
10.2 MODELACIÓN EN GOOGLE EARTH PRO

La toma de muestras en los vertimientos se realizó de forma compuesta cada hora durante 24 horas continuas, en el mes de diciembre de 2017 en los puntos denominados: puente Santander Norte, puente Santander Sur, Camilo Torres, Acrópolis, San Silvestre, Mansiones del Norte, Carlos Pizarro, Calamari, Falla Bernal, Villa Colombia, El Venado, El Dorado y Chicala, aguas arriba y abajo de los vertimientos sobre el río Magdalena. Se realizó el monitoreo en los puntos de vertimiento del casco urbano de la Ciudad de Neiva, departamento Huila, para verificar el contenido de compuestos orgánicos, inorgánicos y de las características bacteriológicas con respecto a la normativa dispuesta en la resolución 0631 de 2015 (transitoriamente vigente). La metodología de recolección de las muestras, tipo de muestra, registros de campo, cadenas de custodia, análisis in-situ, preservación, almacenamiento, envío de las muestras y demás procedimientos de garantía y control de calidad en el trabajo de campo, se realizó como está establecido en el procedimiento de calidad de CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS LTDA. Durante el monitoreo, donde se siguió las medidas de seguridad, higiene, ocupacionales y ambientales. Los residuos líquidos de las mediciones en campo, como pH se dispusieron dentro de un recipiente destinado con ese fin. Los residuos sólidos, como papel higiénico, pedazos de vidrio, cinta de enmascarar y otros, se almacenaron en bolsas plásticas para posterior disposición final.

El tramo comprendido entre las coordenadas aguas arriba N: 2°56'33" W75°18'33" Altitud 432 msnm y aguas abajo N: 2°59'33" W: 75°16'11" Altitud msnm. 420 de una longitud de 8.4 km, donde se evaluaron trece (13) puntos de vertimientos sobre el río Magdalena en la ciudad de Neiva, departamento del Huila.

La ubicación de puntos de los vertimientos se realizó a través de Google Earth con las coordenadas dadas para tomar la referencia de longitudes, entre vertimientos y ancho de río.

Ilustración 8: Puntos de vertimientos de tramo río Magdalena. Neiva, Huila.



Fuente: GOOGLE EARTH Puntos de vertimientos de tramo río Magdalena. Neiva, Huila. 2018

En la siguiente ilustración se muestra el perfil del río el cual no representa una pendiente pronunciada, la cual se calculó con la altura y distancia de cada punto ya que hay una diferencia de nivel de 10 msnm desde aguas arriba, respecto al punto final aguas abajo y el trayecto es de 8.4 kilómetros.

Ilustración 9 Perfil de la sección de estudio del río.



Fuente: GOOGLE EARTH Perfil de la sección de estudio del río 2018

En la posterior tabla se observan las coordenadas, alturas sobre el nivel del mar y longitud entre los tramos de cada uno de los vertimientos Río Magdalena, Neiva. Se evidencia que la pendiente del río en el tramo es alta y baja debido al relieve del Río Magdalena en el tramo.

Tabla 1. Longitud, nivel y coordenadas de los vertimientos

TRAMOS DE ESTUDIO	LONGITUD (Km)	NIVEL (msnm)	COORDENADAS					
			NORTE			OESTE		
			Grados	minutos	segundos	Grados	minutos	segundos
AGUAS ARRIBA	0	432.0	2	56	32.99	75	18	32.68
1	0.53	431.665	2	56	50	75	18	31
Y1 Santander Norte	0.66	431.33	2	56	53.31	75	18	28.89
Y2 Santander Sur	0.84	430.995	2	56	59.3	75	18	27.6
Y3 Camilo torres	1.04	430.66	2	57	5.22	75	18	26.42
2	1.06	430.325	2	57	7	75	18	26
Y4 San silvestre	1.38	429.99	2	57	15.89	75	18	22.37
3	1.59	429.655	2	57	22	75	18	20
Y5 Acropolis	1.67	429.32	2	57	23	75	18	17.6
Y6 Mansiones del norte	2.01	428.985	2	57	27.97	75	18	8.2
4	2.12	428.65	2	57	32	75	18	6
Y7 Carloz pizarro	2.16	428.315	2	57	33.74	75	18	4.44
Y8 Falla bernal	2.44	427.98	2	57	42.55	75	18	0.7
5	2.65	427.645	2	57	49	75	18	1
Y9 Chicala	2.99	427.31	2	58	0.29	75	18	0.66
6	3.18	426.975	2	58	5	75	18	42
Y10 Calimari	3.55	426.64	2	58	17.46	75	18	1.55
7	3.71	426.305	2	58	22	75	18	0
8	4.24	425.97	2	58	38	75	17	73
Y11 El Dorado	4.76	425.635	2	58	51.66	75	17	43.8
9	4.77	425.3	2	58	53	75	17	43
10	5.3	424.965	2	58	50	75	17	30
Y12 Villa Colombia	5.68	424.63	2	58	47.56	75	17	20.37
11	5.83	424.295	2	58	93	75	17	16
Y13 El venado	6.18	423.96	2	59	0.86	75	17	9.5
12	6.36	423.625	2	59	4	75	17	4
13	6.89	423.29	2	59	17	75	16	53
14	7.42	422.955	2	59	29	75	16	41
15	7.95	422.62	2	59	33	75	16	25
AGUAS ABAJO	8.48	422	2	59	33.1	75	16	10.91

Fuente: Propio

La validación de cada punto en el programa Google Earth pro permitió establecer el ancho, profundidad media y el área transversal de cada vertimiento depositada en la siguiente:

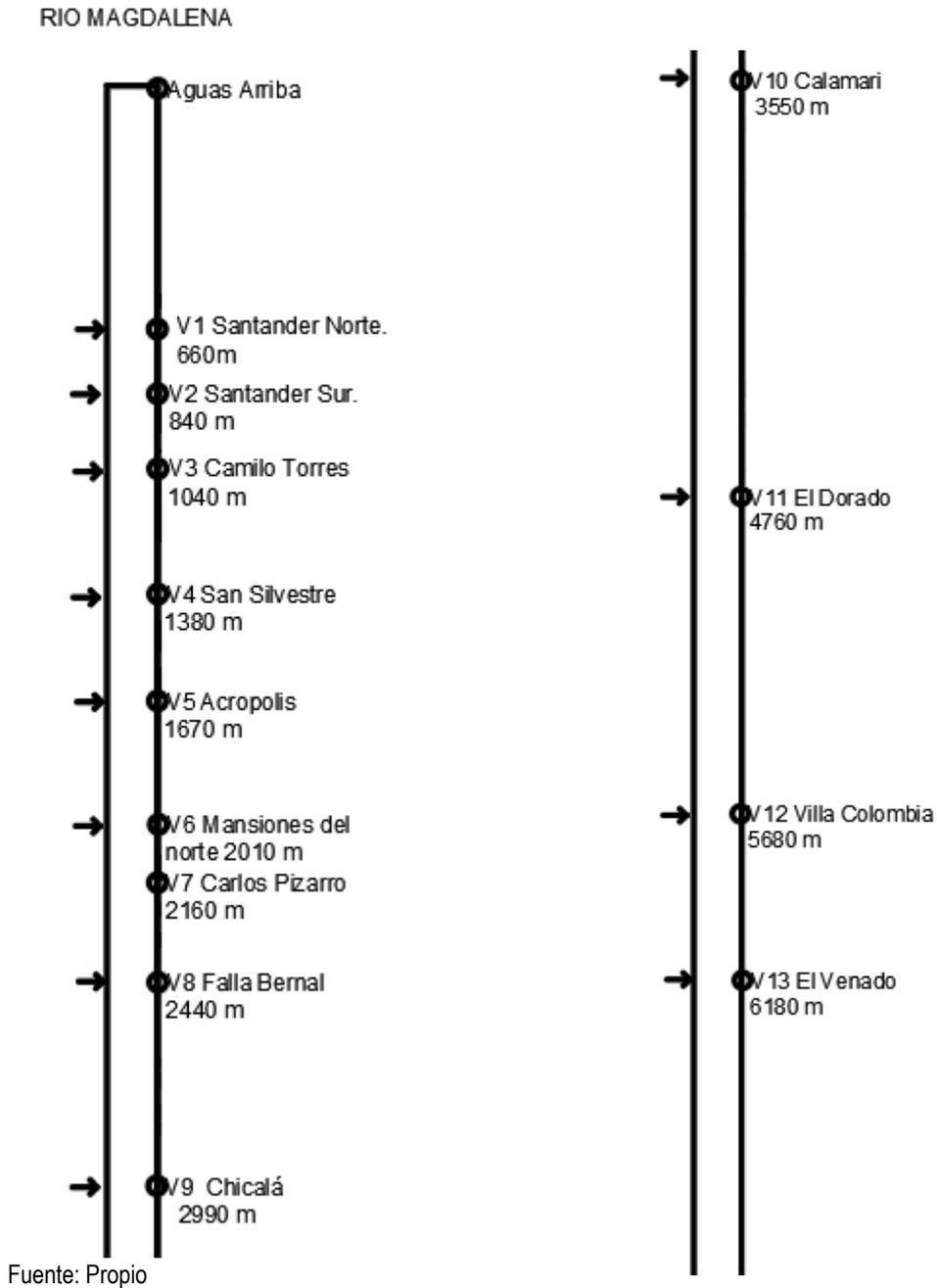
Tabla 2. Datos iniciales de sección del río

DATOS INICIALES	
CAUDAL(M3/S)	770
ANCHO 1 (m)	111
ANCHO 2 (m)	118
ANCHO 3 (m)	139
ANCHO 4 (m)	230
ANCHO 5 (m)	110
ANCHO 6 (m)	113
ANCHO PROMEDIO (m)	136.8
PROFUNDIDAD MEDIA m	1.14
AREA TRANSVERSAL (m2)	155.99
VELOCIDAD (m/s)	4.936
PENDIENTE MEDIA	0.14%

Fuente: Propio

10.3 PERFIL DEL TRAMO

Ilustración 10 Distribución de tramos



La anterior ilustración muestra las distancias entre vertimientos y distribución de las entradas del mismo al río.

10.4 MODELACIÓN QUAL2KW

La modelación de la calidad del agua a través del programa QUAL2KW nos permitió validar la variación del comportamiento del agua respecto al espacio de un tramo determinado del río.

Suministrando los datos reales aguas arriba y agregando especificaciones hidrodinámicas de la zona de estudio; se ingresaron los parámetros conocidos al programa y se procedió a ejecutarlo para validar que tanta igualdad tenía el resultado final aguas abajo respecto a los resultados reales tomados en campo.

Se aclara que los colores usados por el programa representan si la información debe ser ingresada por el usuario o son resultados generados por el programa, teniendo en cuenta el color.

- **Color azul:** designa los valores de las variables y parámetros que deben ser ingresados por el usuario.
- **Color verde:** Designa los valores generados por el programa.
- **Color amarillo:** designa datos de campo que son entrados por el usuario, esta información es opcional, el modelo es ejecutado sin la necesidad de estos datos, pero servirán como puntos de referencia para la calibración del modelo.

10.4.1 Variables del flujo principal

La ventana inicial programa QUAL2KW se basa principalmente en la información de identificación de la zona a modelar, en esta parte se ingresó el nombre de río, fecha de modelación, zona horaria etc.; con un tiempo de cálculo de 0.35 minutos.

Ilustración 11 Datos iniciales QUAL2KW

QUAL2Kw (version 5.1)		
Stream Water Quality Model		
Greg Pelletier, Steve Chapra, and Hua Tao		
Department of Ecology and Tufts University		
<input type="button" value="Open File"/> <input type="button" value="Run VBA"/> <input type="button" value="Run Fortran"/>		
System ID:		
River name	RIO MAGDALENA	
Saved file name	ZONA DE ESTUDIO RIO MAGDALENA	
Directory where the input/output files are saved	D:\QUAL2KW\QUAL2KW	
Month	9	
Day	10	
Year	2019	
Local standard time zone relative to UTC	-5 hours	
Daylight savings time	Yes	
Simulation and output options:		
Calculation step	0.3515625	minutes
Number of days	2	days
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Newton-Raphson	
Simulate hyporheic exchange and pore water quality	No	
Display dynamic diel output	No	
State variables for simulation	All	
Simulate sediment diagenesis	Option 1	
Simulate alkalinity change due to nutrient change	Yes	
Write dynamic output of water quality	Yes	
Program determined calc step	0.3515625	minutes
Time elapsed during last model run	0.55	minutes
Time of sunrise	6:53 AM	
Time of solar noon	12:58 PM	
Time of sunset	7:02 PM	
Photoperiod	12.14	hours

Fuente: Datos iniciales programa Qual2kw

10.4.2 Flujo de cabecera

En esta ventana se ingresan los valores de caudal y los parámetros orgánicos, inorgánicos y biológicos a distintas horas.

Ilustración 12 Variables del flujo principal

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
RIO MAGDALENA (9/10/2019)

Open File Run VBA Run Fortran

Headwater and Downstream Boundary Data:

Headwater Flow	770.000	m3/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.
Temperature	C	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30	27.30
Conductivity	umhos	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80	181.80
Inorganic Solids	mgD/L	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00	652.00
Dissolved Oxygen	mg/L	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
CBODslow	mgO2/L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
CBODfast	mgO2/L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Organic Nitrogen	ugN/L	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00	560.00
NH4-Nitrogen	ugN/L	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00	232.00
NO3-Nitrogen	ugN/L	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
Organic Phosphorus	ugP/L	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00	210.00
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phytoplankton	ugA/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Detritus (POM)	mgD/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pathogen	cfu/100 mL	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00
Generic constituent	user defined	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alkalinity	mgCaCO3/L	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00	42.00
pH	s.u.	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
Downstream Boundary Water Quality (optional)	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.
Temperature	C										
Conductivity	umhos										

QUAL2K Headwater Reach Reach Rates Initial Conditions Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover

Fuente: Propia.

10.4.3 Datos de alcance zona estudio

Se ingresaron los datos de los tributarios y estaciones tomadas en secciones cada 530 metros de acuerdo al orden que se encuentran los vertimientos a lo largo del río. Se ingresan parámetros geográficos del trayecto del río y de los vertimientos como su elevación, latitud, longitud, ancho, profundidad y pendiente del río.

Ilustración 13 Datos de los tributarios

Reach for diel plot: 29																							
← change diel plots to this reach																							
Reach		Downstream				Elevation		Downstream						Weir		Rating Curves				Manning			
Label	end of reach label	Number	length (km)	Latitude	Longitude	location (km)	Upstream (m)	Downstream (m)	Degree	Minute	Second	Degree	Minute	Seconds	Height (m)	Width (m)	Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slope	n	Bct Width m
	AGUAS ARRIBA	0	2.94	75.31	0.000		432.000	432.000	2.00	56	33	75.00	18	33	1.1400	136.80					0.00014		136.80
1	1	1	0.53	2.95	75.31	0.530	432.000	431.665	2.00	56	50	75.00	18	31	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y1	Y1 Santander Norte	2	0.13	2.95	75.31	0.660	431.665	431.330	2.00	56	53	75.00	18	29	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y2	Y2 Santander Sur	3	0.18	2.95	75.31	0.840	431.330	430.995	2.00	56	59	75.00	18	28	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y3	Y3 Camilo torres	4	0.20	2.95	75.31	1.040	430.995	430.660	2.00	57	5	75.00	18	26	1.1400	136.80					0.00014		136.80
2	2	5	0.02	2.95	75.31	1.060	430.660	430.325	2.00	57	7	75.00	18	26	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y4	Y4 San silvestre	6	0.32	2.95	75.31	1.380	430.325	429.990	2.00	57	16	75.00	18	22	1.1400	136.80					0.00014		136.80
3	3	7	0.21	2.96	75.31	1.590	429.990	429.655	2.00	57	22	75.00	18	20	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y5	Y5 Acropolis	8	0.08	2.96	75.30	1.670	429.655	429.320	2.00	57	23	75.00	18	18	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y6	Y6 Mansiones del norte	9	0.34	2.96	75.30	2.010	429.320	428.985	2.00	57	28	75.00	18	8	1.1400	136.80					0.00014		136.80
4	4	10	0.11	2.96	75.30	2.120	428.985	428.650	2.00	57	32	75.00	18	6	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y7	Y7 Carlos pizarro	11	0.04	2.96	75.30	2.160	428.650	428.315	2.00	57	34	75.00	18	4	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y8	Y8 Falla bernal	12	0.28	2.96	75.30	2.440	428.315	427.980	2.00	57	43	75.00	18	1	1.1400	136.80					0.00014		136.80
5	5	13	0.21	2.96	75.30	2.650	427.980	427.645	2.00	57	49	75.00	18	1	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y9	Y9 Chicala	14	0.34	2.97	75.30	2.990	427.645	427.310	2.00	58	0	75.00	18	1	1.1400	136.80					0.00014		136.80
6	6	15	0.19	2.97	75.31	3.180	427.310	426.975	2.00	58	5	75.00	18	42	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y10	Y10 Calimari	16	0.37	2.97	75.30	3.550	426.975	426.640	2.00	58	17	75.00	18	2	1.1400	136.80					0.00014		136.80
7	7	17	0.16	2.97	75.30	3.710	426.640	426.305	2.00	58	22	75.00	18	0	1.1400	136.80					0.00014		136.80
8	8	18	0.53	2.98	75.30	4.240	426.305	425.970	2.00	58	38	75.00	17	73	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y11	Y11 El Dorado	19	0.52	2.98	75.30	4.760	425.970	425.635	2.00	58	52	75.00	17	44	1.1400	136.80					0.00014		136.80
9	9	20	0.01	2.98	75.30	4.770	425.635	425.300	2.00	58	53	75.00	17	43	1.1400	136.80					0.00014		136.80
10	10	21	0.53	2.98	75.29	5.300	425.300	424.965	2.00	58	50	75.00	17	30	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y12	Y12 Villa Colombia	22	0.38	2.98	75.29	5.680	424.965	424.630	2.00	58	48	75.00	17	20	1.1400	136.80					0.00014		136.80
11	11	23	0.15	2.99	75.29	5.830	424.630	424.295	2.00	58	93	75.00	17	16	1.1400	136.80					0.00014		136.80
Y13	Y13 El venado	24	0.35	2.98	75.29	6.180	424.295	423.960	2.00	59	1	75.00	17	10	1.1400	136.80					0.00014		136.80
12	12	25	0.18	2.98	75.28	6.360	423.960	423.625	2.00	59	4	75.00	17	4	1.1400	136.80					0.00014		136.80
13	13	26	0.53	2.99	75.28	6.890	423.625	423.290	2.00	59	17	75.00	16	53	1.1400	136.80					0.00014		136.80
14	14	27	0.53	2.99	75.28	7.420	423.290	422.955	2.00	59	29	75.00	16	41	1.1400	136.80					0.00014		136.80
15	15	28	0.53	2.99	75.27	7.950	422.955	422.620	2.00	59	33	75.00	16	25	1.1400	136.80					0.00014		136.80
AGUAS ABAJO	AGUAS ABAJO	29	0.53	2.99	75.27	8.480	422.620	422.285	2.00	59	33	75.00	16	11	1.1400	136.80					0.00014		136.80

Fuente: Propia.

10.4.4 Temperatura del aire y velocidad del viento

En las siguientes ventanas del programa se ingresaron los datos de la condición climática de la zona. Basados según los registros históricos METAR en la estación meteorológica Neiva / Benito Salas - 803150 (SKNV), la cual es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos. Los datos fueron exportados por la página Tutiempo.net (51), según la modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores, la temperatura del aire es de 28°C y velocidad del viento es 5.90 m/s los cuales se compararon con los de la estación meteorológica Neiva / Benito Salas , estos datos se dejan constantes en el programa , como resultado de la media de la temperatura del aire y la velocidad del viento, la cual se establece para cada punto.

Los parámetros utilizados son los siguientes del año 2017 del mes de diciembre.

Ilustración 14 parámetros climáticos

T	Temperatura media (°C)
TM	Temperatura máxima (°C)
Tm	Temperatura mínima (°C)
SLP	Presión atmosférica a nivel del mar (hPa)
H	Humedad relativa media (%)
PP	Precipitación total de lluvia y/o nieve derretida (mm)
VV	Visibilidad media (Km)
V	Velocidad media del viento (Km/h)
VM	Velocidad máxima sostenida del viento (Km/h)
VG	Velocidad de ráfagas máximas de viento (Km/h)
RA	Indica si hubo lluvia o llovizna (En la media mensual, total días que llovió)
SN	Indicador de nieve (En la media mensual, total días que nevó)
TS	Indica si hubo tormenta (En la media mensual, total días con tormenta)
FG	Indica si hubo niebla (En la media mensual, total días con niebla)

Fuente: TU TIEMPO. El Clima, ws-803150 12 de 2017.

Ilustración 15 Datos climáticos diciembre 2017 Neiva-Huila.

Datos climáticos: Diciembre 2017														
Día	T	TM	Tm	BLP	H	PP	VV	V	VM	VB	RA	SN	TB	FG
1	29.3	33	22.8	1005.2	64	0	12.7	5.1	14.8	-			o	
2	27.4	31	24	1005.9	74	1.02	11.4	5	9.4	-	o		o	
3	27.3	31	22	1007.1	72	0	12.1	4.1	7.6	-				
4	27.6	32.1	22.1	1005.7	72	0	12.6	6.5	13	-				
5	28.7	34	22	1006.1	60	0	12.7	5.7	11.1	-				
6	29.3	35	21	1006.3	53	0	13	5.4	9.4	-				
7	27.8	31.6	22	1005.9	60	0	12.4	4.4	9.4	-				
8	28.3	34	21.5	1006.1	63	0	12.7	3.3	9.4	-				
9	28.6	32.6	23	1007.4	65	4.06	11.1	5.4	9.4	-	o			
10	29.1	33	23.3	1007.6	62	0	12.2	7.4	20.6	-				
11	28.1	31	24	1007.6	68	0	12.1	6.1	14.8	-				
12	26	32.1	23	1008.7	78	-	9.8	5.7	16.5	-	o			
13	26.3	31.2	22.8	1009.7	76	0	10.3	7	13	-				
14	28.7	33	23.4	1009.1	64	0	12.1	3.3	7.6	-				
15	28.8	34	21.9	1008	59	0	12.6	5.2	11.1	-				
16	28.6	33	22.5	1007.5	61	0	11.6	5.7	11.1	-				
17	30.1	35	23	1004.9	55	0	12.1	6.1	9.4	-				
18	30.2	34	23	1005.2	55	0	11.6	5.4	11.1	-				
19	28.9	33	23.6	1008.5	62	-	10.3	6.9	13	-	o			
20	29.3	33	23.7	1006.2	60	0	10.8	4.3	11.1	-				
21	28.8	33	23.8	1006	64	0	11.1	3.9	9.4	-				
22	29.3	34	23	1006.2	61	6.1	11.9	6.1	13	-	o			
23	29.2	34	23.2	1006.2	61	0	11.9	8.3	13	-				
24	28.7	33	22	1006	63	4.06	12.6	6.3	13	-				
25	27.2	31	22.6	1007.8	71	0.25	9.7	9.1	14.4	-				
26	25.6	29.2	22	-	78	24.89	8.7	6.7	13	-	o			
27	25.7	30	22	1009.1	78	-	10.3	5.2	13	-	o			
28	27.6	32	22	1007.6	72	0	11.7	7.2	16.5	29.4				
29	26.1	30	21.7	1008.3	77	0.76	10.9	6.7	14.8	-	o		o	
30	25.8	31	21.6	1010	79	-	10.9	5.9	11.1	-	o			
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medias y totales mensuales:														
	28.1	32.5	22.6	1007.1	66.2	41.14	11.5	5.9	12.1		9	0	3	0

Fuente: TU TIEMPO. El Clima, ws-803150 12 de 2017.

Anexo 4 Estación meteorológica Neiva / Benito Salas - 803150 (SKNV) año 2017

Ilustración 16 Temperatura media del aire

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
RIO MAGDALENA (9/10/2019)

Open File Run VBA Run Fortran

Air Temperature Data:

Upstream	Reach	Downstream	Reach	Distance	Downstream	Distance	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM
Label	Label	Label	Number	km	km	Hourly air temperature for each reach (degrees C)								
<i>(The input values are applied as point estimates at each time. Linear interpolation is used.)</i>														
AGUAS ARRIBA	1.00	1.00	1	0.00	0.53	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
1.00	Y1	Y1 Santander Nort	2	0.53	0.66	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y1 Santander Nort	Y2	Y2 Santander Sur	3	0.66	0.84	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y2 Santander Sur	Y3	Y3 Camilo torres	4	0.84	1.04	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y3 Camilo torres	2.00	2.00	5	1.04	1.06	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
2.00	Y4	Y4 San silvestre	6	1.06	1.38	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y4 San silvestre	3.00	3.00	7	1.38	1.59	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
3.00	Y5	Y5 Acropolis	8	1.59	1.67	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y5 Acropolis	Y6	Y6 Mansiones del	9	1.67	2.01	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y6 Mansiones del	4.00	4.00	10	2.01	2.12	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
4.00	Y7	Y7 Carloz pizarro	11	2.12	2.16	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y7 Carloz pizarro	Y8	Y8 Falla bernal	12	2.16	2.44	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y8 Falla bernal	5.00	5.00	13	2.44	2.65	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
5.00	Y9	Y9 Chicala	14	2.65	2.99	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y9 Chicala	6.00	6.00	15	2.99	3.18	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
6.00	Y10	Y10 Calimari	16	3.18	3.55	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y10 Calimari	7.00	7.00	17	3.55	3.71	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
7.00	8.00	8.00	18	3.71	4.24	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
8.00	Y11	Y11 El Dorado	19	4.24	4.76	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y11 El Dorado	9.00	9.00	20	4.76	4.77	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
9.00	10.00	10.00	21	4.77	5.30	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
10.00	Y12	Y12 Villa Colombia	22	5.30	5.68	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y12 Villa Colombia	11.00	11.00	23	5.68	5.83	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
11.00	Y13	Y13 El venado	24	5.83	6.18	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
Y13 El venado	12.00	12.00	25	6.18	6.36	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
12.00	13.00	13.00	26	6.36	6.89	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
13.00	14.00	14.00	27	6.89	7.42	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
14.00	15.00	15.00	28	7.42	7.95	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10
15.00	AGUAS ABAJO	AGUAS ABAJO	29	7.95	8.48	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10	28.10

Fuente: Datos ingresados programa QUALK2w

Ilustración 17 Velocidad del viento

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
RIO MAGDALENA (31/01/2019)
Wind speed data:

Open File Run VBA Run Fortran

Upstream		Downstream		12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.		
Reach	Reach	Reach	Distance	Distance	Wind speed for each reach 7m above water surface (m/s)						
Label	Label	Label	Number	km	km	<i>(The input values are applied as point estimates at each time. Linear interp</i>					
AGUAS ARRIBA	1.00	1.00	1	0.00	0.53	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
1.00	Y1	Y1 Santander Nort	2	0.53	0.66	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y1 Santander Nort	Y2	Y2 Santander Sur	3	0.66	0.84	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y2 Santander Sur	Y3	Y3 Camilo torres	4	0.84	1.04	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y3 Camilo torres	2.00	2.00	5	1.04	1.06	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
2.00	Y4	Y4 San silvestre	6	1.06	1.38	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y4 San silvestre	3.00	3.00	7	1.38	1.59	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
3.00	Y5	Y5 Acropolis	8	1.59	1.67	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y5 Acropolis	Y6	Y6 Mansiones del	9	1.67	2.01	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y6 Mansiones del	4.00	4.00	10	2.01	2.12	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
4.00	Y7	Y7 Carloz pizarro	11	2.12	2.16	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y7 Carloz pizarro	Y8	Y8 Falla bernal	12	2.16	2.44	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y8 Falla bernal	5.00	5.00	13	2.44	2.65	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
5.00	Y9	Y9 Chicala	14	2.65	2.99	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y9 Chicala	6.00	6.00	15	2.99	3.18	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
6.00	Y10	Y10 Calimari	16	3.18	3.55	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y10 Calimari	7.00	7.00	17	3.55	3.71	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
7.00	8.00	8.00	18	3.71	4.24	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
8.00	Y11	Y11 El Dorado	19	4.24	4.76	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y11 El Dorado	9.00	9.00	20	4.76	4.77	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
9.00	10.00	10.00	21	4.77	5.30	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
10.00	Y12	Y12 Villa Colombia	22	5.30	5.68	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y12 Villa Colombia	11.00	11.00	23	5.68	5.83	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
11.00	Y13	Y13 El venado	24	5.83	6.18	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
Y13 El venado	12.00	12.00	25	6.18	6.36	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
12.00	13.00	13.00	26	6.36	6.89	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
13.00	14.00	14.00	27	6.89	7.42	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
14.00	15.00	15.00	28	7.42	7.95	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
15.00	AGUAS ABAJO	AGUAS ABAJO	29	7.95	8.48	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90

Fuente: Datos ingresados programa QUALK2w

10.4.5 Fuentes puntuales

En esta ventana se ingresan los parámetros de calidad de cada vertimiento los cuales son: temperatura, conductividad, alcalinidad, PH, nitrógeno, fosforo entre otros.

Ilustración 18 Fuentes puntuales

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
RIO MAGDALENA (9/10/2019)

Open
File

Run
VBA

Run
Fortran

Point Source Data:

Name	Location (km)	Point	Point	Temperature			Specific Conductance			Inorgan
		Abstraction	Inflow	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean
		m3/s	m3/s	°C	°C	max	umhos	umhos	max	mg/L
V1 Santander Norte	0.660	0.0000	0.7000	27.10			517.00			73.00
V2 Santander Sur	0.840	0.0000	0.8547	27.10			116.00			115.00
V3 Camilo torres	1.040	0.0000	0.0029	27.40			798.00			142.00
V4 San silvestre	1.380	0.0000	0.0049	25.30			746.00			110.00
V5 Acropolis	1.670	0.0000	0.0014	26.90			572.00			85.00
V6 Mansiones del norte	2.010	0.0000	0.0018	26.26			800.00			198.00
V7 Carloz pizarro	2.160	0.0000	0.0052	28.20			740.00			155.00
V8 Falla bernal	2.440	0.0000	0.0315	27.50			781.00			113.00
V9 Chicala	2.990	0.0000	0.0088	27.50			652.00			92.00
V10 Calimari	3.550	0.0000	0.0146	27.10			850.00			160.00
V11 El Dorado	4.760	0.0000	0.0147	28.00			791.00			113.00
V12 Villa Colombia	5.680	0.0000	0.0005	26.80			1124.00			147.00
V13 El venado	6.180	0.0000	0.0198	27.80			542.00			88.00

Continuación.

Specific Conductance			Inorganic Suspended Solids			Dissolved Oxygen			Slow CBOD			
mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean
umhos	umhos	max	mg/L	mg/L	max	mg/L	mg/L	max	mgO2/L	mgO2/L	max	mgO2/L
517.00			73.00			3.40			138.00			471.00
116.00			115.00			3.30			24.00			121.00
798.00			142.00			2.34			158.00			218.00
746.00			110.00			2.73			235.00			609.00
572.00			85.00			3.01			109.00			365.00
800.00			198.00			3.19			288.00			484.00
740.00			155.00			2.49			246.00			569.00
781.00			113.00			3.43			175.00			370.00
652.00			92.00			2.53			66.00			389.00
850.00			160.00			2.74			194.00			344.00
791.00			113.00			2.61			144.00			416.00
1124.00			147.00			3.28			265.00			522.00
542.00			88.00			3.44			76.00			483.00
Organic N			Ammonia N			Nitrate + Nitrite N			Organic P			
mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean
ugN/L	ugN/L	max	ugN/L	ugN/L	max	ugN/L	ugN/L	max	ugP/L	ugP/L	max	ugP/L
1015.40			7520.00			80.0						793.00
1019.80			6210.00			83.0						361.00
1058.20			38800.00			80.0						4760.00
1037.70			31040.00			97.0						2679.00
1015.40			9600.00			217.0						3425.00
1038.20			23280.00			80.0						4171.00
1043.10			23280.00			89.0						3071.00
1039.40			31040.00			80.0						4211.00
1032.80			26000.00			80.0						3464.00
1038.70			31000.00			80.0						4171.00
1040.10			31040.00			80.0						2168.0000
1082.70			34320.00			80.0						951.0000
1018.30			15520.00			80.0						911.0000

Fuente: Datos ingresados programa QUALK2w

10.5 MODELACIÓN CALIDAD CAR

La validación de la herramienta CALIDAD CAR se corre a través de la plataforma QGIS que es un Sistema de Información Geográfica de software libre y a través de esta CALIDAD CAR realiza la modelación mediante el código PYTHON.

CALIDAD CAR no contempla dentro de su desarrollo la modelación hidrodinámica del río en cuestión; por ende, no se tiene en cuenta los parámetros de clima para su ejecución.

El proceso de manejo e ingreso de información para la modelación a través de la plataforma QGIS es el siguiente:

10.5.1 Descargar Qgis, un sistema geográfico libre y de código abierto

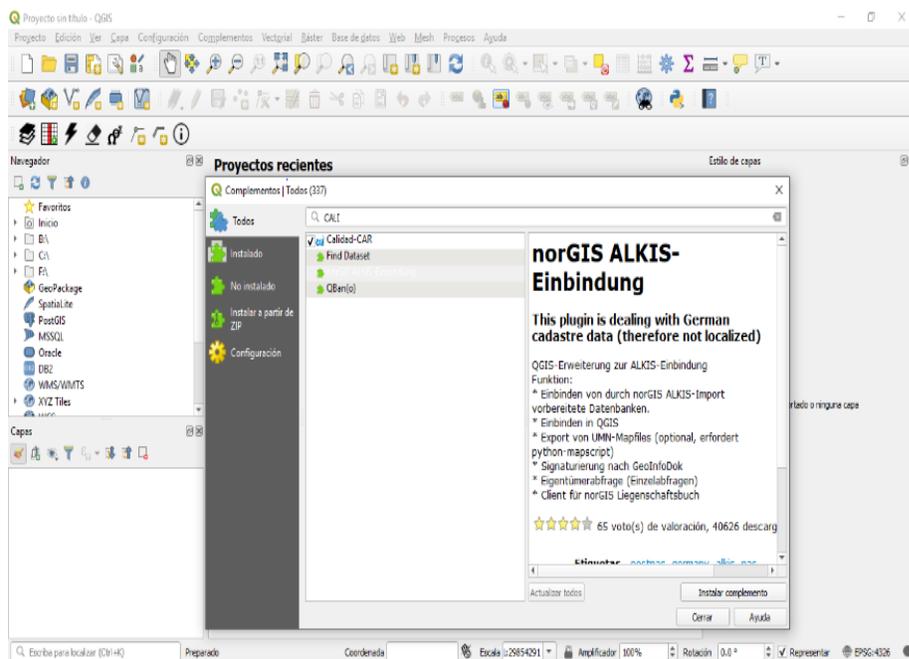
Ilustración 19 Pagina web Qgis



Fuente: QGIS. [En línea] 2018. <https://www.qgis.org/es/site/>

10.5.2 Instalamos el plugin CalidadCAR

Ilustración 20 plugin CALIDAD CAR



Fuente: Programa Qgis 2018

- Una vez instalado el plugin CALIDAD CAR, el usuario podrá ver la siguiente barra de herramientas:

Ilustración 21 Controles CALIDAD CAR #1



Fuente: Programa Qgis 2018

La cual contiene los siguientes procedimientos que el usuario podrá realizar:

1. Cargar fondos.
2. Crear el archivo de entrada.
3. Calcular.
4. Limpiar.
5. Configurar Variables.

10.5.3 Archivo de entrada

Este procedimiento consiste en crear un archivo de Excel (.xls) con una plantilla determinada, en el cuál el usuario podrá ingresar la información necesaria para poder realizar el modelado matemático de la información.

El usuario podrá realizar este procedimiento haciendo clic en el icono resaltado en la siguiente imagen:

Ilustración 22 Controles CALIDAD CAR #2



Fuente: Programa Qgis 2018

En la siguiente imagen se puede ver el dialogo que le pedirá al usuario la información necesaria para generar el archivo de Excel.

Ilustración 23 Crear archivo de entrada



Fuente: Programa Qgis 2018

10.5.4 Información de parámetro de la fuente

CALIDAD CAR maneja los siguientes parámetros, los cuales se encuentran cada uno por pestaña y estos se ingresan por unidades de longitud y tiempo por ende CALIDAD CAR brinda gráficas y cuadro de resultados en unidades de espacio y tiempo.

Tabla 3. Información de parámetro de la fuente

Nombre de la hoja	Unidad de los datos	Descripción de la hoja
WD	m	Valor de profundidad del agua (Water Depth)
SL	-	Valor de la pendiente (Slope)
WV	m/s	Valor de la velocidad del agua (Water Velocity)
BC	-	Valores de la Condición de Frontera (Boundary Conditions)
IC	-	Valores de la Condición Inicial (Initial Conditions)
Caudales	m ³ /s	Hoja de Caudales
SOD	mg/l	Valores de fuentes y sumideros OD oxígeno disuelto
SDBO	mg/l	Valores de fuentes y sumideros DBO Demanda Biológica de oxígeno
SNH4	mg/l	Valores de fuentes y sumideros NH4 Amonio
SNO2	mg/l	Valores de fuentes y sumideros NO2 Nitritos
SNO3	mg/l	Valores de fuentes y sumideros NO3 Nitratos
STDS	mg/l	Valores de fuentes y sumideros TDS Sólidos disueltos totales
SGyA	mg/l	Valores de fuentes y sumideros GyA Grasas y aceites.
SDQO	mg/l	Valores de fuentes y sumideros DQO Demanda química de oxígeno
SPorg	mg/l	Valores de fuentes y sumideros Porg Fosforo orgánico
SPdis	mg/l	Valores de fuentes y sumideros Pdis Fosforo disuelto
SEC	NMP	Valores de fuentes y sumideros EC Coliformes fecales
STC	NMP	Valores de fuentes y sumideros TC Coliformes totales
ST	c°	Valores de fuentes y sumideros T Temperatura
STSS	mg/l	Valores de fuentes y sumideros TSS Sólidos suspendidos totales
SSS	mg/l	Valores de fuentes y sumideros SS Sólidos suspendidos
SpH	unidades de pH	Valores de fuentes y sumideros pH
SALK	mg/l	Valores de fuentes y sumideros ALK Alcalinidad.

Fuente: Programa Calidad Car 2018

10.6. Calibración de los modelos

Con el fin de hacer coincidir la simulación con los datos medidos en campo, es necesario contar, con la serie de datos independientes teniendo en cuenta que los parámetros de un modelo de calidad del agua se deben ajustar mediante métodos estadísticos o regresiones matemáticas.

Para esto, se estableció una función objeto de tal forma que tuviese una aproximación a los datos observados. El cálculo de la función objetivo se realizó mediante el error cuadrático medio (RMSE):

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

Donde O_i y M_i son los datos observados y modelados respectivamente y n es el número de observaciones realizadas. Así mismo, se usó el error cuadrático total como la sumatoria de cada uno de los errores determinados para cada parámetro.

Para el caso de QUAL2KW la minimización del error se hace mediante un módulo de optimización que posee la herramienta haciendo ensayos de prueba y error de las constantes de reacción dentro de los límites establecidos por la literatura.

Para la herramienta CALIDAD CAR, no se cuenta con módulo de optimización por lo que la minimización de la función objetivo se hace de manera manual cambiando los valores de las constantes y revisando el valor de la función objetivo.

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la información de campaña de monitoreo realizada en el año 2017 por Construcsuelos suministros LTDA y el estudio de modelación del agua código HITGInDiDe180502 del 2018 de HIDROSAN ingenieros consultores se seleccionó la siguiente información distribuida en tablas de la siguiente manera.

En la siguiente tabla se indican los resultados de la toma de muestras de la zona aguas arriba ubicada a 432 msnm y aguas abajo a 422 msnm, en la cual se validan los parámetros de calidad de agua.

Tabla 4. Consolidadas aguas arriba y aguas abajo.

DESCRIPCION DE SERVICIO	RIO MAGDALENA (aguas arriba)	RIO MAGDALENA (aguas abajo)	UNIDADES
CAUDAL	770	771,735	m ³ /s
COLIFORMES TOTALES	13x100	240x100	NMP/100mL
COLIFORMES TOTALES	240x100	920x100	NMP/100mL
CONDUCTIVIDAD	181,8	545	μS/cm
OXIGENO DISUELTO	7,18	6,17	mg/L
PH	7,6	7,71	Unid. pH
POTENCIAL REDOX	-21,7	-21,7	mV
TEMPERATURA DE LA MUESTRA	27,3	27,2	°C

Fuente: LTDA, CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS. Informe de resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica del agua residual urbana del municipio de Neiva- Huila. 2018.

Tabla 5 Consolidados laboratorio aguas arriba y aguas abajo de la sección de estudio río Magdalena, Neiva- Huila

ANALISIS	RESULTADOS AGUAS ARRIBA RIO MAGDALENA	RESULTADOS AGUAS ABAJO RIO MAGDALENA	UNIDADES
ALCALINIDAD TOTAL	42	44	mg CaCO ₃ /L
NITROGENO AMONIAICAL	0,232	0,155	mg N-NH ₃ /L
CAUDAL	770000	771735,6	L/s
CLORUROS	<3,0	3,4	mg Cl ⁻ /L
CONDUCTIVIDAD	181,8	545	µS/cm
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	<5,00	<5,00	mg/L
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)	<10	<10	mg O ₂ /L
DUREZA TOTAL	44	45	mg CaCO ₃ /L
FÓSFORO TOTAL	0,210	0,290	mg P/L
FOSFATOS	<0,100	<0,100	mg P/L
NITRATOS	<0,50	<0,50	mg N-NO ₃ /L
NITRITOS	<0,030	<0,030	mg NO ₂ /L
OXIGENO DISUELTO	7,18	6,17	mg O ₂ /L
Ph	7,6	7,71	Unidades de pH
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	109	115	mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	652	291	mg SST/L
SULFATOS	<10	<10	2-mg SO ₄ /L
TURBIDEZ	830,00	624,00	NTU
COLIFORMES TOTALES *	240X100	920X100	NMP/100 mLmuestra
COLIFORMES FECALES *	13X100	240X100	NMP
BARIO *	<0,50	<0,50	mg Ba/L
CADMIO *	<0,02	<0,02	mg Cd/L
CALCIO *	<0,5	0,59	mg Ca/L
CARBONO ORGANICO TOTAL *	2,9	<3,5	mg/L
COBRE *	<0,1	<0,1	mg Cu/L
CROMO TOTAL *	<0,2	<0,2	mg Cr/L
FENOLES TOTALES *	<0,2	<0,2	mg Fenol /L
HIERRO TOTAL *	23,9	16,7	mg Fe/L
MAGNESIO *	1,2	1,11	mg Mg/L
MANGANESO *	0,57	0,31	mg Mn/L
MERCURIO *	0,001	0,001	mg Hg/L
NIQUEL *	<0,02	<0,02	mg Ni/L
NITROGENO ORGANICO *	0,56	0,38	mg N /L
PLATA *	<0,04	<0,04	mg Ag/L
PLOMO *	<0,5	<0,5	mg Pb/L
POTASIO *	5,16	4,6	mg K/L
SODIO *	7,99	7,00	mg Na/L
ZINC *	<0,1	<0,1	mg Zn /L

Fuente: LTDA, CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS. Informe de resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica del agua residual urbana del municipio de Neiva- Huila. 2018

Tabla 6. Resultados de caracterización de cada vertimiento

ITEM	ANALISIS	UNIDADES	SANTANDER NORTE	SANTANDER SUR	CAMILO TORRES	SAN SILVESTRE	ACROPOLIS	MANSIONES DEL NORTE	CARLOS PIZARRO	FALLA BERNAL	CHICALA	CALAMARI	EL DORADO	VILLA COLOMBIA	EL VENADO
1	ALCALINIDAD	mg CaCO ₃ /L	159	135	211	195	200	189	198	200	168	223	216	250	158
2	NITRÓGENO AMONICAL	mg N-NH ₃ /L	7,52	6,21	38,8	31,04	9,6	23,28	23,28	31,04	26	31	31,04	54,32	15,52
3	ARSENICO *	mg As/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
4	BARIO *	mg Ba/L	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
5	CADMIO	mg Cd/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
6	CARBONO ORGANICO TOTAL	mg/L	161	23,0	98,3	205	117	168,3	210	148	152,7	181	135	195	67
7	CAUDAL	L/s	700,32	854,73	2,92	4,87	7,46	1,83	5,19	31,52	8,78	84,24	14,74	0,49	19,79
8	CLORUROS	mg Cl/L	32,5	50,0	49,02	45,62	43,68	50,47	41,74	32,52	46,59	10,19	117,45	4,37	
9	COLIFORMES FECALES *	NMP/100 mL muestra	540 X 10.000	1600X1000	350X10.000	540X10.000	920X10.000	240X10.000	1600X10.000	920X10.000	350X10.000	350X10.000	350X10.000	540X10.000	240X10.000
10	COLIFORMES TOTALES *	NMP/100 mL muestra	1600 X 10.000	1600X1000	1600X10.000	1600X10.000	1600X10.000	540X10.000	2400X10.000	1600X10.000	540X10.000	1600X10.000	1600X10.000	2400X10.000	540X10.000
11	NITRÓGENO TOTAL *	mg N/L	15,4	19,8	58,2	37,7	15,4	38,2	43,1	39,4	32,8	38,7	40,1	82,7	18,3
12	DETERGENTES - TENSOACTIVOS (SAAM) *	mg/L	7,03	0,43	16,48	19,87	12,59	22,73	31,82	20,08	19,9	35,99	22,76	26,04	18,68
13	HIDROCARBUROS TOTALES (TPH) *	mg/L	1,4	1,2	10,3	23,3	22,1	34,9	45,9	38,9	36	14,2	43,6	19,7	24,4
14	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	µS/cm	517	116	798	746	572	800	740	781	652	850	791	1124	542
15	CROMO TOTAL	mg Cr/L	<0,20	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
16	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	mg/L	138	24	158,00	235	109	288	246	175	66	194	144	265	76
17	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO ₂₀)	mg/L	269	74	178,00	382	136	329	301	178	137	276	211	334	136
18	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO _d)	mg/L	471	121	218,00	609	365	484	569	370	398	344	416	522	483
19	DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)	mg O ₂ /L	482	69	295	615	352	505	630	445	458	542	406	584	202
20	ORTOFOSFATOS	mg P-PO ₄ /L	0,793	0,361	4,760	2,679	3,425	4,171	3,071	4,211	3,464	4,171	2,168	0,951	0,911
21	GRASAS Y ACEITES	mg G _y A/L	<10	<10	40	33,88	34,43	52,55	56,46	56,84	43,88	73,4	60,83	29,38	35,57
22	HIERRO	mg Fe/L	1,23	0,710	0,832	0,15	0,43	0,43	<0,1	0,56	0,19	0,74	0,57	1	0,72
23	MAGNESIO	mg Mg/L	1,66	3,8	4,15	6,01	3,8	4,34	5,23	4,84	5,02	4,95	2,4	4,54	5,56
24	MERCURIO *	mg Hg/L	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
25	NITRATOS	mg N-NO ₃ /L	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
26	NITRITOS	mg N-NO ₂ /L	<0,030	<0,030	<0,030	0,047	0,167	<0,030	0,039	<0,030	<0,030	0,03	<0,030	<0,030	<0,030
27	OXIGENO DISUELTO	mg O ₂ /L	3,4	3,30	2,34	2,73	3,01	3,19	2,49	3,43	2,53	2,74	2,61	3,28	3,44
28	PH	Unidades de pH	7,34	7,37	7,87	6,1	7,46	7,48	7,29	7,08	7,16	7,77	7,38	7,44	7,32
29	PLATA *	mg Ag/L	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
30	PLOMO *	mg Pb/L	<0,50	<0,5	<0,5	0,11	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,05	0,07	0,17
31	POTASIO	mg K/L	2,95	4,12	8,45	18,97	14	12,13	20,54	15,55	12,07	16,81	17,71	15,41	13,62
32	POTENCIAL REDOX	mV	-12,7	-6,3	-14,7	-18,5	-26,5	-17,5	-10,2	-6,2	-23,1	-3,6	-25,7	9,3	2,9
33	SELENIO *	mg Se/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
34	SODIO	mg Na/L	5,62	36,87	39,87	73,83	107	48,2	98,1	67,51	51,23	97,93	107,88	38,25	58,42
35	SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	mg/L	263	326	459	430	302	427	390	406	253	617	457	405	358
36	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg SST/L	73	115	142	110	85	198	155	113	92	160	113	147	88
37	SOLIDOS TOTALES	mg/L	309,00	474,00	535,00	546,00	363	523	632	549	396	882	748	562	516
38	SULFATOS	mg SO ₄ /L	43,90	50,47	77,59	77,04	126,66	56,09	75,51	72,37	62,27	65,3	58,25	4,94	36,75
39	TEMPERATURA DE LA MUESTRA	°C	27,1	27,1	27,4	25,3	26,9	26,6	28,2	27,5	27,5	27,1	28	26,8	27,8
40	TURBIDEZ	NTU	49,2	88,1	122	98,8	98,0	140,0	151,0	240,0	57,1	326,0	260,0	563	231,0

Fuente: LTDA, CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS. Informe de resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica del agua residual urbana del municipio de Neiva- Huila. 2018.

Tabla 7 . Resultados de análisis por vertimiento

PUNTOS	ZONAS	pH	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	T. Muestra (°C)	Caudal (L/s)
1	VERTIMIENTO SANTANDER NORTE	7,34	3,40	27,1	700,32
2	VERTIMIENTO PUENTE DE SANTANDER SUR	7,37	3,29	27,1	854,73
3	VERTIMIENTO CAMILO TORRES	7,87	2,34	27,4	2,92
4	VERTIMIENTO SAN SILVESTRE	6,10	2,73	25,3	4,87
5	VERTIMIENTO ACRÓPOLIS	7,46	3,01	26,9	1,38
6	VERTIMIENTO MANSIONES DEL NORTE	7,48	3,19	26,6	1,83
7	VERTIMIENTO CARLOS PIZARRO	7,29	2,49	28,2	5,19
8	VERTIMIENTO FALLA BERNAL	7,08	3,43	27,5	31,52
9	VERTIMIENTO CHICALA	7,16	2,53	27,5	8,78
10	VERTIMIENTO CALAMARI	7,77	2,74	27,1	14,64
11	VERTIMIENTO EL DORADO	7,38	2,61	28,0	14,70
12	VERTIMIENTO VILLA COLOMBIA	7,44	3,28	26,8	0,49
13	VERTIMIENTO EL VENADO	7,32	3,44	27,8	19,79

Fuente: LTDA, CONSTRUCCIONES SUMINISTROS. Informe de resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica del agua residual urbana del municipio de Neiva- Huila. 2018.

En las tablas anteriores se observa la caracterización de cada uno de los vertimientos validando los resultados de los análisis de los diferentes parámetros orgánicos, inorgánicos y biológicos tomados in situ y analizados para el ingreso posteriormente a los programas de QUAL2KW y CALIDAD CAR.

Validando los resultados de las modelaciones realizadas en QUAL2KW y CALIDAD CAR; se puede observar como es la variación de los parámetros del agua a medida que va aumentando su recorrido.

Las comparaciones de los resultados se toman en unidad de medida de espacio.

Ilustración 24 ⁵³Resultados QUAL2KW #1

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	No(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po (ugP/L)	Inorg P (ugP/L)	Phyto (ugA/L)	Detritus (mgD/L)	Pathogen	Generic constituent	A/k
AGUAS ARRIBA	0.00	181.80	652.00	7.18	5.00	5.00	560.00	232.00	500.00	210.00	4.17	0.00	0.00	24000.00	0.00	42.00
1.00	0.27	181.80	652.00	7.52	4.56	5.19	543.35	231.94	516.48	186.52	27.65	0.00	0.00	23301.72	0.00	41.86
V1	0.60	181.80	652.00	7.52	4.45	5.23	539.29	231.92	520.50	180.93	33.23	0.00	0.00	23131.71	0.00	41.83
V2	0.75	182.10	651.47	7.53	4.43	5.71	534.17	238.30	525.82	173.36	41.33	0.00	0.00	37263.82	0.00	41.89
V3	0.94	182.03	650.88	7.53	4.29	5.90	528.60	244.42	531.84	165.32	49.54	0.00	0.00	54332.72	0.00	41.94
2.00	1.05	182.03	650.88	7.53	4.28	5.91	527.99	244.52	532.49	164.54	50.34	0.00	0.00	54331.66	0.00	42.74
V4	1.22	182.03	650.88	7.53	4.04	5.99	518.41	243.59	542.85	152.92	61.95	0.00	0.00	53366.98	0.00	42.66
3.00	1.49	182.04	650.87	7.53	3.89	6.05	512.20	243.12	549.63	145.66	69.22	0.00	0.00	52840.50	0.00	42.61
V5	1.63	182.04	650.87	7.53	3.83	6.07	509.84	242.86	552.21	142.95	71.94	0.00	0.00	52602.69	0.00	42.59
V6	1.84	182.04	650.87	7.53	3.61	6.14	500.02	241.62	563.12	132.28	82.61	0.00	0.00	51639.32	0.00	42.51
4.00	2.07	182.04	650.87	7.53	3.54	6.17	496.87	241.26	566.64	128.92	85.98	0.00	0.00	51333.04	0.00	42.49
V7	2.14	182.04	650.87	7.53	3.51	6.18	495.73	241.10	567.92	127.71	87.19	0.00	0.00	51217.32	0.00	42.48
V8	2.30	182.04	650.87	7.53	3.34	6.23	487.85	240.08	576.84	119.76	95.16	0.00	0.00	50578.66	0.00	42.42
5.00	2.55	182.07	650.85	7.53	3.23	6.28	482.03	240.38	583.52	114.07	101.01	0.00	0.00	50629.89	0.00	42.37
V9	2.82	182.07	650.85	7.53	3.04	6.33	472.75	238.72	594.28	105.57	109.52	0.00	0.00	49676.57	0.00	42.30
6.00	3.09	182.07	650.84	7.53	2.94	6.36	467.64	238.05	600.27	101.02	114.10	0.00	0.00	49209.81	0.00	42.26
V10	3.37	182.07	650.84	7.54	2.75	6.40	457.87	236.06	611.84	92.88	122.24	0.00	0.00	48203.65	0.00	42.19
7.00	3.63	182.09	650.83	7.54	2.68	6.42	453.69	235.75	616.83	89.49	125.71	0.00	0.00	48072.45	0.00	42.16
8.00	3.98	182.09	650.83	7.54	2.44	6.46	440.25	232.60	633.15	79.51	135.68	0.00	0.00	46677.69	0.00	42.05
V11	4.50	182.09	650.83	7.54	2.23	6.48	427.45	229.36	648.92	70.80	144.39	0.00	0.00	45348.82	0.00	41.96
9.00	4.77	182.10	650.82	7.54	2.23	6.49	427.21	229.88	649.21	70.63	144.60	0.00	0.00	45627.05	0.00	41.96
10.00	5.04	182.10	650.82	7.54	2.03	6.50	414.56	226.39	665.07	62.77	152.47	0.00	0.00	44304.45	0.00	41.86
V12	5.49	182.10	650.82	7.54	1.90	6.51	405.69	223.82	676.30	57.59	157.64	0.00	0.00	43376.35	0.00	41.79
11.00	5.76	182.10	650.82	7.54	1.85	6.51	402.22	222.82	680.71	55.62	159.61	0.00	0.00	43028.19	0.00	41.77
V13	6.01	182.10	650.82	7.54	1.74	6.50	394.28	220.38	690.88	51.37	163.86	0.00	0.00	42196.97	0.00	41.71
12.00	6.27	182.11	650.81	7.54	1.68	6.51	390.26	219.50	696.08	49.28	165.98	0.00	0.00	41909.86	0.00	41.68
13.00	6.63	182.11	650.81	7.55	1.53	6.50	378.72	215.68	711.44	43.80	171.46	0.00	0.00	40696.66	0.00	41.59
14.00	7.16	182.11	650.81	7.55	1.40	6.47	367.53	211.79	725.91	38.93	176.33	0.00	0.00	39519.09	0.00	41.50
15.00	7.69	182.11	650.81	7.55	1.28	6.44	356.67	207.85	740.40	34.60	180.65	0.00	0.00	38376.10	0.00	41.42
AGUAS ABAJO	8.22	182.11	650.81	7.55	1.16	6.40	346.14	203.87	754.59	30.76	184.50	0.00	0.00	37266.65	0.00	41.34
Terminus	8.48	182.11	650.81	7.55	1.16	6.40	346.14	203.87	754.59	30.76	184.50	0.00	0.00	37266.65	0.00	41.34

Fuente: Resultados programa QUAL2w

Anexo 5 Resultados programa modelación QUAL2KW

⁵³ Los resultados se encontrarán anexos fuera del documento, como anexo 5. Resultados programa modelación QUAL2KW.

Ilustración 25 Resultados QUAL2KW #2

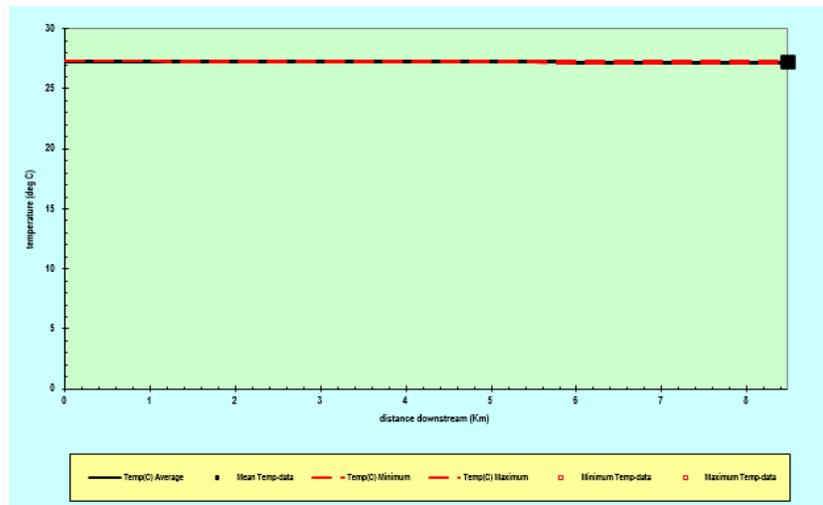
						TSS		Bot Algae				Hyporheic biofilm	Bot Alg Int N	Bot Alg Int P	Bot Alg Int N	Bot Alg Int P	BotAlgPhoto	BotAlgResp	BotAlgDeath
pH	Bot Alg (gD/m2)	TOC	TN	TP	TKN	(mgD/L)	CBODu	mgA/m^2	NH3	DO sat	pHsat	gD/m^2	mgN/mgA	mgP/mgA	mgN/gD	mgP/gD	gD/m2/d	gD/m2/d	gD/m2/d
8.11	4.96	3.25	1291.77	214.17	775.29	652.00	9.75	49.56	18.21	7.53	8.15	0.00	25.74	0.91	257.40	9.07	0.00	3.89	3.29
8.14	4.96	3.23	1291.71	214.17	771.21	652.00	9.68	49.57	19.32	7.53	8.15	0.00	25.75	0.97	257.52	9.66	0.00	3.89	3.30
8.14	4.96	3.38	1298.28	214.69	772.47	651.47	10.14	49.59	20.03	7.54	8.15	0.00	25.79	1.03	257.92	10.32	0.00	3.89	3.30
8.14	4.96	3.40	1304.86	214.85	773.02	650.88	10.19	49.61	20.60	7.54	8.15	0.00	25.83	1.09	258.34	10.85	0.00	3.89	3.30
8.14	4.96	3.39	1304.99	214.87	772.51	650.88	10.18	49.61	20.68	7.54	8.16	0.00	25.84	1.09	258.36	10.90	0.00	3.89	3.30
8.15	4.96	3.34	1304.85	214.87	762.00	650.88	10.03	49.64	20.87	7.54	8.16	0.00	25.87	1.15	258.68	11.46	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.31	1304.95	214.89	755.32	650.87	9.94	49.65	20.83	7.54	8.16	0.00	25.89	1.17	258.89	11.75	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.30	1304.91	214.89	752.70	650.87	9.90	49.66	20.80	7.54	8.16	0.00	25.90	1.18	258.96	11.84	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.25	1304.76	214.89	741.65	650.87	9.75	49.69	20.67	7.54	8.16	0.00	25.93	1.22	259.28	12.17	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.24	1304.77	214.90	738.13	650.87	9.71	49.70	20.62	7.54	8.16	0.00	25.94	1.23	259.38	12.26	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.23	1304.75	214.90	736.83	650.87	9.69	49.70	20.61	7.54	8.16	0.00	25.94	1.23	259.41	12.29	0.00	3.89	3.30
8.15	4.97	3.19	1304.77	214.92	727.93	650.87	9.57	49.73	20.50	7.54	8.16	0.00	25.97	1.25	259.66	12.48	0.00	3.90	3.30
8.15	4.97	3.17	1305.93	215.08	722.41	650.85	9.51	49.75	20.50	7.54	8.16	0.00	25.99	1.26	259.87	12.61	0.00	3.90	3.30
8.15	4.98	3.12	1305.76	215.08	711.48	650.85	9.37	49.77	20.33	7.54	8.16	0.00	26.01	1.28	260.14	12.77	0.00	3.90	3.30
8.15	4.98	3.10	1305.96	215.12	705.69	650.84	9.30	49.79	20.26	7.54	8.16	0.00	26.03	1.29	260.29	12.85	0.00	3.90	3.30
8.15	4.98	3.05	1305.77	215.12	693.93	650.84	9.15	49.82	20.06	7.54	8.15	0.00	26.06	1.30	260.56	12.98	0.00	3.90	3.30
8.15	4.98	3.03	1306.27	215.20	689.44	650.83	9.10	49.83	20.02	7.54	8.15	0.00	26.07	1.30	260.69	13.03	0.00	3.90	3.30
8.14	0.00	2.97	1306.00	215.20	672.85	650.83	8.90	0.00	19.71	7.55	8.15	0.00	6.70	0.39	67.02	3.93	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.90	1305.72	215.20	656.80	650.83	8.71	0.00	19.39	7.55	8.15	0.00	6.69	0.39	66.87	3.95	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.91	1306.30	215.23	657.09	650.82	8.72	0.00	19.43	7.55	8.15	0.00	6.67	0.39	66.71	3.94	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.84	1306.02	215.23	640.95	650.82	8.53	0.00	19.10	7.55	8.15	0.00	6.56	0.39	65.57	3.91	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.80	1305.81	215.23	629.51	650.82	8.41	0.00	18.85	7.55	8.15	0.00	6.71	0.40	67.05	3.99	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.79	1305.75	215.23	625.04	650.82	8.36	0.00	18.76	7.55	8.15	0.00	6.73	0.40	67.29	4.01	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.75	1305.55	215.23	614.67	650.82	8.24	0.00	18.53	7.55	8.15	0.00	6.66	0.40	66.56	3.98	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.73	1305.84	215.25	609.76	650.81	8.20	0.00	18.44	7.55	8.15	0.00	6.73	0.40	67.33	4.02	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.68	1305.54	215.25	594.40	650.81	8.03	0.00	18.08	7.55	8.15	0.00	6.73	0.40	67.33	4.04	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.62	1305.23	215.25	579.32	650.81	7.87	0.00	17.72	7.55	8.15	0.00	6.68	0.40	66.80	4.02	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.57	1304.92	215.25	564.52	650.81	7.72	0.00	17.36	7.56	8.15	0.00	6.72	0.40	67.18	4.05	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.52	1304.60	215.25	550.01	650.81	7.56	0.00	16.99	7.56	8.15	0.00	6.74	0.41	67.42	4.06	0.00	0.00	0.00
8.14	0.00	2.52	1304.60	215.25	550.01	650.81	7.56	0.00	16.99	7.56	8.15	0.00	6.74	0.41	67.42	4.06	0.00	0.00	0.00

Fuente: Resultados programa QUALK2w

11.1 COMPARACIÓN DE GRAFICAS Y VALORES DE QUAL2KW Y CALIDAD CAR

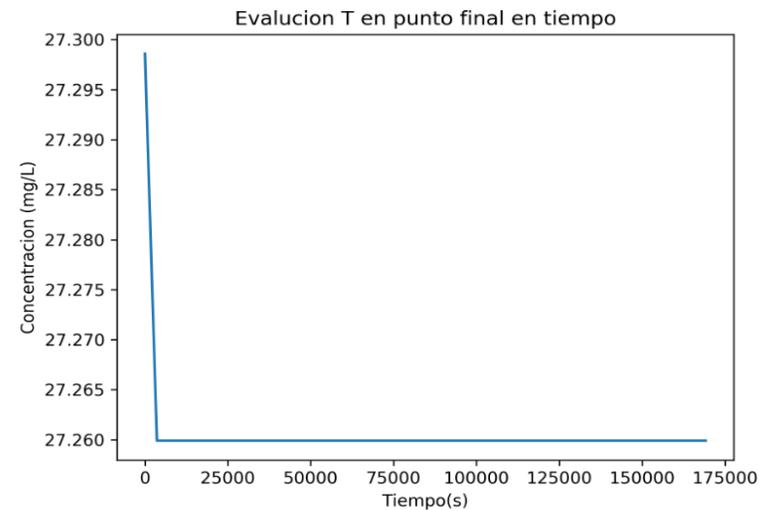
11.1.1 Temperatura

Ilustración 27. Comparación temperatura QUAL2KW



Fuente: Representación de temperatura QUAL2KW

Ilustración 28 Comparación temperatura CALIDAD CAR

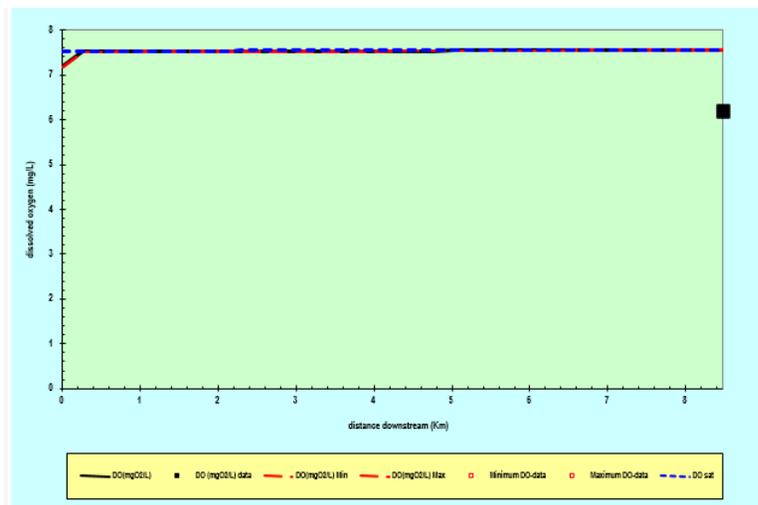


Fuente: Representación temperatura Calidad Car

No se presentó variación alta durante el recorrido al iniciar empezó a 27.3° y terminó en 27.26° en CALIDAD CAR y en QUAL2KW finalizo con temperatura media 27.20° y se mantuvo constante durante su transcurso en los dos modelos. Según el parámetro real aguas abajo la temperatura es de 27.2 C° las dos simulaciones manejaron el mismo rango y no se generó variación significativa.

11.1.2 Oxígeno Disuelto

Ilustración 29 Comparación Oxígeno Disuelto QUAL2KW

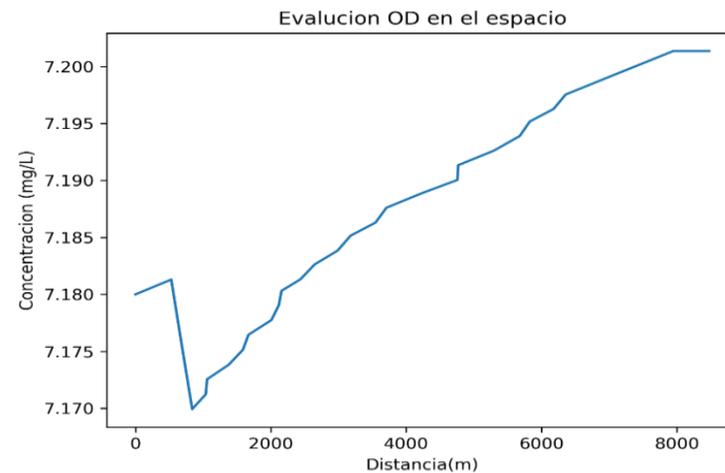


Fuente: Representación Oxígeno disuelto QUAL2KW

El oxígeno disuelto inicia constante, hasta tener un cambio considerable puesto que se consume por la DQO, después se genera la tasa de re aireación y empieza a recuperarse el oxígeno de nuevo por el contacto del agua con el aire durante el recorrido, al continuar con carga orgánica este se estabiliza y se mantiene dentro de un rango.

En QUAL2KW se Inicia con 7.18 mg/l aguas arriba donde se mantiene constante aumentando progresivamente hasta 7.55 mg/l , mientras que en CALIDAD CAR inicia en 7.20 mg/l , el valor real fue de 6.17mg/l.

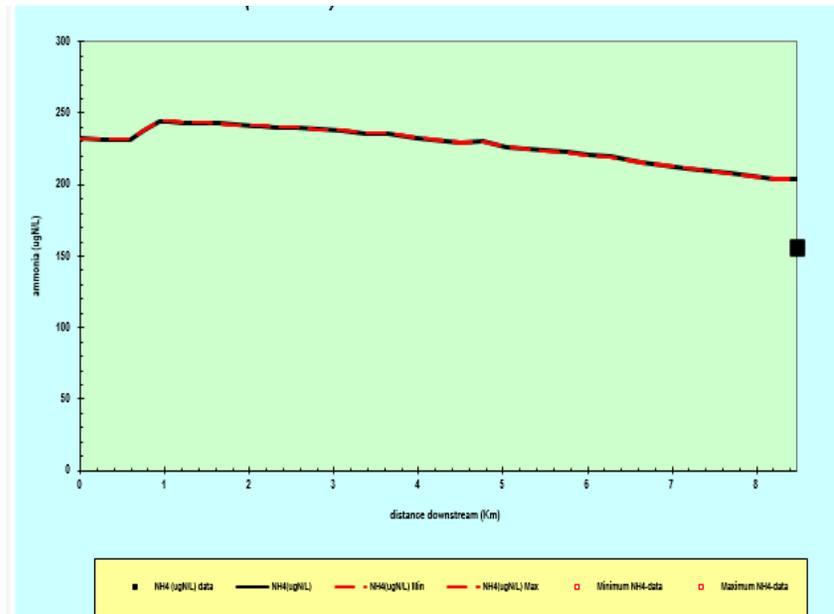
Ilustración 29 Comparación Oxígeno Disuelto CALIDAD CAR



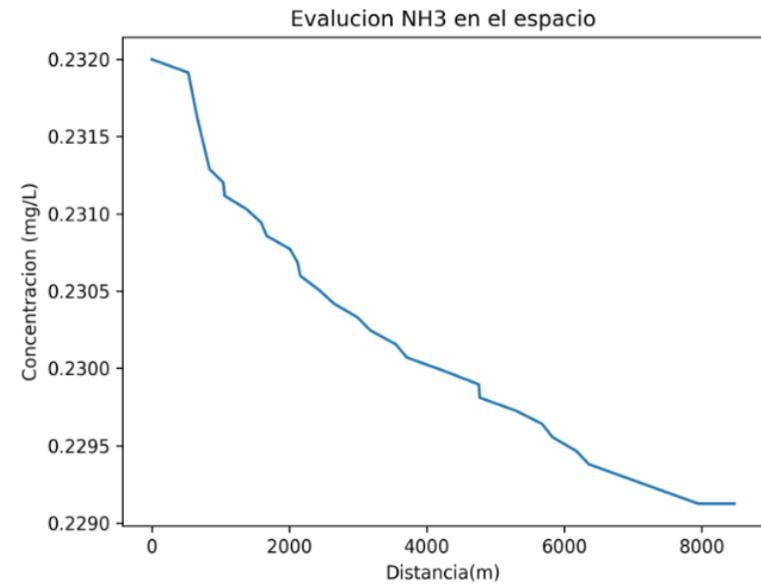
Fuente: Representación Oxígeno disuelto Calidad Car

11.1.3 Nitrógenos

Ilustración 30 Comparación amonio

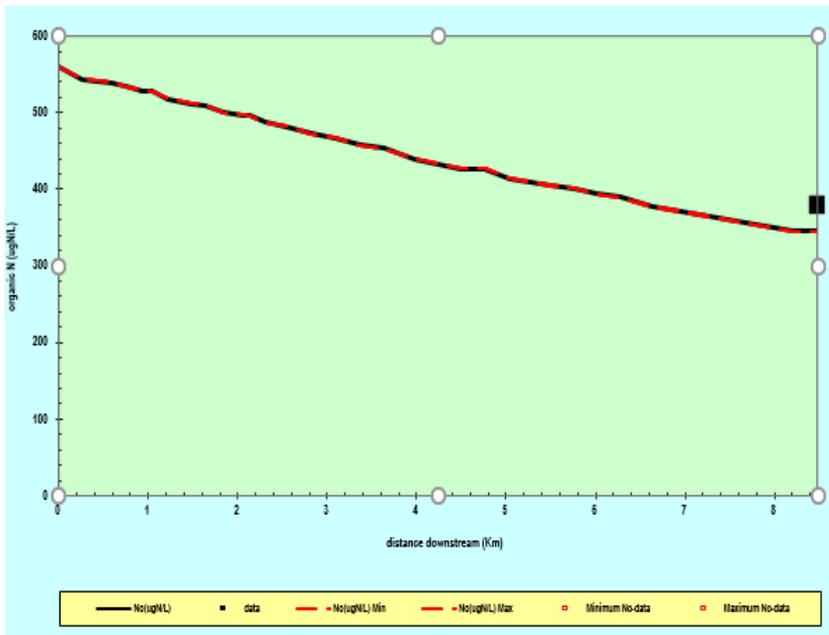


Fuente: Representación Amonio QUAL2KW

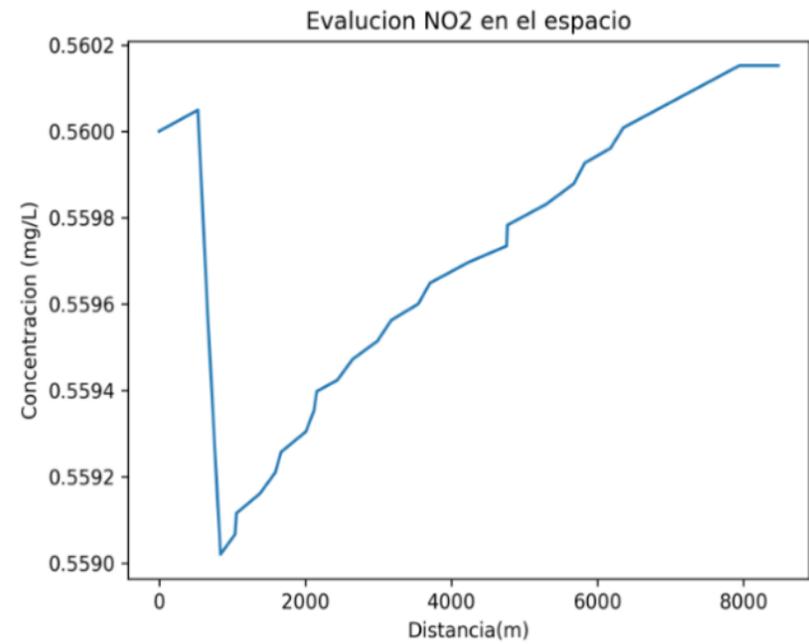


Fuente: Representación Amonio Calidad Car

Ilustración 31 Comparación nitrógeno orgánico

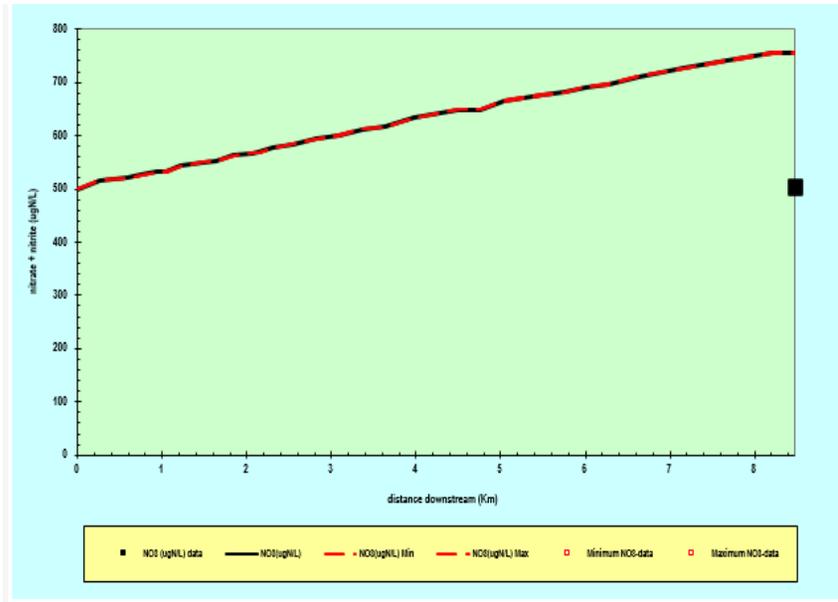


Fuente: Representación Nitrógeno orgánico QUAL2KW



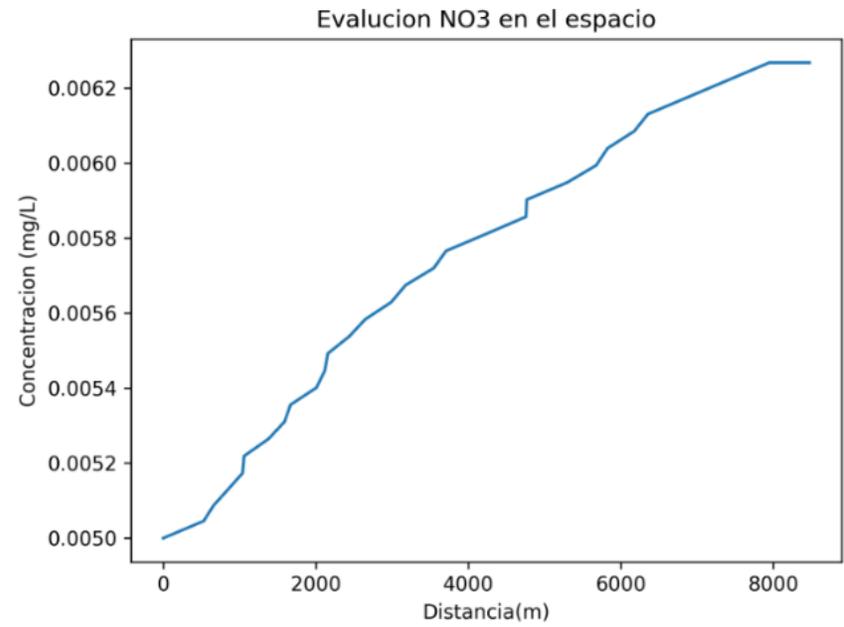
Fuente: Representación Nitrógeno orgánico Calidad Car

Ilustración 32 Comparación Nitrato QUAL2KW



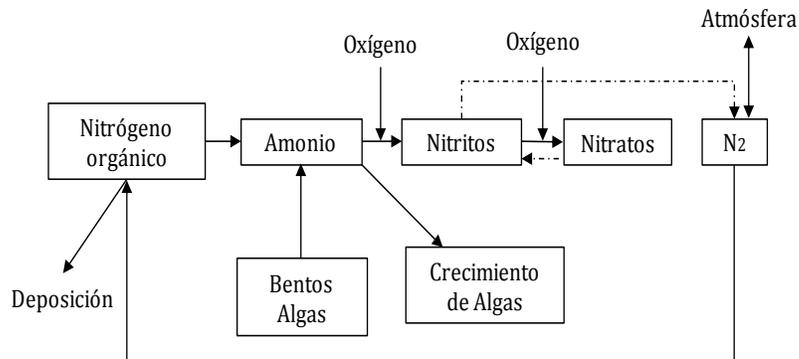
Fuente: Representación DBO QUAL2KW

Ilustración 33 DBO CALIDAD CAR



Fuente: Representación DBO Calidad Car

Ilustración 34 comportamientos de los nitrógenos



Fuente: MODELING, E. Environmental modeling. New York : s.n., 2000.

El amonio sufre más reacción durante el recorrido puesto que intenta consumirse con presencia de oxígeno donde tiende a alterarse y empieza a transformarse en nitrito y el nitrito con el oxígeno se consumen. El amonio como nitrito se consumen con el oxígeno, pero este proceso tiende a estabilizarlo y así finalmente pasa a convertirse en nitrato por lo mismo este aumenta a medida que realiza recorrido.

El resultado de las reacciones de los nitrógenos tiene el comportamiento real ya que estos aumentan por la oxidación del amonio.

La modelación referente al nitrógeno orgánico muestra que la concentración de esta especie de nitrógeno tenía un valor de 0.56 mg/l aguas arriba y como resultado final aguas abajo llegó con un valor de 0.38mg/l, por ende según el cálculo de los programas el que tiene mejor comportamiento respecto a lo real es QUAL2KW mientras que CALIDAD CAR fue de 0.346mg/l donde se mantuvo constante con un parámetro final de 0.5615mg/l; esto indica que CALIDAD CAR no modela el consumo real del nitrógeno orgánico durante el recorrido.

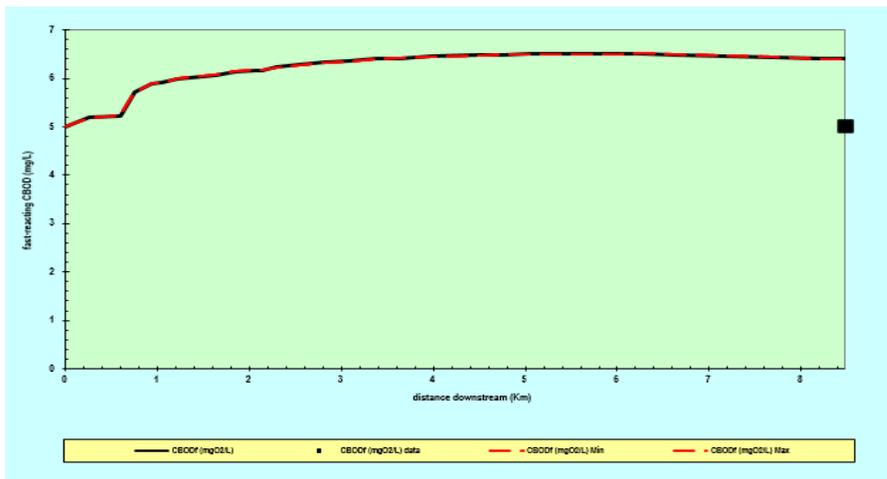
Los nitratos tuvieron un valor aguas arriba de 0.5mg/l y se mantuvieron constantes llegando con el mismo valor aguas abajo. En cambio, en QUAL2KW este tendió a aumentar llegando con un valor de 0.754mg/l y CALIDAD CAR con uno de 0.62mg/l.

El amonio y el nitrato se utilizan para satisfacer los requerimientos de nutrientes de las algas, aunque se prefiere el amonio de las consideraciones termodinámicas. La razón principal para distinguir los dos es que el amonio es oxidado por las bacterias nitrificantes en nitrato. Por lo tanto, la variable de estado de nitrato en realidad representa la suma de nitrato más nitrito.⁵⁴

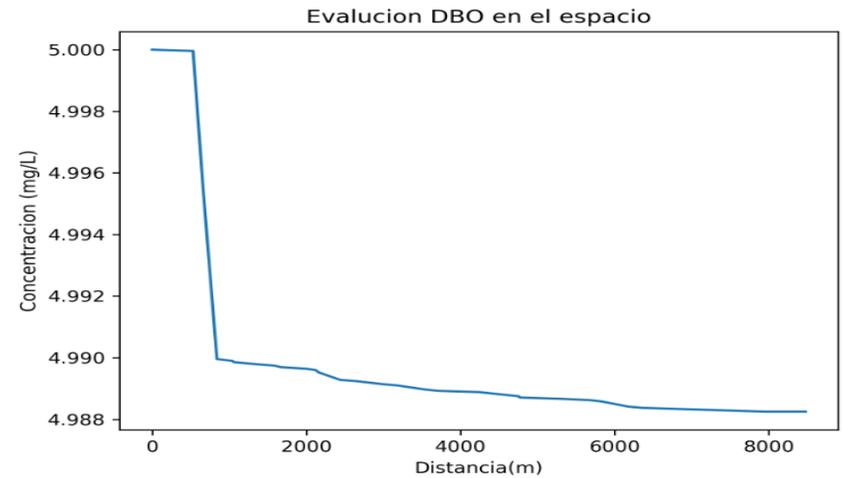
⁵⁴ MODELING, E. Environmental modeling. New York : s.n., 2000.

11.1.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Ilustración 35 Comparación DBO



Fuente: Representación DBO QUAL2KW

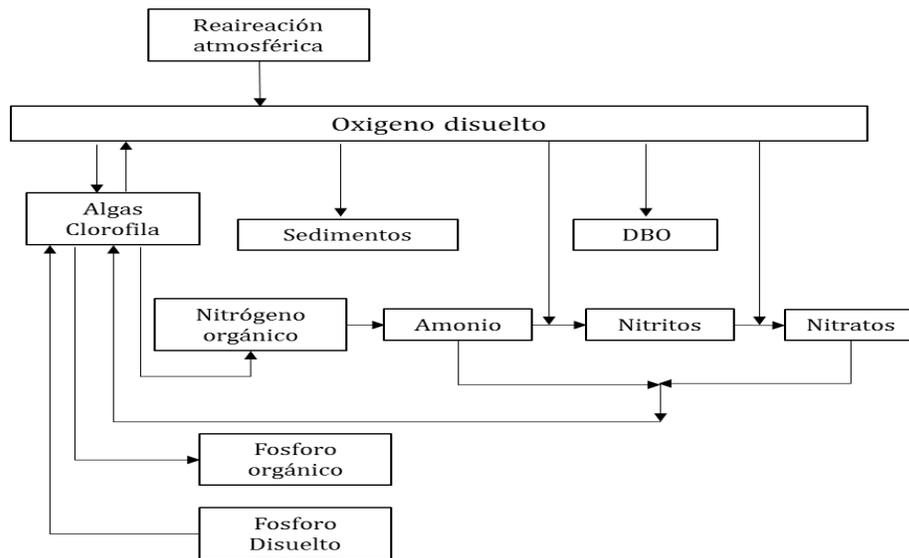


Fuente: Representación DBO Calidad Car

DBO al tener contacto con el oxígeno se empieza a degradar por la depuración natural de río, puesto que el río hasta cierto punto se puede depurar posteriormente se mantiene, pero como lo empieza a consumir la materia orgánica tiene una pérdida y después se recupera. En CALIDAD CAR la DBO nos brinda un resultado final de 4.98 mg/l y en QUAL2KW de 6.40 mg/l aguas abajo el cual tiene una variación corta en ambos programas ya que el valor real aguas abajo es de 5.00 mg/l.

Si hay materia orgánica al entrar en contacto con el oxígeno esta se consume por lo cual la escala de análisis de CALIDAD CAR así sea mínima evidencia mejor el comportamiento de este parámetro; ya que QUAL2KW tiende a aumentar en vez de consumirse.

Ilustración 36 comportamiento de parámetros en función del oxígeno disuelto



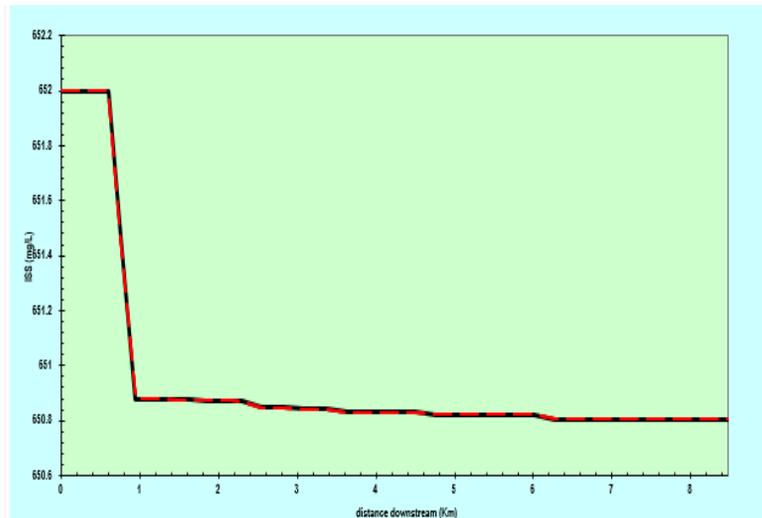
Fuente: P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. 2011.

EL oxígeno disuelto genera la mayor parte de transformaciones en los diferentes parámetros puesto que influye directamente en la creación y muerte de las algas de clorofila y estas forman los diferentes tipos de fósforos; junto con ella se valida a la creación de estas algas donde se empieza a producir el oxígeno orgánico y este a medida del nivel de contaminación de los vertimientos ubicados geográficamente como muestra la Tabla 1. Longitud, nivel y coordenadas de los vertimientos donde va generando las diferentes etapas del comportamiento de los nitrógenos.⁵⁵

⁵⁵ P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. 2011.

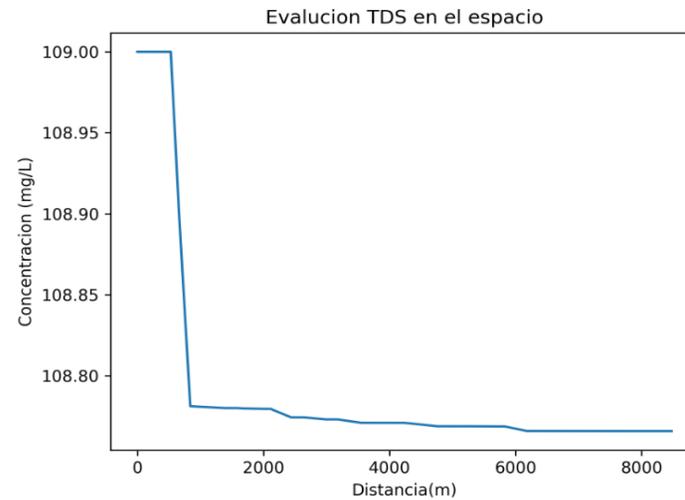
11.1.5 Sólidos disueltos totales

Ilustración 37 Comparación TDS QUAL2KW



Fuente: Representación TDS QUAL2KW

Ilustración 38 Comparación TDS CALIDAD CAR



Fuente: Representación TDS Calidad Car

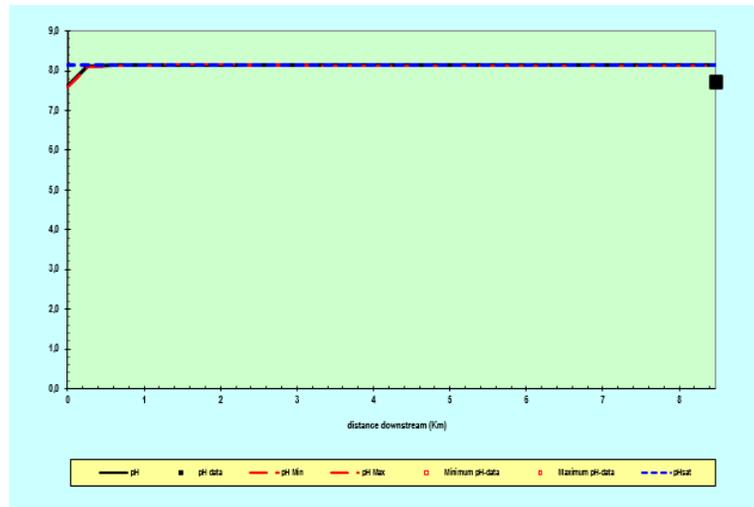
Los sólidos disueltos se ven reflejados en la eliminación de materia orgánica, que esta disuelta y esta se consume dónde sale como gas por ende se genera su consumo y desciende.

Agua abajo el nivel de sólidos disueltos totales es de 115 mg/L y CALIDAD CAR está en un rango de 108.76 mg/L.

En cambio, los sólidos suspendidos totales agua abajo son 291 mg/L y QUAL2KW llega con un valor de 650.59 mg/L; y CALIDAD CAR con un valor de 650.81 mg/L presentándose con un valor alto respecto al real; aunque ambos programas tienen un comportamiento real en el consumo de estos disminuyendo relativamente no coinciden con el valor de campo.

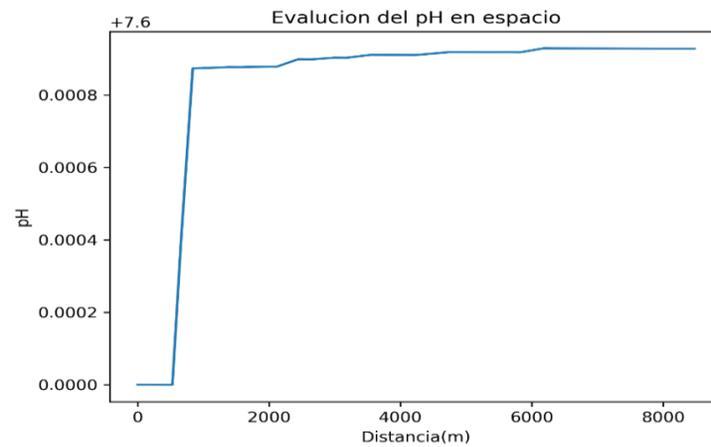
11.1.6 PH

Ilustración 39 Comparación PH QUAL2KW



Fuente: Representación PH QUAL2KW

Ilustración 40 Comparación PH CALIDAD CAR



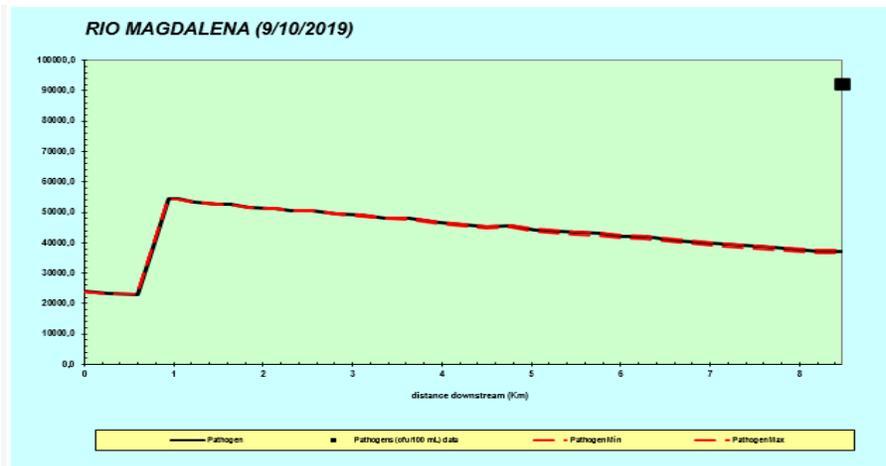
Fuente: Representación PH Calidad Car

Se presenta una mínima diferencia entre herramienta CALIDAD CAR y QUAL2KW respecto a los valores de PH aguas abajo es de 7.71 unidades de PH el cual CALIDAD CAR llega con unidades de PH de 7.6 y QUAL2KW con 6.99 unidades de PH.

Los dos programas manejan el comportamiento ideal según el nivel de contaminación del río, aunque CALIDAD CAR mejora la estimación del mismo ya que se encuentra en un rango más cercano respecto a QUAL2KW.

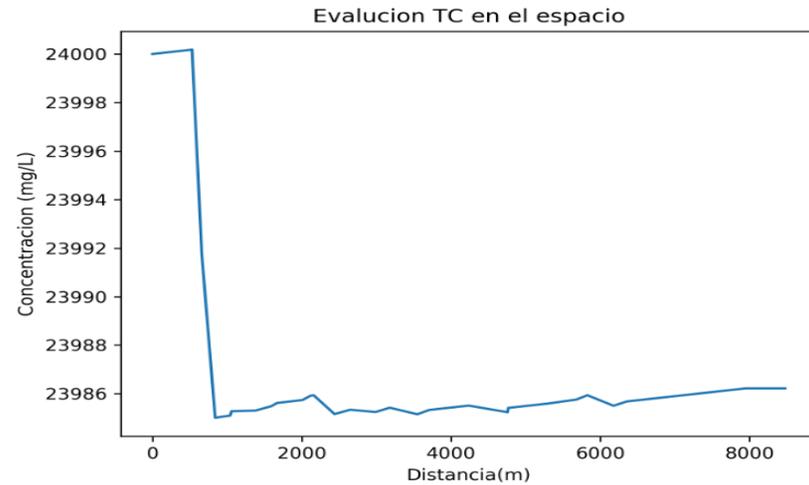
11.1.7 Coliformes totales

Ilustración 41 Comparación Coliformes totales QUAL2KW



Fuente: Representación coliformes fecales QUAL2KW .

Ilustración 42 Comparación Coliformes totales CALIDAD CAR



Fuente: Representación coliformes Calidad Car

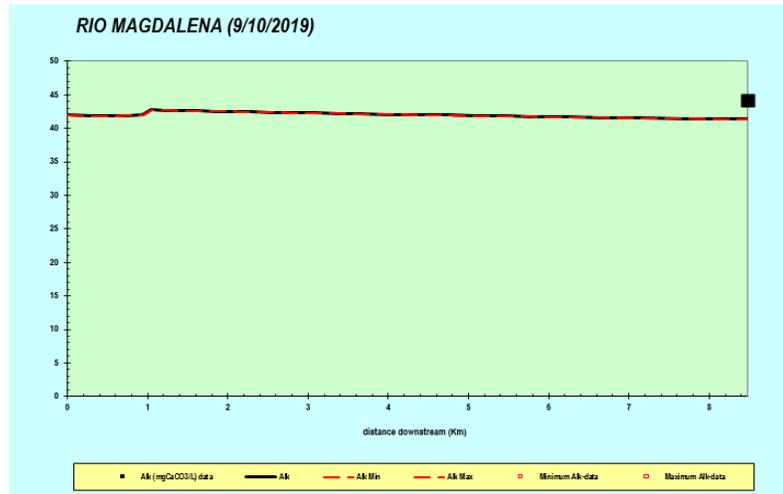
Se presenta una diferencia entre los datos de campo y la herramienta CALIDAD CAR y QUAL2KW; los coliformes totales a medida que va aumentando en el recorrido reciben un nivel de contaminación por parte de los vertimientos, los programas modelan la condición en términos de reproducción de las bacterias sobre su reproducción en el tramo.

En QUAL2KW su resultado fue 37266.65 NMP/ml y en CALIDAD CAR de 23986.21 NMP/ml, donde presenta una variación por debajo en CALIDAD CAR de del dato toma in-situ de 92000 NMP/ml, esto indica que las bacterias se reproducen por el nivel de contaminación en el trayecto.

Para obtener un valor más real se considera estudiar más la tasa de punto de muerte de las bacterias en el río. Otro factor que pudo afectar es que, dado las condiciones de oxígeno disuelto favorables (aproximadamente 7 mg/L) y de nutrientes, las velocidades de reproducción se aumentarían en el tramo de estudio más allá de lo mostrados por los dos programas lo que haría necesario complementar la dinámica biológica de los coliformes como dependiente de las concentraciones de oxígeno como de los nitratos y fosfatos disponibles.

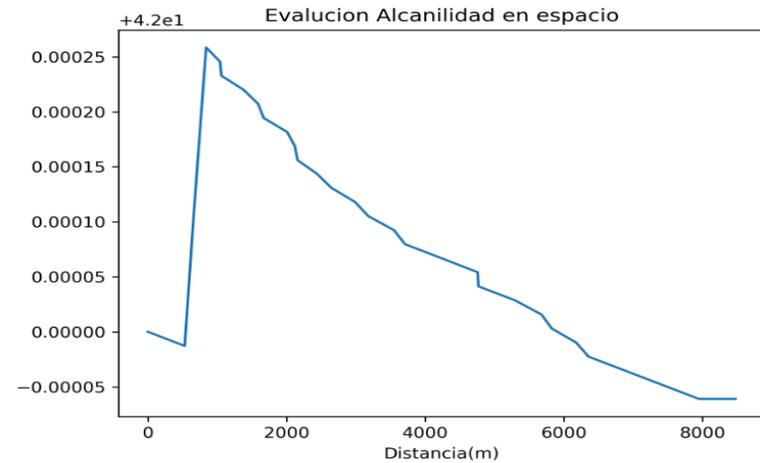
11.1.8 Alcalinidad

Ilustración 43 Comparación Alcalinidad QUAL2KW



Fuente: Representación alcalinidad QUAL2KW

Ilustración 44 Comparación Alcalinidad CALIDAD CAR



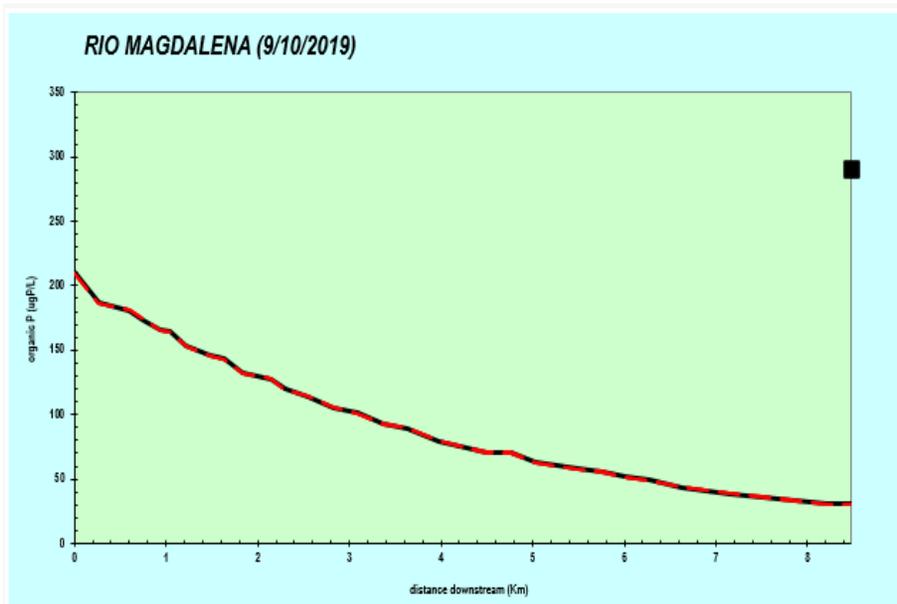
Fuente: Representación alcalinidad PH Calidad Car

Entre herramienta CALIDAD CAR y QUAL2KW se manejó un rango similar ya que no se presentó gran variación de alcalinidad durante el recorrido. En las aguas naturales, esta propiedad se debe principalmente a la presencia de ciertas sales de ácidos débiles, aunque también puede contribuir la presencia de bases débiles y fuertes.

Los parámetros de alcalinidad se mantienen ya que estas descienden muy poco ya que QUAL2KW está en un nivel de 41.34 mg/L y CALIDAD CAR en 41.99 mg/L; tomando como referencia 44 mg/l aguas abajo.

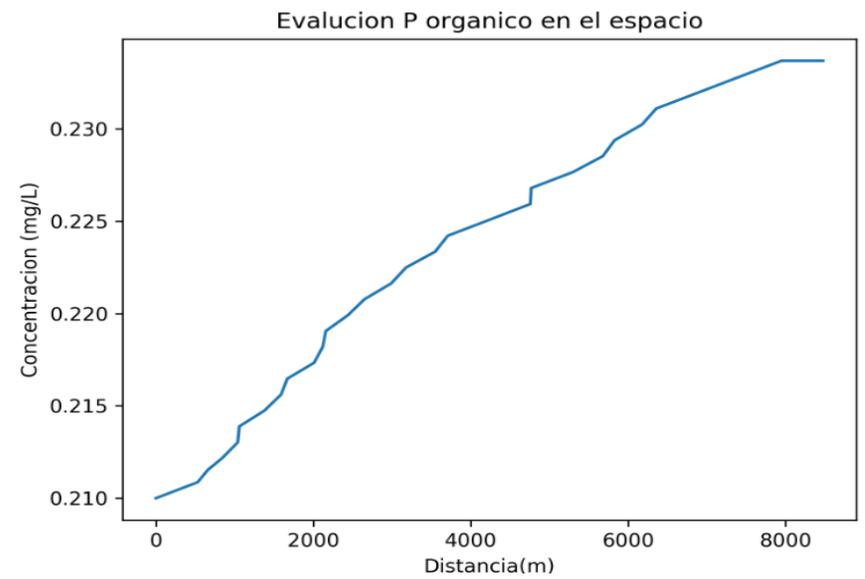
11.1.9 Fosforo orgánico

Ilustración 45 Comparación Fosforo orgánico QUAL2KW



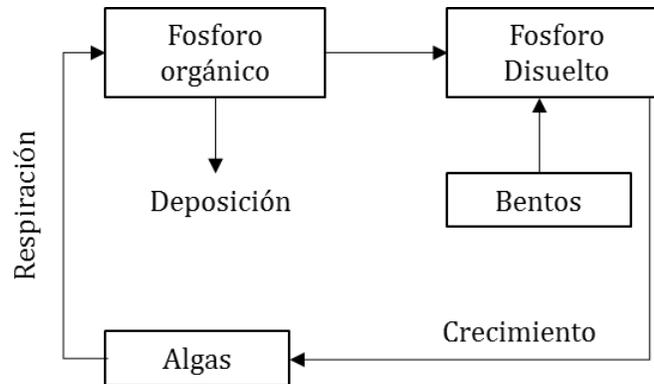
Fuente: Representación Fosforo orgánico QUAL2KW

Ilustración 46 Comparación Fosforo orgánico CALIDAD CAR



Fuente: Representación Fosforo orgánico Calidad Car

Ilustración 47 Reacciones de las especies de fosforo en agua



Referencia: TECH, TETRA. The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 3: water quality module. 2007.

El fosforo orgánico es un indicativo del grado de contaminación que puede tener un Hidrosistemas, en CALIDAD CAR obtuvo un valor menor de 0.2336 mg/L con respecto al valor real aguas abajo, el cual es de 0.29 mg/L; mientras QUAL2KW tiene un valor de 0.0376 mg/L lo cual indica que QUAL2KW en la modelación presenta un menor grado de contaminación que CALIDAD CAR.

11.2 COMPARATIVOS DE LOS MODELOS

Tabla 8 Resumen de resultados comparativo QUAL2KW CALIDAD CAR

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS EN CAMPO AGUAS ABAJO	RESULTADOS FINALES AGUAS ABAJO CALIDAD CAR	% DE ERROR CALIDAD CAR	RESULTADOS FINALES AGUAS ABAJO CALIDAD QUAL2KW	% DE ERROR QUAL2KW
OXIGENO DISUELTO	mg/l	6.17	7.2013	17%	7.55	22%
DEMANADA BIOLÓGICA DE OXIGENO	mg/l	5	4.988	0%	6.4	28%
NITRATOS	mg/l	0.5	0.62	24%	0.7546	51%
FOSFORO ORGANICO	mg/l	0.29	0.2336	19%	0.3076	6%
COLIFORMES TOTALES	NMP	920000	23986.2182	97%	37266.65	96%
TEMPERATURA	C°	27.2	27.259	0%	27.19	0%
PH	unidades de PH	7.71	7.6009	1%	8.14	6%
ALCALINIDAD	mg/l	44	41.99	5%	41.34	6%
AMONIO	mg/l	0.155	0.22914	48%	0.20387	32%
				211%		246%

Fuente: propia

Comparando las dos herramientas se puede observar la variabilidad en como modela cada una de ellas según los resultados al final del tramo de la zona de estudio, realizando el comparativo se observa que CALIDAD CAR tiene un menor error en cercanía a resultados de campo respecto a QUAL2KW.

Por otro lado, a pesar del buen ajuste que tuvo el modelo CALIDAD CAR sobre los parámetros estudiados, es importante establecer que para una mejor descripción de los procesos que ocurren dentro de los Hidrosistemas de este tipo, es relevante un mejor monitoreo. Este monitoreo de la calidad de agua deseado debe ser diseñado de tal forma que se tomen muestras periódicas en cada uno de los puntos seleccionados por un intervalo de tiempo de 1 hora durante mínimo 2 días. Así mismo, que exista una buena discretización del espacio con un Δx variable que sea más estricto cercano a los puntos de interés de estudio como lo son los puntos de vertimiento, la longitud de mezcla y los lugares donde se realice aprovechamiento del recurso hídrico y más grande en tramos del río donde no se tenga tanto interés de la calidad del agua.

La herramienta incluyó este principio y no presentó problemas de inestabilidad dado que internamente cuenta como un algoritmo para modificar el número de pasos necesarios para pasar de t a $(t+i)$ de tal forma que el modelo sea estable, lo cual

difiere de la herramienta usada normalmente en Colombia para este tipo de tareas como lo es QUAL2KW.

Con este ejercicio de modelación se puede ver que la herramienta CALIDAD CAR serviría como una herramienta de gestión para validar la calidad del agua siempre y cuando se tengan los modelos hidrológicos e hidráulicos para así realizar seguimiento para tener una validación con las licencias de permisos de vertimientos y así validar sus impactos.

11.2.1 Ventajas

- CALIDAD CAR es muy intuitivo a comparación de QUAL2KW, la forma de descarga e ingresar facilita al usuario el proceso de modelación. Esto se puede evidenciar en la simplicidad de la interface y la descripción de los pasos para la correcta digitación de los datos tomados en campo ya que se percibe que el programa fue desarrollado pensando en el tipo de usuario que se tiene en Colombia.
- No se tiene limitante de un valor mínimo para la discretización en el tiempo.
- La estabilidad en la solución del modelo matemático es mejor dado que posee internamente una función para discretizar el tiempo de tal forma que el modelo sea estable.
- Corresponde a un modelo de calidad de agua de uso libre.
- El modelo no presenta limitaciones en cuanto al número de tramos a modelar, anqué Microsoft office Excel tiene como máximo 1.048.576 filas.
- Cuando coexiste oxígeno disuelto en el agua, el ciclo del nitrógeno se consiente de una sucesión de pasos desde nitrógeno orgánico a amoniaco, a nitrito y a nitrato.
- Al estar desarrollado en QGIS se puede conectar con un archivo .shp de tal forma que se pueda tener la discretización de los espacios de una manera gráfica si se tiene la información necesaria.

11.2.2 Desventajas

- No posee hasta la fecha un módulo de optimización por lo que la calibración de los parámetros se debe realizar a través de un proceso de prueba y error.
- La herramienta CALIDAD CAR no contempla dentro de su desarrollo la modelación hidrodinámica del río en cuestión. Es por esto por lo que para poder realizar las tareas de modelación de calidad de agua es necesario tener los perfiles de velocidad para poder solucionar las ecuaciones de transporte de los parámetros fisicoquímicos.
- Es necesario instalar QGIS para correr el proceso, mientras QUAL2KW maneja una programación en Visual Basic
- No modela completamente el crecimiento de plantas flotantes y de plantas partículas fijas.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es aconsejable que el programa CALIDAD CAR tenga un módulo calibración para constates cinéticas, eso ayudaría a genera posibles escenarios para diferentes condiciones en los vertimientos.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización física química de los vertimientos podemos evidenciar que la ciudad de Neiva no presenta contaminantes por metales pesados ya que no es una ciudad con alto grado de desarrollo industrial.
- La mayor cantidad de contaminantes determinados en los vertimientos son derivados orgánicos y biodegradables.
- El modelo de calidad del agua CALIDAD CAR implementado en el río Magdalena, tramo Neiva, Huila puede ser ajustado posteriormente a partir de la realización de otras campañas de monitoreo para ser consolidado como una herramienta confiable y eficaz para la autoridad ambiental, que contribuya a la planificación del recurso hídrico.
- Se recomienda contar con una campaña de monitoreo realizada en tiempo seco para la calibración del modelo, y una campaña adicional para realizar la confirmación del mismo.
- Es importante establecer que para una mejor descripción de los procesos que ocurren dentro de los hidrosistemas de este tipo, es relevante un mejor monitoreo. Este monitoreo de la calidad de agua deseado debe ser diseñado de tal forma que se tomen muestras periódicas en cada uno de los puntos seleccionados por un intervalo de tiempo de 1 hora durante mínimo 2 días. Así mismo, que exista una buena discretización del espacio con un Δx variable que sea más estricto cercano a los puntos de interés de estudio como lo son los puntos de vertimiento, la longitud de mezcla y los lugares donde se realice aprovechamiento del recurso hídrico y más grande en tramos del río donde no se tenga tanto interés de la calidad del agua.
- La herramienta no presentó problemas de inestabilidad dado que internamente cuenta como un algoritmo para modificar el número de pasos necesarios para pasar de t a $t+i$ de tal forma que el modelo sea estable, lo cual difiere de la herramienta usada normalmente en Colombia para este tipo de tareas como lo es QUAL2KW.

BIBLIOGRAFÍA

A. SHAKIBAEINIA, Y. B. DIBIKE, S. KASHYAP, T. D. PROWSE, AND I. G. DROPPA. *A numerical framework for modelling sediment and chemical constituents transport in the Lower Athabasca River.* s.l. : J. Soils Sediments, 2017.

ARROYAVE GOMEZ, Diana Marcela. *estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia.* 2013.

BAIRD, C. *Química ambiental.* s.l. : Editorial Reverté, 2001.

BORRERO, JOAQUIN GARCIA. *El Huila y sus aspectos.* 1935.

CAR. [En línea] 2016. <http://oaica.car.gov.co/vercaso2.php?id=66>.

CARREÑO, JOHANA PÉREZ. *Modelación de la calidad del agua rio azul, municipio de pijao departamento del Quindio.* Armenia : s.n., 2015.

CASTRO DE ESPARZA, MARÍA LUISA. *Parámetros físico-químicos que influyen en la cald y en el tratamiento del agua.* Lima, CEPIS. 1987.

DEEN, W. M. *Analysis of Transport Phenomena.* 1998.

DUFFO, EUFRASIO BERNAL. *revistacredencial.* [en línea] 2013. <http://www.revistacredencial.com/credencial/historia/temas/el-rio-magdalena-escenario-primordial-de-la-patria>.

FERNÁNDEZ, NICOLÁS BELTRAN. *modelación de la calidad del agua del humedal córdoba mediante el uso del software qual2k y su potencial uso respecto a la mejora del ecosistema.* 2019.

FLOWNET. [En línea] 2018. <http://www.flownet.co/servicios/desarrollo-de-modelos-matematicos-para-la-gestion-del-agua/modelos-de-calidad-del-agua>.

GARDEY, JULIÁN PÉREZ PORTO Y ANA. [En línea] 2014. <https://definicion.de/open-source/>.

G. J. PELLETIER, S. C. CHAPRA, AND H. TAO. *QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration.* s.l. : Environ. Model. Softw, 2006.

HAMAM, S. E. M. *Diffusion of crude oil in water.* s.l. : j. environ. sci. heal. . part a environ. sci. eng., vol. 22, 1987.

HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. *Aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río guacaica, departamento de Caldas, Colombia.* Manizales : s.n., 2015.

HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. *La Modelación De La Calidad Del Agua Del Río Guacavía.* Departamento De Caldas : s.n., 2015.

IIEMD. [En línea] 2017. <https://iiemd.com/universidad/google-earth/que-es-concepto-google-earth-pro-en-linea>.

JAVERIANA, UNIVERSIDAD. sciencedirect. [En línea] 2016. <https://www-sciencedirectom.ezproxy.javeriana.edu.co/science/article/pii/S1877343518300265>.

JAVERIANA, UNIVERSIDAD. sciencedirect. [En línea] 2016. www-sciencedirect-com.ezproxy.javeriana.edu.co/science/article/pii/S0301479719303500..

J.PELLETIER, GREGORY – *A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. QUAL2Kw.* 2005.

JARAMILLO, MARÍA FERNANDA. *integration of weap and qual2k models for the simulation of water quality surface sources. case study: la vieja river basin, co.* 2016.

JAVERIANA, UNIVERSIDAD. *Calidad-CAR.* 2018.

J. LIANG, Q. YANG, T. SUN, J. D. MARTIN, H. SUN, AND L. LI. *MIKE 11 model-based water quality model as a tool for the evaluation of water quality management plans.* s.l. : J. Water Supply Res, 2015.

J. VIEIRA, A. FONSECA, V. J. P. VILAR, R. A. R. Boaventura, and C. M. S. Botelho. *Water quality modelling of Lis River, Portugal.* s.l. : Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 20, 2013.

KANSAL, D. SHARMA AND A. *Assessment of river quality models: A review.* s.l. : Reviews in environmental science and biotechnology, 2013.

LADY MILENA SANCHEZ AMADO, SERGIO ANDRÉS LEAL NORIEGA. *Modelamiento del déficit de oxígeno disuelto y aplicación del ica global para la estimación de la calidad del agua del segmento (Parque Industrial - Puente Nariño) En el río de Oro, departamento de Santander.* Bucaramanga : s.n., 2016.

LORENA BRACHO VARGAS, LUIS ANGULO ARGOTE Y LUIS DÍAZ MUEGUE. *evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar.* 2015.

LTDA, CONSTRUCSUELOS SUINISTROS. *Informe de resultados de la evaluación fisicoquímica, microbiológica del agua residual urabana del municipio de Neiva-Huila.* 20.

LTDA, CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS. *Informe de resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica del agua residual urbana del municipio de Neiva- Huila.* 2018.

LOZANO, JORGE LUIS SÁNCHEZ. *modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena.* Bogota : s.n., 2017.

MACHADO, AMAURY. *Radiografía de las aguas negras en el Huila.*2018, La nacion.

M. BENEDINI, G. TSAKIRIS, AND WATER. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams.* s.l. : Springer, 2013.

MODELING, E. *Environmental Modeling.* New York : s.n., 2000.

M. R. L. OUBOTER, B. T. M. VAN ECK, J. A. G. VAN GILS, J. P. sweerts, and m. t. villars,. *water quality modelling of the western scheldt estuary.* 1998 : hydrobiologia.

PICÓN, DOCTOR RICARDO JOSÉ LOZANO. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia.* 2016.

P. R. KANNEL, S. R. KANEL, S. LEE, Y.-S. LEE, AND T. Y. GAN. *A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams.* 2011.

RAMOS, DAVID SÁNCHEZ. *Ingeniería ambiental calidad de las aguas, tema calidad del agua y su control.* 2015.

RÍOS OSORIO, JORGE ALIRIO. Banrepcultural. [En línea] 2012. <http://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-235/neiva-arrullada-por-el-rio-Magdalena>.

SANCHEZ, LUCIA. lanacion. [En línea] 2018. <https://www.lanacion.com.co/2018/03/14/tres-meses-neiva-tendra-diseno-final-ptar/>.

TECH, TETRA. *Water quality module*. s.l. : The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 3, 2007.

TECH, TETRA. *The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 3: water quality module*. 2007.

TU TIEMPO. NET. [En línea] El clima, 12 de 2017. <https://www.tutiempo.net/clima/12-2017/ws-803150.html> .

QGIS. [En línea] 2018. <https://www.qgis.org/es/site/>

UNZUETA, XOCHITI. *velocidad media la velocidad media de un objeto se define como la distancia recorrida por un objeto dividido por el tiempo transcurrido. la velocidad es*. 2017.

WHITEHEAD, P.E., WILLIAM, R.J. AND LEWIS, D.R. *Quality simulation along rivers (QUASAR)*. 1997.