

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	WENDY PAOLA PÉREZ JIMÉNEZ		
FACULTAD	CIENCIAS AGRACIAS Y DEL AMBIENTE		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA AMBIENTAL		
DIRECTOR	RAULITH BRITO GARCÍA		
TÍTULO DE LA TESIS	PREDICCIÓN Y VALORACIÓN DE LOS IMPACTOS GENERADOS POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS DEL MUNICIPIO DE A CALERA – CUNDINAMARCA AL RIO TEUSACÁ IMPLEMENTANDO MODELOS DE CALIDAD DE AGUAS		
RESUMEN			
(70 palabras aproximadamente)			
<p>SE EVALUÓ LA CAPACIDAD DEL RIO TEUSACA DE ASIMILAR LOS CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO LA CALERA- CUNDINAMARCA IMPLEMENTANDO EL MODELO DE CALIDAD DE AGUAS QUAL2KW EL CUAL NOS PERMITE PREDECIR LOS IMPACTOS QUE ESTE VERTIMIENTO GENERA EN LAS DIFERENTES CONDICIONES QUE EL RIO PRESENTA CON EL OBJETIVO DE MIRAR SI EL RIO TEUSACA CUMPLE CON LOS OBJETIVOS DE CALIDAD ESTABLECIDO PARA LA CUENCA DEL RIO BOGOTÁ.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 112	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 1	CD-ROM: 1



PREDICCIÓN Y VALORACIÓN DE LOS IMPACTOS GENERADOS POR EL
VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS DEL MUNICIPIO DE A
CALERA – CUNDINAMARCA AL RIO TEUSACÁ IMPLEMENTANDO MODELOS DE
CALIDAD DE AGUAS

Autor:

WENDY PAOLA PÉREZ JIMÉNEZ

Cod. 161223

Director:

RAULITH BRITO GARCÍA

Hidrólogo

Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente

Ingeniería Ambiental

Ocaña, Colombia

Julio, 2020

Índice

Capítulo 1. Predicción y valoración de los impactos generados por el vertimiento de aguas residuales domesticas del municipio de La Calera – Cundinamarca al rio Teusacá implementando modelos de calidad del agua	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación	4
1.5. Delimitaciones	5
 Capítulo 2. Marco referencial	 7
2.1. Antecedente	7
2.2. Marco teórico	9
2.3. Marco histórico	55
2.4. Marco legal	60
2.4.1. Normatividad colombiana	60
2.4.2. Objetivos de calidad.	61
2.4.3. Resolución 631 de 2015.	62
 Capítulo 3 Diseño Metodológico	 65
3.1. Diseño metodológico de la investigación.....	65
3.2. Población... ..	65
3.3. Protocolo de modelación	65
 Capítulo 4. Presentación de resultados	 70
4.1. Realizar las caracterizaciones y análisis de la calidad del agua en el río Teusacá y en el vertimiento de aguas residuales del municipio de La Calera, implementando métodos de índices de calidad de aguas.....	70
4.1.1. Investigación preliminar.	70
4.1.2 Aforo líquido.	70
4.1.3. Cargas adicionales y usos del tramo	71
4.1.4. Características físicas del rio Teusacá.....	71
4.1.5. Modelo conceptual.....	72
4.1.6. Selección del código del modelo.	72
4.1.7. Descripción conceptual	73
4.1.8. Caracterización hidrológica.....	74

	iii
4.1.8.1. Estudio de caudales	74
4.1.8.2. Cálculo de caudal ambiental	75
4.1.9. Caracterización hidráulica y de transporte	77
4.1.9.1. Consideraciones De Mezcla.....	80
4.1.10. Calidad del Agua	82
4.1.10.1. Fuente Receptora.....	82
4.1.10.2. Vertimiento presuntivo.....	83
4.1.10.3. Resolución 0631 de 2015.....	85
4.1.10.4. Acuerdo 043 De 2016 Objetivos De Calidad.	87
4.1.10.5. Subcuenta del Río medio y bajo Teusacá.....	87
4.2. Ejecutar la modelación de calidad de aguas utilizando el software QUAL2Kw, teniendo en cuenta la hidrología, la hidráulica y climatología del área del proyecto	89
4.2.1. Modelación De Calidad De Agua.....	89
4.2.1.1. Implementación Del Modelo.	89
4.2.1.2. Discretización del modelo.	91
4.2.1.3. Anotaciones adicionales	92
4.2.2. Calibración Del Modelo.	92
4.2.2.1. Algoritmo de calibración.	92
4.2.2.2 Parámetros y rangos de calibración.....	93
4.3. Realizar los escenarios de simulación para las diferentes condiciones de cantidad y calidad de las aguas, del vertimiento de aguas residuales y de la fuente receptora	95
4.3.1. Condiciones De Escenarios De Calidad.....	95
4.3.2. Resultados Del Modelo De Calidad.	96
4.3.2.1. Escenario 1.....	96
4.3.2.2. Escenario 2.....	96
4.3.2.3 Escenario 3. Fase I	97
4.3.2.4. Escenario 4. Fase I	97
4.3.2.5. Escenario 5. Fase II	98
4.3.2.6. Escenario 6. Fase II	99
4.4. Comparar los resultados obtenidos de los diferentes escenarios simulados, con el fin de establecer las capacidades de asimilación de la fuente receptora en condiciones de caudales variables y los impactos que genera el vertimiento.	99
4.4.1. Comparación De Escenarios.....	99
4.5. Determinar si existen conflicto, entre los usos del agua, aguas abajo del vertimiento y la calidad establecida en los objetivos de calidad establecido en el acuerdo 46 del 2006.....	100
4.5.1. DBO	100
4.5.2. Sólidos suspendidos Totales	101
Conclusiones	102
Referencias.....	104

Lista De Tablas

Tabla 1 Variable de estado del modelo.....	18
Tabla 2 Parámetros en los que difieren la hoja "reach" del modelo QUAL2KW y QUAL2K.....	38
Tabla 3 factor precipita de la concentración de la DBO.....	58
Tabla 4 Factor percapita de concentraciones de los SST.....	59
Tabla 5. Normativa en Colombia a lo largo del tiempo que a regido la calidad del agua	60
Tabla 6 Parámetros permisibles de los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales ...	63
Tabla 7 Segmentación del modelo	73
Tabla 8. Coeficientes de las curvas de calibración.....	80
Tabla 9. Longitudes de Mezcla	82
Tabla 10. Parámetros de monitoreo de calidad del agua	83
Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos del presunto vertimiento	84
Tabla 12. Parámetros aguas residuales domesticas Resolución 0631 de 2015	86
Tabla 13. Parámetros Clase IV Acuerdo 043 de 2006.....	88
Tabla 14. Parámetros de monitoreo de calidad de agua.....	89
Tabla 15. Algoritmo de calibración.....	93

Lista De Figuras

Figura 1. Escala de valores para índice de ICOMO he ICOSUS	14
Figura 2. Cuadro de diálogo de Excel para configurar el nivel de seguridad de los macros	19
Figura 3. Cuadro de diálogo de seguridad para los macros	20
Figura 4. Hoja principal de trabajo para QUAL2Kw	20
Figura 5. Hoja de Trabajo “Headwater” para QUAL2Kw, donde se ingresan las condiciones límite para el sitio tomado como nacimiento del río.	24
Figura 6. Hoja de Trabajo “Headwater” para QUAL2K, donde se ingresan las condiciones límite para el sitio tomado como nacimiento del río.	26
Figura 7. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Primera Parte).	29
Figura 8. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Segunda Parte).	30
Figura 9. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Tercera Parte).	30
Figura 10. Hoja de Trabajo “Cloud Cover” como ejemplo de las hojas electrónicas relacionadas con meteorología	32
Figura 11. Hoja de Trabajo “Light and heat”	34
Figura 12. Hoja de Trabajo “Point sources”	35
Figura 13 Distribución horaria de temperatura para el efluente de planta de tratamiento de Boulder en Septiembre 21 y 22 de 1987.	35
Figura 14. Hoja de trabajo “Diffuse Sources	36
Figura 15 Hoja de trabajo “Rates”. En la columna se especifica la constante cinética de trabajo.	37
Figura 16. Corrida del modelo en Fortran	40
Figura 17 Hoja “Rates” resaltando los aspectos del algoritmo genético	46

Figura 18 Modos de cruzamiento un-punto, dos-puntos y uniforme en un algoritmo genético (AG) (Ng and Perera, 2003).....	49
Figura 19 Evolución de cada población.....	54
Figura 20 Población del municipio la calera a lo largo del tiempo	55
Figura 21 carga contaminante a lo largo del tiempo	58
Figura 22 Carga contaminante de los sólidos suspendidos totales	59
Figura 23 Valores de la Clase IV	62
Figura 24. Protocolo de Modelación	69
Figura 25. Localización Tramo de Modelación	71
Figura 26. Representación conceptual del tramo de estudio.....	74
Figura 27. Estaciones hidrológicas de la cuenca del río Teusacá	75
Figura 28. Caudales medios mensuales multianuales (m ³ /seg).....	75
Figura 29. CDC MEDIOS RIO TEUSACÁ	77
Figura 30. Caudales mínimos generados (m ³ /seg).....	77
Figura 31. Tramo de modelación río Teusacá.....	78
Figura 32. Curvas de calibración en la sección sitio de vertimiento	79
Figura 33. Resultados escenario 1.....	96
Figura 34. Resultados escenario 2.....	97
Figura 35. Resultado escenario 3 Fase I	97
Figura 36. Resultado escenario 4.	98
Figura 37. Resultados escenario 5 Fase II.....	98
Figura 38. Resultado Escenario 6 Fase II	99
Figura 39. Comparación DBOf	100
Figura 40. Comparación SST	101

Capítulo 1. Predicción y valoración de los impactos generados por el vertimiento de aguas residuales domesticas del municipio de La Calera – Cundinamarca al rio Teusacá implementando modelos de calidad del agua

1.1. Planteamiento del problema

A través de los años la población mundial se ha incrementado, tanto así que la curva de crecimiento es exponencial en el siglo XXI, por ende, se han incrementado la producción de residuos sólidos y líquidos, volviéndose este un problema para el medio ambiente y la salud.

Según la OEI A lo largo del siglo 20, la población mundial se ha más que cuadruplicado y sigue aumentando en unos 80 millones cada año, por lo que puede duplicarse de nuevo en pocas décadas. Es preciso por ello valorar el papel de esta explosión demográfica, junto al hiperconsumo de una quinta parte de la humanidad, en la actual situación de auténtica emergencia planetaria. (OEI, 2012)

A raíz de los problemas ambientales por la contaminación de las aguas residuales domesticas municipales la legislación colombiana se ve obliga a reglamentar los vertimientos de aguas servidas a las fuentes hídricas y así poder disminuir la contaminación en las aguas superficiales y proteger la salud pública.

La contaminación de las fuentes hídricas por consecuencia de vertimientos, impacta negativamente a las poblaciones aguas abajo que utilizan las fuentes como abastecimiento de

comunidades o para usos agrícola, el impacto es de tipo químico y biológico. Las personas que ingieren directamente o tienen algún contacto con estas aguas pueden sufrir enfermedades que le podrían causar la muerte. Uno de las más comunes de estas enfermedades es la enteritis que produce diarrea muy líquida con sangre, infecciones en el tronco urinario, meningitis neonatal, dolores de cabeza, enfermedades intestinales daños hepáticos fiebre tifoidea, toxoplasmosis y cólera en forma leve (tschernig, 2015).

La Calera, es un municipio que tiene 27,527 Habitantes este municipio aún no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales y sus vertimientos van directo al río Teusacá. El impacto sobre el río es inmediato, limitando las actividades que se practican en esta zona del país con vocación agrícola y turística. Es de destacar que este río sirve de abastecimiento a muchos pobladores aguas abajo antes de desembocar al río Bogotá

En la actualidad VIACON SAS se encuentra diseñando la planta de tratamiento de aguas residuales domestica del municipio, esta tiene como objetivo tratar las aguas residuales domesticas progresivamente y cumplir con la normatividad establecida en la legislación Colombiana, como son el Decreto 1076 de 2015, la Resolución 631 de 2015 y los Objetivos de Calidad de la Cuenca del Río Bogotá, establecidos por el Acuerdo 43 de 2006.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el impacto que produce la descarga de las aguas residuales domesticas del municipio La Calera al Río Teusacá?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general. Predecir y valorar los impactos generados por el vertimiento de aguas residuales domesticas del municipio de La Calera, al río Teusacá implementando el modelo de calidad de aguas Qual2Kw.

1.3.2. Objetivos específicos. Realizar las caracterizaciones y análisis de la calidad del agua en el río Teusacá y en el vertimiento de aguas residuales del municipio de La Calera, implementando métodos de índices de calidad de aguas.

Ejecutar la modelación de calidad de aguas utilizando el software QUAL2Kw, teniendo en cuenta la hidrología, la hidráulica y climatología del área del proyecto.

Realizar los escenarios de simulación para las diferentes condiciones de cantidad y calidad de las aguas, del vertimiento de aguas residuales y de la fuente receptora.

Comparar los resultados obtenidos de los diferentes escenarios simulados, con el fin de establecer las capacidades de asimilación de la fuente receptora en condiciones de caudales variables y los impactos que genera el vertimiento.

Determinar si existen conflicto, entre los usos del agua, aguas abajo del vertimiento y la calidad establecida en los objetivos de calidad establecido en el acuerdo 46 del 2006.

1.4. Justificación

Es fundamental que las aguas producidas por el casco urbano del municipio sean tratadas antes de ser vertidas algún cuerpo hídrico, y así evitar problemas en la salud pública y proteger el medio ambiente. Las aguas tratadas no solo evitan la contaminación de los ríos donde son dispuestas las aguas residuales, sino que también es fundamental para reúsos del recurso contemplados en la Normatividad Colombiana el cual busca el máximo aprovechamiento del recurso.

Según el decreto 1076 del 2015 por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiental y desarrollo sostenible en el artículo 2.2.3.3.5.3. En el inciso 4 y 5, indica que “para la obtención del permiso de un vertimiento se deben realizar estudios para la valoración y predicción de los efectos que tendrá este en la fuente receptora”, para el caso particular el vertimiento del municipio de La Calera es vertido al río Teusacá, importante afluente del río Bogotá y que surte a los pobladores aguas abajo para diferentes actividades. (decreto unico 1076 del 2015, 2015)

Por esta razón es fundamental para el municipio de La Calera realice los estudios pertinentes al vertimiento y al cuerpo de agua receptor, analizar la capacidad de asimilación de los contaminantes y proponer tratamientos que cumplan con los establecido en la normatividad, adicional a esto da una solución a la problemática ambiental que se está presentando en el municipio de La Calera

Por lo expuesto anteriormente se requiere de una caracterización para evaluar la calidad del vertimiento y determinar si cumple lo establecidos por la norma, de lo contrario las autoridades ambientales competente tomaran las medidas pertinentes para obligar al municipio que cumpla con lo establecido en la Resolución 631 de 2015, resolución en la que se establecen las concentraciones máximas permisibles para las diferentes actividades. Así mismo se debe evaluar y caracterizar la calidad del agua de la fuente receptora la cual está reglamentada por los Objetivos de Calidad establecidos en el Acuerdo 43 de 2006 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, en el cual se establecen los “Objetivos de Calidad del Río Bogotá” y de debe determinar la afectación de la fuente aplicando lo descrito en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente.

Según lo establecido en el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y demás normatividad Colombiana, es necesario que para la obtención del vertimiento del Municipio de La Calera, se caractericen las calidades de agua de la fuente receptora y del vertimiento, y que mediante modelos de simulación de calidad aguas de determinen las posibles afectaciones se produzcan por las aguas servidas, todo esto es indispensable para determinar el tipo de tratamiento que se requerirá.

1.5. Delimitaciones

Conceptual. La temática del proyecto se enmarcará en los siguientes conceptos: Normatividad Colombiana para la obtención de un permiso de vertimientos, modelos matemáticos de calidad de aguas, índices de calidad de agua, evaluaciones de calidad de

vertimiento según norma Colombiana, cumplimientos de objetivos de calidad, capacidad de asimilación y modelos hidráulicos

Operativa. El proyecto se desarrollará con la información base suministrada por la VIACON SAS, consultor que realiza el diseño de la PTARD (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas) del municipio de La Calera – Cundinamarca; se caracterizaran los resultados de laboratorios obtenidos del cuerpo receptor (Río Teusacá) y del vertimiento y se implementaran modelos hidráulicos y de calidad de aguas y se simularan escenarios de descarga de aguas residuales al cuerpo receptor.

Temporal. Para la ejecución del presente proyecto se emplearán cuatro (4) meses a partir desde la fecha de su aprobación.

Geográfica. La ejecución del proyecto se llevará a cabo en el municipio de La Calera ubicado en el occidente de la provincia del Guavio, a 18 km al nororiente de la capital del país, el río Teusacá, atraviesa el municipio de La Calera y al final de la cabecera municipal se descargan las aguas residuales.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1. Antecedente

La modelación de calidad de aguas es necesaria para la presentación de permisos de vertimientos ante las autoridades ambientales, en Colombia, recientemente las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) quienes prestan los servicios ambientales, cada vez más usan modelos matemáticos para predecir los efectos que pueden ocasionar los vertimientos en las fuentes superficiales de sus jurisdicciones, buscando con esto establecer metas u objetivos de calidad para los ríos. Conjuntamente el Ministerio de Ambiente y el IDEAM han planteado la utilización y estandarización de la información para presentar un modelo matemático de calidad y cada vez los usuarios como municipios, industrias y empresas utilizan modelos matemáticos de dominio público que han sido probados por las Corporaciones.

Una revisión detallada de los modelos de dominio público para la modelación de la calidad del agua en corrientes superficiales se puede encontrar en Kannel et al. (2010), Cox (2003) y, más recientemente, en Wang et al. (2013). De acuerdo con lo presentado por dichos autores, los modelos QUAL2K y WASP, ambos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), tienen los componentes necesarios para la modelación del caso de estudio. A diferencia del primero, WASP es más apropiado para la modelación de sustancias tóxicas; no obstante, presenta una desventaja importante que consiste en la dificultad de calibrarlo automáticamente dado que carece de un módulo para ello y no permite ser ejecutado en segundo plano (batch mode). Por otra parte, mientras la versión más reciente de QUAL2K de la USEPA,

desarrollado en el entorno Excel, no incluye explícitamente un módulo de autocalibración, mediante el uso de macros es posible hacer múltiples simulaciones en línea. No obstante, para este último software, también existe la posibilidad de utilizar una versión paralela desarrollada por el Departamento de Ecología del Estado de Washington, QUAL2Kw, la cual incorpora un algoritmo genético para la autocalibración del modelo. Esta entidad también ha desarrollado herramientas (plug-ins) complementarias como YASAIw, basada en Excel, para realizar simulaciones de Monte Carlo y facilitar el respectivo análisis de sensibilidad e incertidumbre. La versión más reciente del software QUAL2Kw es la 6.0, cuya principal diferencia con la versión 5.1 es que incluye la opción de la modelación dinámica de la calidad del agua. El análisis hidráulico de flujo no uniforme y no permanente, y la inclusión de zonas de almacenamiento temporal. Estas nuevas capacidades no son necesarias para este trabajo de modelación, puesto que se desarrolló un modelo en estado estable y se supone que la descarga de las aguas residuales tratadas es continua y constante en el tiempo, con el fin de considerar un efecto en condiciones de equilibrio sobre el cuerpo receptor.

En Colombia se viene utilizando el software QUAL2Kw hacía varios años en el 2013 se utilizó el modelo QUAL2Kw en el río Sinú, Colombia en el tramo central entre la central hidroeléctrica de Urra y la desembocadura al mar Caribe, usando el modelo QUAL2KW que incorpora el algoritmo genético PIKAIA, que permite la calibración de las constantes cinéticas. Específicamente, se presenta la metodología usada para la caracterización hidráulica. (Diana, Agustín, Francisco, & Dario, 2013)

Para el año 2015 (CARREÑO, 2015) la corporación autónoma regional de Quindío realiza una modelación de la calidad del agua del río azul en el tramo del municipio Pijao ubicado en el

departamento del Quindío donde se utiliza la aplicación del software QUAL2KW analizando los diferentes vertimiento que llegaban al río azul, donde se estableció una aproximación de la realidad que se presentaba y futura de los parámetros hidráulicos y de la calidad de las aguas. Durante los años 2013, 2014 y 2015 se han venido presentando estudios para la conservación de esta cuenca, para cuando se realizó la modelación por medio del software QUAL2KW se estableció que los diferentes vertimientos existentes en la zona no afectaba la calidad del agua, concluyendo que no era necesario el realizar proyectos de saneamiento en la zona de estudio.

En el 2017 la universidad universidad católica de Colombia (SONIA & LUZ, 2017) estudió la capacidad máxima de asimilación de contaminantes de la quebrada Chaguani por vertimientos de la estación de servicio ubicado en el departamento de Cundinamarca. Para el estudio de la calidad del agua de la quebrada Chaguani se utilizó el software QUAL2KW, se analizaron también las tasas de reacción, los parámetros meteorológicos y los caudales, además de analizar y verificar la calidad del agua se simularon escenarios donde aplicaron diferentes alternativas para el saneamiento de la quebrada, con el estudio realizado se llegó a la conclusión que el vertimiento que existía en la quebrada Chaguani no afectaba de manera grave al cuerpo de agua por consiguiente el agua utilizada para los cultivos en la zona no corrían con ningún riesgo de ser contaminados por estas aguas.

2.2. Marco teórico

El agua es el recurso más importante que tenemos los seres vivos ya que es nuestro suplemento para sostenernos y suplir nuestras necesidades básicas, también es necesario en todos los campos de acción para el hombre como: la producción de alimentos, en la salud, la industria,

el medio de transporte, entre otros; siendo un bien de consumo para la vida de todos los seres vivos y la sostenibilidad de los ecosistemas de la tierra.

Es indispensable mantener los afluentes que tenemos en condiciones en las que podamos utilizar el recurso sin perjudicar a la fuente ni el ecosistema presente. Conocer su diferente interacción y como este maneja los diferentes contaminantes que son vertidos constantemente en los diferentes afluentes que tenemos para que se pueda controlar dicha contaminación que se presenten en ellos.

Aguas residuales. Las aguas residuales son aquellas que sus propiedades naturales presentan alteraciones producto de la intervención que realiza el hombre, además la disposición de sus aguas requiere de algún tratamiento, antes de ser reusadas o vertidas a un cuerpo de agua natural. Existen diferentes clasificaciones de las aguas residuales de tipo: industrial, municipal y doméstico. En el caso de las aguas residuales domésticas estas se caracterizan por la presencia de residuos líquidos de origen residencial y comercial que suelen contener gran cantidad de materia orgánica.

Por otra parte, el inapropiado manejo de las aguas residuales de tipo doméstico representa la mayor fuente de contaminación para los cuerpos de agua, en el cual sus residuos domésticos son vertidos sobre las diferentes fuentes hídricas a través de un sistema de alcantarillado, o en otros casos son liberados directamente sobre los ríos sin ningún tipo de control o pre tratamiento, como lo dispone la ley

Contaminación por materia orgánica. Se presenta contaminación por materia orgánica después de haber sido vertidas las aguas residuales domésticas a un cuerpo de agua, donde por medio de procesos químicos en presencia de oxígeno en el agua se procede a la descomposición de los compuestos orgánicos, de tal forma que se puede presentar tóxica para los seres vivos.

Aplicación índice ICOMO en caño Grande 14

Este tipo de contaminación no se presenta únicamente por las aguas residuales domésticas, sino también de aguas residuales industriales, agrícolas y actividades que presentan manipulación de compuestos orgánicos.

Los compuestos orgánicos están básicamente desarrollados por composiciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, en algunas situaciones se presenta el nitrógeno, azufre, calcio, magnesio, fósforo, hierro, entre otros

“Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son:

- Proteínas (40-60%)
- Hidratos de carbono (25-50%)
- Grasas y aceites (10%)” (García & López, 1985).

Índice de calidad (ica). Internacionalmente es ampliamente utilizado el índice de calidad (ICA), su aplicación permite establecer el estado actual en condiciones de calidad que un recurso hídrico presenta, esta valoración se hace por medio de la integración de varios parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, para cada caso en especial.

El ICA se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes ecuaciones matemáticas; finalmente valora por medio de la expresión numérica entre 0 y 1, o 0 y 100, el grado de calidad que presenta un afluente, registrando el indicador de calidad de manera fácil y ágil

Índices de contaminación (ICO). Ramírez y Viña (1997), desarrollaron índices de contaminación (ICO) que son ampliamente utilizados a nivel nacional y regional en Colombia, actualmente existen nueve ICO entre los cuales se destacan el ICO por materia orgánica (ICOMO), por mineralización (ICOMI), por sólidos (ICOSUS) y contaminación trófica (ICOTRO). Los diferentes índices de contaminación abarcan una problemática específica para cada caso de estudio.

Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO). Para evaluar la contaminación por materia orgánica de un afluente mediante la aplicación del ICOMO, se requieren de dos parámetros físico-químicos y un microbiológico, que abarcan este tipo de contaminación, los cuales son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), porcentaje de saturación del Oxígeno Disuelto y Coliformes Totales, que en conjunto evidencian la contaminación orgánica (Valverde & Edison, 2015).

La fórmula general para el cálculo es:

$$ICOMO = \frac{1}{3} [I_{DBO5} + I_{Coliformes\ Totales} + I_{\% \text{ Oxígeno}}]$$

Las siguientes condiciones se tendrán en cuenta para cada parámetro de ser su caso:

Para el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno:

- $DBO_5 > 30 \text{ mg/L}$ tendrá un valor de $IDBO_5 = 1$
- $DBO_5 < 2 \text{ mg/L}$ tendrá un valor de $IDBO_5 = 0$

Para los Coliformes Totales:

- Coliformes Totales $> 20000 \text{ NMP/100ml}$ tendrá un valor de I Coliformes Totales = 1
- Coliformes Totales $< 500 \text{ NMP/100ml}$ tendrá un valor de I Coliformes Totales = 0

Por último el % de saturación del Oxígeno Disuelto:

- % Oxígeno $> 100\%$ tendrán un valor de 0

En el caso que no se cumplan las condiciones expresadas anteriormente, se realizaran los cálculos para cada parámetro individualmente como se presenta a continuación:

$$IDBO_5 = -0.05 + 0.7 * \log_{10} DBO_5 \text{ (mg/l)}$$

$$I_{Coliformes} = -1.44 + 0.56 * \log_{10} \left(\frac{Coliformes \text{ Totales}}{100} \right)$$

$$I_{\% \text{ Oxígeno}} = 1 - 0.01 * \% \text{ Oxígeno}$$

Con el resultado final entre la sumatoria de los tres parámetros, se obtiene un valor entre los rangos de 1 y 0, indicando de forma cualitativa el grado de contaminación donde para cada rango se clasifica por medio de colores, el azul indica calidad Muy buena, verde calidad Buena, amarillo calidad Media, naranja calidad Mala y por último rojo calidad Pésima (DÁVILA, 2018)

Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO). Este índice trabaja con la concentración de sólidos suspendidos que se definen como partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución (Sebastián & Arias)

$$\text{ICOSUS} = -0.02 + 0.003 * \text{sólidos suspendidos (mg/L)}$$

Sólidos Suspendidos > a 340 / tiene un ICOSUS = 1

Sólidos Suspendidos < 10 / tiene un ICOSUS = 0

Escala de valores para ICOMO	Grado de contaminación	
	RANGO	Concentración
0-0.2	Muy baja	Muy buena
>0.2-0.4	Baja	Buena
>0.4-0.6	Media	Media
>0.6-0.8	Alta	Mala
>0.8-1.0	Muy alta	Pésima

Figura 1. Escala de valores para índice de ICOMO he ICOSUS

Nota: *Rango de valores para cada una de las concentraciones e indicadores que miden el grado de contaminación para el ICOMO. Adoptado de "CORMACARENA, 2010", por Aguilar S & Solano G, 2018.

Descripción general del QUAL2Kw V5.1. El software de modelación QUAL2Kw es una versión moderna del programa Qual2E (Brown y Barnwell, 1985). La versión 5.1 de QUAL2Kw corresponde a un modelo unidimensional de flujo uniforme y permanente que permite el cálculo dinámico de la calidad del agua a nivel diario (con intervalos de 1 hora) y está programado en el entorno Microsoft Excel. Está bien documentado y se puede obtener de forma gratuita (Department of Ecology state of washintong , 2014).

QUAL2Kw permite utilizar tramos de diferentes tamaños, introducir múltiples cargas y abstracciones en cada uno y utilizar dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico disuelto; estas formas son la lentamente oxidable (DBO lenta) y la rápidamente oxidable (DBO rápida). Adicionalmente, la materia orgánica particulada inerte (detritos) también es simulada.

El modelo es apropiado para la simulación de condiciones anóxicas o anaerobias, ya que inhibe las reacciones de oxidación para niveles bajos o nulos de oxígeno disuelto. Además, la desnitrificación es modelada como una reacción de primer orden que incrementa su efecto a bajas concentraciones de oxígeno. El programa de modelación calcula endógenamente los procesos en la interface sedimento-agua y en la zona hiporreica (esta última opcional), aunque permite que los primeros sean prescritos. El modelo simula explícitamente las algas de fondo (aparte del fitoplancton), las cuales pueden representar la presencia de perifiton y/o macrófitas. La extinción de luz en la columna de agua es calculada en función de las algas, los detritos y los sólidos inorgánicos. La alcalinidad, el carbono inorgánico total y el pH en el cuerpo de agua también son simulados. Los patógenos genéricos son simulados en función de la temperatura, la luz y sedimentación. El software incluye un algoritmo genético para la calibración automática de los parámetros del modelo (constantes y tasas de transformación). La documentación y teoría completas para QUAL2Kw está disponible en Pelletier y Chapra (2008).

Los datos de entrada incluyen: localización, fecha, opciones de control para la integración numérica de las ecuaciones de balance de masa, caudal y concentraciones en la condición de frontera aguas arriba (cabecera), condiciones de frontera de caudal y concentración para las fuentes puntuales y difusas de contaminación, longitudes de los segmentos y tramos, elevaciones,

geometría e hidráulica (curvas de calibración de profundidad y velocidad, o los parámetros para resolver la ecuación de Manning considerando flujo uniforme y sección trapezoidal), temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, cobertura de nubes, sombra, parámetros para el modelo de atenuación de luz en la columna de agua, opciones para los modelos de radiación solar, evaporación y radiación de onda larga, valores de los parámetros (constantes y tasas de transformación) que gobiernan la calidad del agua, los parámetros de control del algoritmo genético para la calibración automática opcional de las constantes y tasas de transformación de la calidad del agua.

Suposiciones y simplificaciones realizadas en el modelo. Para la implementación de QUAL2Kw en modo de estado estable es necesario hacer las siguientes suposiciones básicas:

- Flujo permanente.
- Descarga de aguas residuales continua y constante en el tiempo.
- No hay variación de concentración en la transversal y en la profundidad. Se supone que el cuerpo receptor está completamente mezclado.
- El efecto de la dispersión longitudinal es despreciable (Rutherford, 1994).

Adicionalmente:

- No se simula la transferencia de masa entre el agua de poros de la zona hiporreica y la columna de agua, así como la transformación de la calidad del agua en la primera.
- No se tiene en cuenta el efecto de las algas de fondo (perifiton y macrófitas). Solo se simula el efecto del fitoplancton.
- Se permite el cálculo endógeno de la demanda béntica y demás flujos en la interface sedimento-agua.

- Se simula el cambio de alcalinidad debido al cambio de nutrientes.
- Las sustancias tóxicas orgánicas y los metales pesados se modelaron como sustancias conservativas, por lo cual solo fue necesaria la realización de balances de masa:

$$c = \frac{Q_v c_v + Q_o c_o}{Q_v + Q_o}$$

Introducción y salida de información de calidad de agua. Siendo c la concentración aguas abajo a la salida de la zona de mezcla, Q_v el caudal de concentración en el vertimiento y c_o la concentración sobre la corriente aguas arriba del vertimiento. Vertimiento, Q_o el caudal sobre la corriente receptora aguas arriba del vertimiento, c_v la

Inicialmente para poder utilizar el modelo se debe saber que este no es un programa adicional que requiera instalación. Este como se mencionó en la introducción del capítulo funciona bajo Microsoft Excel, pero su entorno de programación fue desarrollado en plataforma de Visual Basic o en Fortran, por tanto una vez descargado el archivo en formato comprimido de la aplicación se deben seguir de manera general las siguientes recomendaciones para poder usarlo en cualquier modelación de calidad del agua de una corriente superficial. A continuación se describe el proceso general para utilización de QUAL2Kw, que es muy similar para QUAL2K, en aquellas partes donde haya cierta diferencia se realizará el comentario respectivo.

Tabla 1*Variable de estado del modelo*

Variable	Símbolo	Unidades
Conductividad	s	μohms
Sólidos Suspendidos Inorgánicos	m_i	mgD/l
Oxígeno Disuelto	O	mgO_2/l
DBOC lenta	c_s	mgO_2/l
DBOC rápida	c_f	mgO_2/l
Nitrógeno Orgánico	n_o	$\mu\text{gN/l}$
Amonio	n_a	$\mu\text{gN/l}$
Nitrato	n_n	$\mu\text{gN/l}$
Fósforo Orgánico	p_o	$\mu\text{gP/l}$
Fósforo Inorgánico	p_i	$\mu\text{gP/l}$
Fitoplancton	a_p	$\mu\text{gA/l}$
Detrito o Material Orgánico Particulado	m_o	mgD/l
Patógenos	X	$\text{Ufc}/100 \text{ ml}$
Alcalinidad	Alk	mgCaCO_3/l
Carbono Inorgánico Total	c_r	Mole/L
Crecimiento de algas	a_b, a_h	gD/m^2
Crecimiento de algas nitrogenadas	IN_b	mgN/m^2
Crecimiento de algas Fosforosas	IP_b	mgN/m^2

Fuente: Adaptado de QUAL2K. Documentation (Versión 2.04). Pág. 31

El archivo en formato comprimido está compuesto por un archivo de Excel denominado qual2kw51b37 y el ejecutable qual2kw5. Adicionalmente existe otro archivo de Excel denominado xQUAL2Kw51b37, esta hoja electrónica Una vez descargado (es una versión modificada de la inicialmente señalada, en ella se presenta una calibración múltiple, especialmente recomendada para cuando se quiera hacer calibración de un río en época seca y época húmeda; también se entregan los manuales teóricos y de entrada de la información, un artículo de los autores del programa y un archivo denominado BC092187.q2k qu sirve como ejemplo para una corrida inicial del modelo.

Inicialmente se copia la carpeta del modelo QUAL2Kw en la unidad de disco del computador, dentro de la carpeta de trabajo deben estar los archivos QUAL2Kw51b37.xls y QUAL2Kw5.exe. Ambos archivos deben estar juntos en la misma carpeta de trabajo para que la versión de Fortran Ejecutable corra. Sepueden dar a las copias del archivo .xls cualquier nombre. Pero el archivo QUAL2Kw5.exe no puede ser renombrado, si se quiere correr la versión de Fortran ejecutable del archivo .xls.

Abra Excel y compruebe que el nivel de seguridad de las macros este en el nivel medio. Esto puede ser hecho usando las órdenes de menú: herramientas _ Macro _ Seguridad. Para correr el modelo el nivel medio de seguridad debe ser seleccionado.

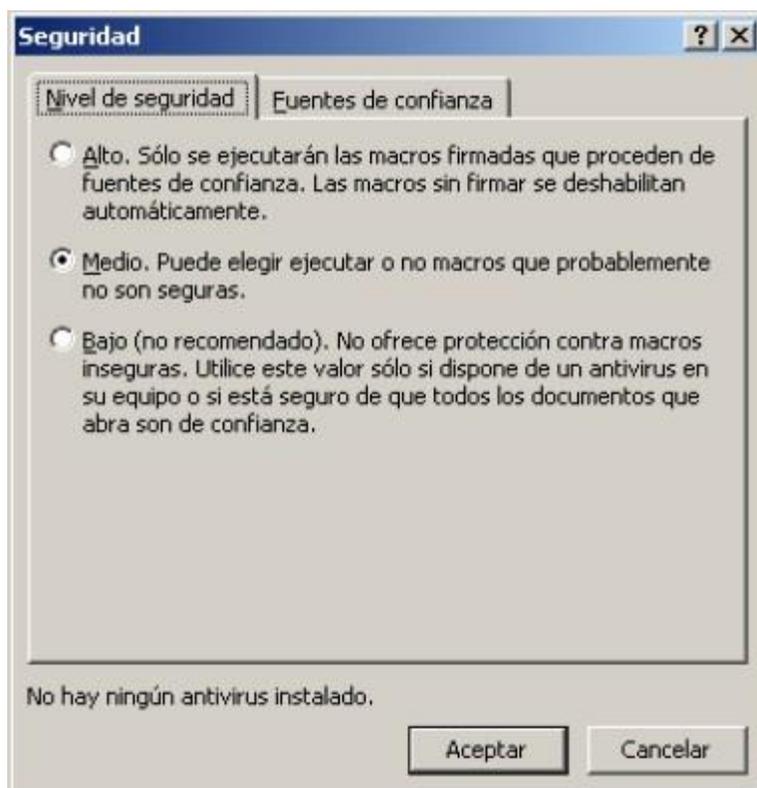


Figura 2. Cuadro de diálogo de Excel para configurar el nivel de seguridad de los macros.

Cuando abra el archivo QUAL2Kw51b37.xls se debe desplegar el cuadro de dialogo de seguridad para la macro, si se seleccionó el nivel de seguridad media indicado en el párrafo anterior. Dentro de este cuadro de diálogo debe seleccionarse la opción “Habilitar macros”.



Figura 3. Cuadro de diálogo de seguridad para los macros.

Seguidamente se abre la hoja de trabajo principal de QUAL2Kw la cual es análoga a la de Qual2K.

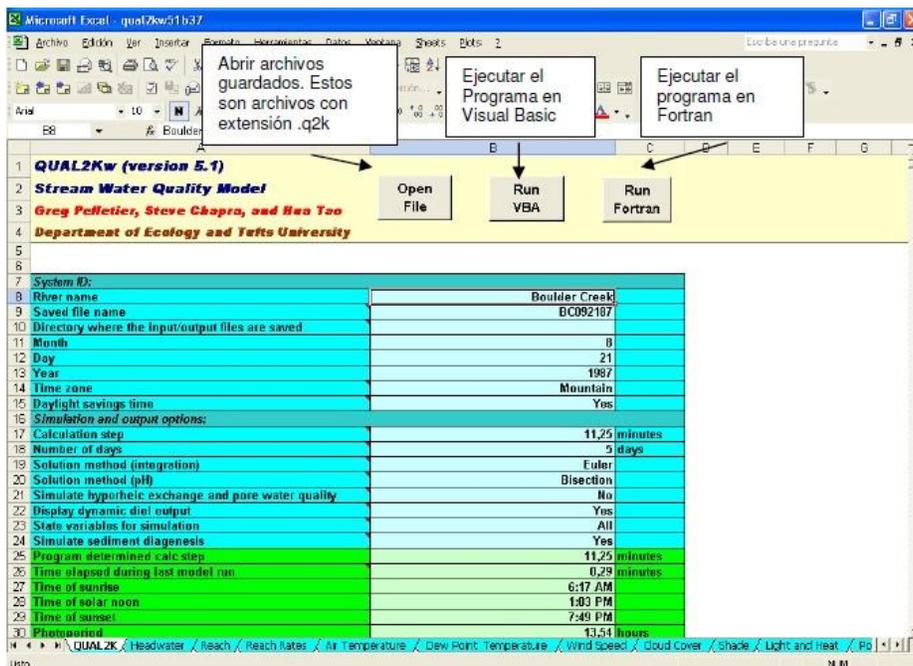


Figura 4. Hoja principal de trabajo para QUAL2Kw

La diferencia entre las hojas principales de QUAL2Kw que contiene mayor información de entrada, y QUAL2K está básicamente en los siguientes aspectos:

En la casilla “Calculation step” en QUAL2K debe ser introducida en horas, mientras en QUAL2Kw este parámetro debe ser introducido en minutos.

En QUAL2Kw se incluye la casilla “Simulate hyperheic exchange and pore water quality” mientras en QUAL2K esta casilla no existe. Dentro del programa se despliega la explicación de porqué escoger cada una de las selecciones.

En QUAL2Kw el usuario puede escoger si desea modelar todas variables de estado o simplemente simular las variables hidraulicas y la temperatura, esto se encuentra dentro de la casilla “State variables for simulation”, esta opción no está disponible en QUAL2K.

Dentro de QUAL2Kw en esta hoja se enceuntra la casilla “Simulate sediment diagenesis” mientras que dentro de QUAL2K esta opción está disponible pero en la hoja denominada “Heat Transfers”.

El programa QUA12K solo puede ser corrido en Fortran, el botón de comando para ejecutar el programa en VBA fueron suprimidos en esta y en las hojas consecutivas del programa.

Los colores usados en 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.

Tomando lo anterior lo más importante para esta primera hoja como información de entrada esta en definir la identificación del sistema y el procedimiento de cálculo.

Para la identificación del sistema se tendrá:

- Celda B8: Nombre del Río.
- Celda B9: Nombre del archivo
- Celda B10: Directorio donde serán guardados los datos de entrada y salida del modelo.
- Celda B11, B12, B13: Mes, Día y año respectivamente.
- Celda B14: Zona Horaria; estas corresponden a los Estados Unidos, para el caso que el programa sea usado en Colombia puede usarse la zona horaria “eastern” que corresponde a la hora GTM-5 de referencia para el país.
- Celda B15: Especifica si se cambia la hora de acuerdo a la estación del año. Para el caso de Colombia debe fijarse en “No”.

Para el procedimiento de cálculo se tendrá:

- Celda B17: Se especifica el tiempo que se usará para la integración numérica.
- Celda B18: Se especifica el total de días que se realizará la modelación. Este debe ser mínimo de dos.
- Celda B19: Define el método de integración numérica que se pretenda utilizar.
- Celda B20: Se define el método para solucionar el pH, este corresponde a un método numérico para encontrar raíces de un polinomio.
- Celda B21: Indica se quiere modelara la interacción entre la columna de agua y la zona hiporreica y el nivel deseado. Dentro del programa se especifica claramente que se quiere con cada uno de los niveles seleccionados.
- Celda B22: Dentro del programa se explica que se puede hacer con las opciones seleccionadas.
- Celda B23: Identifica si se quiere dibujar todas las variables o solo la temperatura.
- Celda B24: En ella se especifica un proceso específico de cálculo. Es importante determinar si la información con que se cuenta sirve para utilizar esta opción.

Para las variables de salida dentro de esta hoja se obtiene lo siguiente:

- Celda B25: Identifica el paso de cálculo con que se desarrolla el modelo.
- Celda B26: Tiempo total que gasta el programa en desarrollar el último modelo corrido. Esta casilla se actualiza cada vez que se hace una corrida sobre el programa.
- Celda B27: Esta se modifica de acuerdo a la zona horaria seleccionada, indica la hora a la cual sale el sol por las mañana.
- Celda B28: Esta se modifica de acuerdo a la zona horaria seleccionada, indica la hora a la cual se encuentra el medio día.

- Celda B29: Esta se modifica de acuerdo a la zona horaria seleccionada, indica la hora a la cual se oculta el sol por las tardes.
- Celda B30: Indica el foto período para las algas, es decir la cantidad de horas en las cuales el sol está en el día.

En la segunda hoja de trabajo “Headwater”, se ingresa las condiciones límites para la calidad del agua y el flujo en la cabecera del río (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5**).

Headwater Flow		0.713 m3/s											
Prescribed downstream boundary?		No											
Headwater Water Quality		Units	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM
Temperature	C		14.88	14.04	13.29	12.69	12.26	12.05	12.07	12.31	12.75	13.38	
Conductivity	umhos		276.42	277.23	279.22	282.26	286.14	290.60	295.33	300.02	304.33	307.98	311.87
Inorganic Solids	mgDL		11.94	12.13	12.07	11.78	11.27	10.58	9.76	8.86	7.94	7.06	
Dissolved Oxygen	mg/L		6.98	6.98	7.08	7.25	7.49	7.79	8.12	8.46	8.79	9.09	
CBODslow	mgO2/L		1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	
CBODfast	mgO2/L		1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	
Organic Nitrogen	ugN/L		1681.00	1689.27	1695.73	1677.01	1693.33	1613.59	1636.40	1680.21	1683.40	1704.36	1721.00
NH4-Nitrogen	ugN/L		87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59	
NO3-Nitrogen	ugN/L		165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56	
Organic Phosphorus	ugP/L		18.15	25.31	33.43	41.96	50.32	57.93	64.29	68.95	71.60	72.05	
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L		73.46	69.42	64.07	57.80	51.01	44.18	37.78	32.23	27.92	25.14	
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)	mgDL		1.29	1.43	1.54	1.61	1.65	1.63	1.58	1.48	1.36	1.21	
Pathogen	cfu/100 mL		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Generic constituent	user defined		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Alkalinity	mgCaCO3/L		90.91	91.18	91.93	93.09	94.60	96.35	98.22	100.09	101.82	103.30	
pH	s.u.		7.33	7.21	7.13	7.10	7.12	7.19	7.30	7.44	7.61	7.80	
Downstream Boundary Water Quality (optio		Units	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM
Temperature	C												
Conductivity	umhos												
Inorganic Solids	mgDL												
Dissolved Oxygen	mg/L												
CBODslow	mgO2/L												
CBODfast	mgO2/L												
Organic Nitrogen	ugN/L												
NH4-Nitrogen	ugN/L												
NO3-Nitrogen	ugN/L												
Organic Phosphorus	ugP/L												
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L												
Phytoplankton	ugA/L												

Figura 5. Hoja de Trabajo “Headwater” para QUAL2Kw, donde se ingresan las condiciones límite para el sitio tomado como nacimiento del río.

Aquí se encuentra otra diferencia entre QUAL2K Y QUAL2Kw. QUAL2Kw solo permite ingresar una sola cabecera o nacimiento, mientras en QUAL2K se permite ingresar hasta veinte nacimientos diferentes e integrar un sistema completo de corrientes superficiales como el que

aparece en la Figura 4. Complementariamente se pueden describir los siguientes aspectos que diferencian la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

ID	Number of Headwaters	Headwater Name	Flow	Elevation	Weir		Rating Curves						Manning Form				
					Rate	Height	Width	adam	bdam	Velocity	Depth	Channel Slope	Manning n	Bot Width	Stg		
No. 1			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent					
	1	Headwater	0.017											0.0253	0.0160	2.45	1.0
		Headwater Water Quality	Units	#####	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	#####	#####	#####	1:00 AM
		Temperature	C	9.90													
		Conductivity	umhos	0.00													
		Inorganic Solids	mgD/L	7.00													
		Dissolved Oxygen	mg/L	7.80													
		CBODslow	mgO ₂ /L	69.00													
		CBODfast	mgO ₂ /L	2.00													
		Organic Nitrogen	ugN/L	0.00													
		NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	0.00													
		NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	0.00													
		Organic Phosphorus	ugP/L	0.00													
		Inorganic Phosphorus (SI)	ugP/L	0.00													
		Phytoplankton	ugA/L	0.00													
		Detritus (POM)	mgD/L	0.00													
		Pathogen	cfu/100 mL	0.00													
		Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	0.00													
		pH	s.u.	5.52													
No. 2		Headwater Name	Flow	Elevation	Weir		Rating Curves						Manning Form				
			Rate	Height	Width	adam	bdam	Velocity	Depth	Channel Slope	Manning n	Bot Width	Stg				
			(m ³ /s)	(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent						
		Headwater Water Quality	Units	#####	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	#####	#####	#####	1:00 AM
		Temperature	C														
		Conductivity	umhos														
		Inorganic Solids	mgD/L														
		Dissolved Oxygen	mg/L														
		CBODslow	mgO ₂ /L														
		CBODfast	mgO ₂ /L														
		Organic Nitrogen	ugN/L														
		NH ₄ -Nitrogen	ugN/L														
		NO ₃ -Nitrogen	ugN/L														
		Organic Phosphorus	ugP/L														

Figura 6. Hoja de Trabajo “Headwater” para QUAL2K, donde se ingresan las condiciones límite para el sitio tomado como nacimiento del río.

En la hoja “Headwater” para QUAL2K debe ingresarse las características hidráulicas para cada una de las cabeceras; en la misma hoja para QUAL2Kw no se debe ingresar esta información, en este se ingresa dentro de la hoja denominada “Reach” para la única cabecera que se puede trabajar.

En la celda C7 para la hoja de QUAL2K, se debe ingresar el total de cabeceras o nacimientos que se van a utilizar, lo que en definitiva permitirá conocer el total de corrientes que se van a modelar de manera integrada. A partir de la fila 29 para la hoja de QUAL2K se especifican las cabeceras adicionales, el modelo permite integrar hasta un máximo de 20. Es

importante que a cada cabecera se le asigne un número y una identificación teniendo en cuenta la segmentación que hace el modelo y que se muestra en la Figura 7.

En ambos casos se puede seleccionar si la calidad de agua de la corriente aguas abajo del tramo modelado tiene un efecto sobre la modelación y dichos parámetros pueden ser ingresados, pero en el modelo QUAL2Kw esto puede seleccionarse en la celda B8, y los parámetros respectivos de calidad pueden ser ingresados a partir de la fila 29. En cambio en el modelo de QUAL2K esta información corresponde a una hoja electrónica adicional, que se llena de forma análoga a la del modelo QUAL2Kw. Ahora en las cosas en que ambos entornos coinciden para la hoja “Headwater” se pueden realizar las siguientes observaciones:

Dentro de los parámetros de calidad del agua se deben ingresar de forma horaria por espacio de 24 horas. En el modelo QUAL2Kw se encuentra una casilla adicional para ingresar el “Generic Constituent”, que por sugerencia de los autores puede corresponder a la Demanda química de Oxígeno (DQO), o puede ser ingresado cualquier otro parámetro de calidad del agua. Si no se dispone de información horaria, se puede ingresar el promedio diario en la primera columna y el software automáticamente rellenara las otras casillas.

Para mayores detalles de que es cada parámetro de calidad de agua necesario para introducir, el manual de ingreso de la información detalla algunos aspectos de forma más profunda.

En la tercera hoja de trabajo denominada “reach” se alimenta la información relacionada de cada uno de los tramos en los que se segmenta la corriente (nombre, elevación, latitud, longitud y

coeficiente de dispersión). Adicionalmente, se eligen el modelo hidráulico con el que se determina la velocidad y la profundidad en cada tramo (Chapra y Pelletier, 2004), y también se puede elegir un segmento del río que se quiera modelar de forma independiente (celda B6 para ambos modelos)

La primera parte de la hoja de trabajo “Reach” es usada para especificar distancias, tramos y elevaciones, y las coordenadas geográficas. En QUAL2Kw se ingresan para el abscisado, y coordenadas geográficas los valores aguas abajo de cada segmento en la columna G, J, K, L, M, y N respectivamente. Para el caso de la hoja de QUAL2K se debe ingresar el abscisado aguas arriba y aguas abajo para cada segmento, esto se hace en las columnas H e I, para este las coordenadas geográficas se ingresan al igual que el anterior solo para aguas abajo pero en las columnas M, N, O, P, Q y R. En la hoja de QUAL2K en la columna J se especifica el número de elementos en que se quiere dividir cada segmento del río.

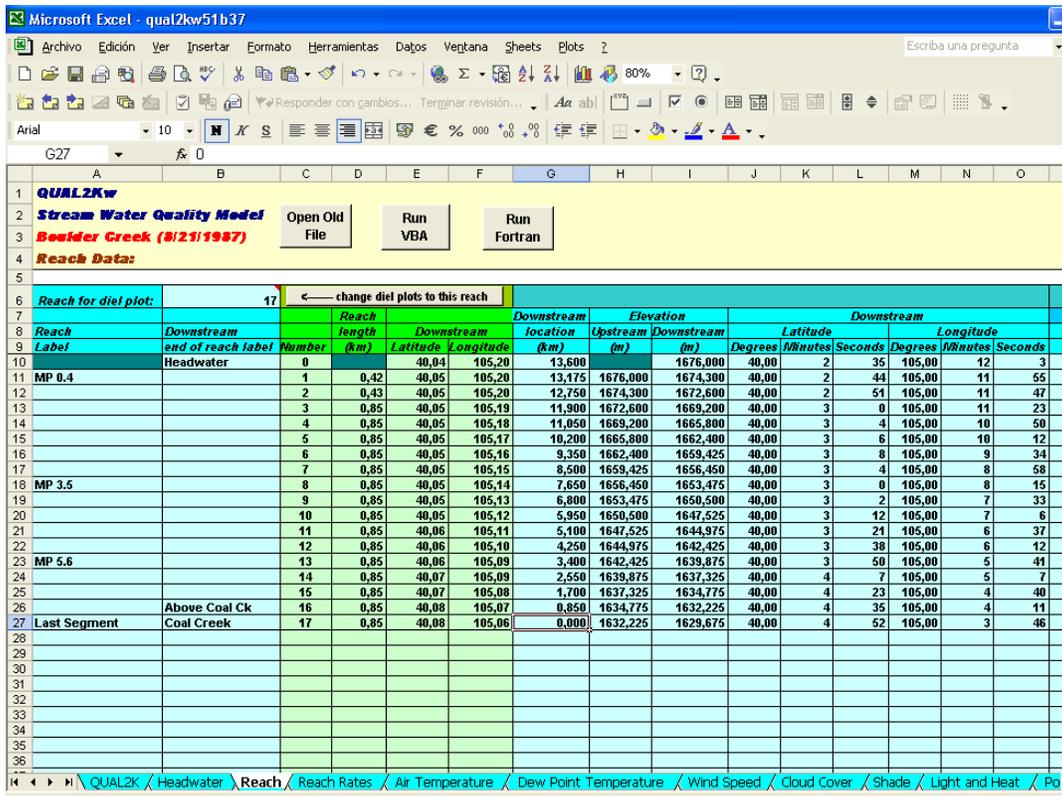


Figura 7. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Primera Parte).

Los programas QUAL2Kw y QUAL2K estima la velocidad media de flujo y la profundidad de la corriente utilizando uno de los siguientes métodos: curvas de potencia (Rating curves), estructuras de control (Weir) y ecuación de Manning (figura 8)

Hydraulic Model (Weir Overrides Rating Curves; Rating Curves Override Manning Formula)													
Seconds	Weir		Rating Curves				Manning Formula				Prescribed Dispersion m ² /s	Co	
	Height (m)	Width (m)	Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Channel Slope	Manning n	Bot Width m	Side Slope			Side Slope
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
11	55	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
12	47	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
13	23	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
14	50	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
15	12	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.004	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
16	34	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0035	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
17	58	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0035	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
18	15	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0035	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
19	33	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0035	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
20	6	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0035	0.0800	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
21	37	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
22	12	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
23	44	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
24	7	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
25	40	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
26	11	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
27	46	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.003	0.0700	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 8. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Segunda Parte).

En la última columna de la figura anterior está la columna AA correspondiente a “Prescribed dispersión” o coeficiente de dispersión que puede ser medido en campo para cada uno de los segmentos en que ha sido dividido el río.

Bottom Coverage	Bottom SOD	Prescribed SOD	Prescribed CH4 flux	Prescribed NH4 flux	Prescribed Inorg P flux	Sediment thermal cond	Sediment thermal diff	Sediment hyporheic zone thickness	Hyporheic exchange flow	Hyporheic sediment porosity
gO2/m2/d	gO2/m2/d	gO2/m2/d	mgNm2/d	mgP/m2/d	W/mdegC	cm ² /sec	cm	(fraction of stream flow)	(fraction of volume)	
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%
100%	100%	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	1.6	0.0064	10	5%	40%

Figura 9. Hoja de Trabajo “Reach” para QUAL2Kw. (Tercera Parte).

En la última parte de la hoja de trabajo de “Reach” para QUAL2Kw (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**14), se especifica los valores del porcentaje cubierto de algas y la demanda de oxígeno de los sedimentos en el fondo de cada tramo. Adicionalmente, se especifica los flujos de metano, amonio y fósforo en el fondo. Los valores de la conductividad térmica de los sedimentos, la difusividad térmica de los sedimentos y el espesor de la zona hiporreica vienen con valores recomendados por defecto. Para QUAL2K no se encuentra nada relacionado con la zona hiporreica.

La siguiente hoja se denomina “Reach rates” esta corresponde a valores de las constantes para los diferentes procesos que se modelan, aquí pueden ser introducidas por el usuario si son conocidas por este, o si este quiere tener control sobre las mismas.

Luego al modelo se le suministra la información meteorológica en las cinco hojas de trabajo siguientes. Para todas ellas se requiere información horaria de cada segmento, pero nuevamente se recuerda que si se tienen promedios diarios solo se ingresan los valores en la primera columna y el programa automáticamente rellenara el resto de columnas correspondientes

Upstream	Reach	Downstream	Reach	Upstream	Downstream	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM
Label	Label	Label	Number	Distance	Distance	Hourly cloud cover shade for each reach (Percent)				
				km	km	(Percent of sky that is covered by clouds. The input value)				
Headwater	MP 0.4		1	13,60	13,18	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			2	13,18	12,75	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			3	12,75	11,90	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			4	11,90	11,05	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			5	11,05	10,20	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			6	10,20	9,35	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			7	9,35	8,50	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
	MP 3.5		8	8,50	7,65	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			9	7,65	6,80	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			10	6,80	5,95	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			11	5,95	5,10	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			12	5,10	4,25	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
	MP 5.6		13	4,25	3,40	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			14	3,40	2,55	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
			15	2,55	1,70	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
		Above Coal Ck	16	1,70	0,85	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%
Above Coal Ck	Last Segment	Coal Creek	17	0,85	0,00	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%

Figura 10. Hoja de Trabajo “Cloud Cover” como ejemplo de las hojas electrónicas relacionadas con meteorología.

A continuación se explica de manera resumida la información necesaria de acuerdo a cada hoja electrónica en el respectivo orden en que estas aparecen en el programa:

Air Temperatur: Temperatura ambiental en grados centígrados.

Dew Point Temperatur: Temperatura del punto de rocío. La temperatura del punto de rocío es la temperatura a la cual el aire se satura, esto sucede cuando el aire se enfría a una presión y contenido de agua constante. Esta puede ser calculada de forma indirecta con la ayuda de la humedad relativa y la temperatura ambiental mediante una correlación que será mostrada en el capítulo siguiente y que fue utilizada para el desarrollo de este trabajo.

Wind Speed: Velocidad del viento. Esta debe ser ingresada en metros sobre segundo (m/s) a una altura de referencia de 7 metros. El modelo usa la velocidad del viento para estimar el efecto de la conducción-convección y evaporación en la interfase aire-agua. La conducción es la transferencia de calor entre capas adyacentes de materia que tienen diferentes temperaturas y la convección es la transferencia de calor debida al movimiento de un fluido. (Chapra, 2004).

Cloud Cover: Fracción del cielo cubierto por nubes. Este parámetro es ingresado de forma porcentual y representa dentro de un esquema razonable el porcentaje de nubes que cubre el cielo para cada segmento del río.

Shade: Radiación solar que es bloqueada por la vegetación, topografía o construcciones existentes. Debe ser ingresada de forma porcentual y representa la parte del segmento que no recibe radiación solar directa por ser bloqueada.

En la hoja de trabajo "Light and heat" se seleccionan los modelos y los coeficientes para determinar la radiación solar, la radiación atmosférica, la evaporación y conducción/evaporación, términos usados en el balance de calor de la corriente

QUAL2Kw
Stream Water Quality Model
Boulder Creek (8/21/1987)
Light Parameters and Surface Heat Transfer Models:

Parameter	Value	Unit	
Photosynthetically Available Radiation	0.47		
Background light extinction	0.2	/m	k_{cb}
Linear chlorophyll light extinction	0.0088	$1/m \cdot (\mu g/L)$	α_p
Nonlinear chlorophyll light extinction	0.054	$1/m \cdot (\mu g/L)^{1.75}$	α_{pn}
ISS light extinction	0.052	$1/m \cdot (mg/L)$	α_s
Detritus light extinction	0.174	$1/m \cdot (mg/L)$	α_d
Macrophyte light extinction	0.015	$1/m \cdot (gD/m^3)$	α_{mac}
Solar shortwave radiation model			
Atmospheric attenuation model for solar		Bras	
<i>Bras solar parameter (used if Bras solar model is selected)</i>			
atmospheric turbidity coefficient (Z =clear, 5=smoggy, default=2)		3	$\#_{\beta c}$
<i>Ryan-Stolzenbach solar parameter (used if Ryan-Stolzenbach solar model is selected)</i>			
atmospheric transmission coefficient (0.70-0.91, default 0.8)		0.8	α_{zc}
Downwelling atmospheric longwave IR radiation			
atmospheric longwave emissivity model		Brunt	
Evaporation and air convection/conduction			
wind speed function for evaporation and air convection/conduction		Brady-Graves-Geyer	

Figura 11. Hoja de Trabajo “Light and heat”.

A continuación, se debe entrar información relacionada con la calidad del agua de las fuentes y abstracciones puntuales y no puntuales de la corriente principal, hojas de trabajo “Point Sources” y “Diffuse sources”, respectivamente. Una fuente puntual puede ser un vertimiento o una corriente natural tributaria. Para las abstracciones puntuales y no puntuales no es necesario especificar las características de calidad del agua. La hoja de trabajo “Point Sources” es usada para ingresar las fuentes y salidas puntuales. En el modelo QUAL2K se debe ingresar adicionalmente el “headwater” al cual corresponde. La hoja de trabajo “Diffuse sources” es usada para ingresar las fuentes y abstracciones no puntuales.

Name	Location (km)	Point Abstraction m3/s	Point Inflow m3/s	Temperature mean °C	Temperature range/2 °C	time of max	Specific Conductivity mean umhos	Specific Conductivity range/2 umhos
Boulder WWTP	13.60	0.0000	0.7500	20.06	0.72	5:13 PM	638.44	24.0
	10.20	0.0000	0.5900	15.00	0.00	3:00 PM	500.00	0.0
	6.60	1.9000	0.0000	0.00	0.00	12:00 AM	0.00	0.0

Figura 12. Hoja de Trabajo “Point sources”.

Algo importante a tener en cuenta para esta hoja, es que para cada parámetro de calidad se pide el valor promedio, el rango medio ($\text{range}/2$) y el tiempo o la hora a la cual se tiene el máximo valor (Time of max), cada uno de estos valores se ejemplifica en la Figura 13 donde se muestra la distribución para el efluente de una planta de tratamiento que puede descargar sobre una corriente superficial.

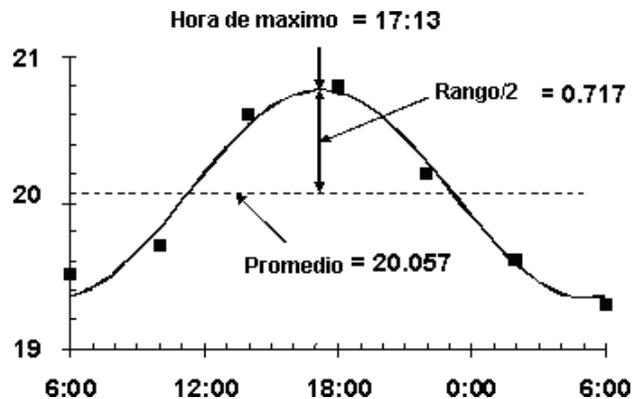


Figura 13 Distribución horaria de temperatura para el efluente de planta de tratamiento de Boulder en Septiembre 21 y 22 de 1987.

Fuente: Adaptado de QUAL2Kw- User Manual. Versión (5.01). Pág. 33

The screenshot shows an Excel window titled 'Microsoft Excel - qual2kw51b37'. The active worksheet is 'Diffuse Sources'. The title bar includes 'QUAL2Kw Stream Water Quality Model Boulder Creek (8/21/1987)'. Below the title are three buttons: 'Open File', 'Run VBA', and 'Run Fortran'. The main data area is a table with the following structure:

Name	Up (km)	Down (km)	Diffuse		Temp	Spec	Inorg	Diss	CBOD	CBOD	Organic	Ammon
			Abstraction	Inflow								
Groundwater	13,60	6,60	0,0000	0,2574	15,00	600,00	0,00	4,00	1,00	1,00	500,0	500,0
Groundwater	6,60	0,00	0,0000	0,2426	15,00	600,00	0,00	4,00	1,00	1,00	500,0	500,0

Figura 14. Hoja de trabajo “Diffuse Sources

Nótese en la figura 14 que para la hoja de trabajo “diffuse sources” no se entran parámetros de la distribución como para la hoja “point sources” en este caso se entran los promedios diarios o los valores medidos sobre la fuente difusa de contaminación.

En la hoja de trabajo “rates” se especifican los valores de los parámetros cinéticos y las velocidades de asentamiento de los diferentes constituyentes simulados por el modelo. Dentro de esta hoja se encuentra el algoritmo genético para calibración de las constantes cinéticas que no se hayan podido estimar o de las que no tengan valores de estudios anteriores y que sean susceptibles de variación; la aplicación de este algoritmo y las hojas relacionadas se discutirá en el siguiente numeral.

Microsoft Excel - qual2kw51b37

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana Sheets Plots ?

Escriba una pregunta

Anal 10 N K S

G3 =Fitness!A056

1 **QUAL2Kw**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Boulder Creek (81211987)**

4 **Global rate parameters**

5

6

7 **Parameter** **Value** **Units** **Symbol** **Auto-cal** **Min value** **Max value**

8 **Stoichiometry:**

9 Carbon 40 gC gC No 30 50

10 Nitrogen 7,2 gN gN No 3 9

11 Phosphorus 1 gP gP No 0,4 2

12 Dry weight 100 gD gD No 100 100

13 Chlorophyll 1 gA gA No 0,4 2

14 **Inorganic suspended solids:**

15 Settling velocity 0,00236 m/d v_i Yes 0 2

16 **Oxygen:**

17 Reaeration model Internal f(u h)

18 Temp correction 1,024 θ_z

19 Reaeration wind effect None

20 O2 for carbon oxidation 2,69 gO₂/gC r_{oc}

21 O2 for NH4 nitrification 4,57 gO₂/gN r_{on}

22 Oxygen inhib model CBOD oxidation Exponential

23 Oxygen inhib parameter CBOD oxidation 0,60 L/mgO₂ K_{sCBOD} No 0,60 0,60

24 Oxygen inhib model nitrification Exponential

25 Oxygen inhib parameter nitrification 0,60 L/mgO₂ K_{sNH4} No 0,60 0,60

26 Oxygen enhance model denitrification Exponential

27 Oxygen enhance parameter denitrification 0,60 L/mgO₂ K_{sden} No 0,60 0,60

16 Auto-calibration inputs

17 Auto-cal

18 Min value

19 Max value

20 Auto-calibration

21 Random number

22 Model runs

23 Generations

24 Digits to encode

25 Crossover rate

26 Crossover probability

27 Mutation rate

28 Initial mutation

29 Minimum number

30 Maximum number

31 Relative fitness

32 Reproduction

33 Elitism (0 or 1)

34 Restart from

16 Diffuse Sources Rates Fitness Auto-calibration warnings Hydraulics Data Temperature Data WQ Data WQ Data Min WQ Data Max Die

Figura 15 Hoja de trabajo “Rates”. En la columna se especifica la constante cinética de trabajo.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las variables adicionales que se pueden encontrar en la hoja “rates” para cualquiera de los dos modelos QUAL2Kw o QUAL2K. En la tercera columna se especifica en el modelo en que dicho parámetro se encuentra de forma adicional.

Tabla 2

Parámetros en los que difieren la hoja "reach" del modelo QUAL2KW y QUAL2K

Parámetro	Símbolo	Modelo en que se encuentra
User reaeration coefficient α	α	QUAL2K
User reaeration coefficient β	β	QUAL2K
User reaeration coefficient γ	γ	QUAL2K
Sed P oxygen attenuation half sat constant	k_{spi}	QUAL2K
Phytoplankton use HCO ₃ ⁻ as substrate	Ninguno	QUAL2Kw
Bottom algae use HCO ₃ ⁻ as substrate	Ninguno	QUAL2Kw
Nitrogen uptake water column fraction	$N_{UpWCfrac}$	QUAL2Kw
Phosphorus uptake water column fraction	$P_{UpWCfrac}$	QUAL2Kw
Fraction of dissolution to fast CBOD	F_f	QUAL2K
Todos los parámetros de "Hyporheic metabolism"	-	QUAL2Kw
Todos los parámetros de "Generic Constituent"	-	QUAL2Kw

Finalmente las hojas resaltadas en color amarillo (seis en total) se utilizan para introducir información medida en la corriente y que puede ser útil para la calibración del modelo, la información que debe ser ingresada para cada hoja se especifica a continuación:

Hoja "Hydraulic Data": Corresponde a los datos hidráulicos, como tiempo de viaje, profundidad, velocidad y caudal medido en un punto de la corriente del río y su abscisado debe estar dentro del abscisado propuesto en la hoja "reach" del modelo. La diferencia entre QUAL2K y QUAL2Kw es que en el primero adicional al abscisado debe introducirse el nombre del "headwater" o cabecera al cual pertenece dicho punto, esto con el fin de estimar la corriente a la cual pertenece dentro del modelo integrado, esta observación debe ser tomada en cuenta de aquí en adelante para todas las hojas de color amarillo.

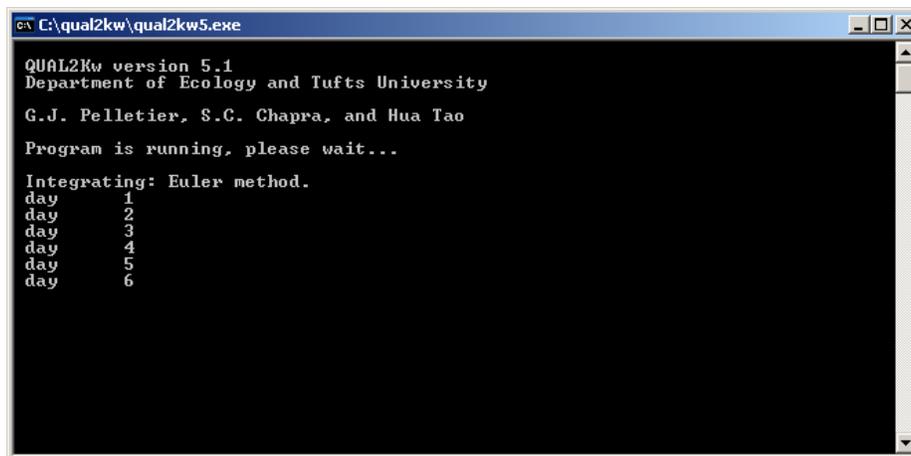
Hoja "Temperatura Data": Se debe introducir valores medios, máximos y mínimos de temperatura del agua medida en un punto determinado en grados centígrados.

Hoja “WQ Data” : Son los valores de calidad del agua medidos en la corriente de forma puntual o el valor medio de los datos medidos en un tiempo determinado.

Hoja “WQ Data Min” y hoja “WQ Data Max”: Respectivamente, corresponde a los mínimos y máximos observados para cada parámetro de calidad de agua medido sobre la corriente en un punto determinado.

Hoja “Diel Data” : Aquí se ingresan los datos de calidad del agua para el segmento del río que se modelara a nivel horario para un día, este debe corresponder con el seleccionado dentro de la hoja “reach”. Aquí se especifican datos de calidad del agua que son introducidos de forma análoga a los de la corriente principal modelada.

Hasta aquí corresponde a la información que debe ser ingresada en el modelo. Si este corre de forma correcta en Fortran aparecerá una imagen como la que se observa en la Figura 1-21 Si el modelo para QUAL2Kw es corrido en la versión de Visual Basic aparecerá solo al final un cuadro de diálogo indicando que el modelo ha corrido de forma satisfactoria. Cada vez que el modelo QUAL2K o QUAL2Kw es ejecutado, un archivo de datos es creado con el nombre del archivo especificado en la celda B9 de la hoja “QUAL2K” del QUAL2K y QUAL2KW Figura 1-9). El programa automáticamente fija la extensión .q2k al nombre del archivo. Siempre que se ejecute el modelo, el archivo será sobre escrito, hay que hacer cambios al nombre del archivo cuando se realice una nueva corrida. Este factor permite guardar las entradas para las simulaciones sin tener que guardar el .xls en cada corrida del modelo.



```

C:\qual2kw\qual2kw5.exe
QUAL2Kw version 5.1
Department of Ecology and Tufts University
G.J. Pelletier, S.C. Chapra, and Hua Tao
Program is running, please wait...
Integrating: Euler method.
day      1
day      2
day      3
day      4
day      5
day      6

```

Figura 16. Corrida del modelo en Fortran

De aquí en adelante en el desarrollo del numeral se explicará la información de salida, que se encuentra en las hojas de color verde y las gráficas de salida se encuentran en las hojas de color fucsia. Las hojas de color verde estas corresponden a los datos de salida del modelo de forma tabular y que se utilizan para realizar las gráficas. Estas hojas son:

Source Summary: En ella se presenta un resumen general de la información ingresada al modelo para todos los segmentos en que ha sido dividido el río así como las fuentes y/o salidas puntuales o distribuidas objeto de simulación ya en forma ordenada.

Hydraulic Summary: Se presentan todas las características hidráulicas para el modelo en cada uno de los segmentos, así como también la verificación si el coeficiente de reaireación es ingresado por el usuario o se calcula mediante alguna metodología seleccionada en la hoja “rates”, y si se tiene en cuenta los efectos de reaireación originados por el viento.

Temperatura Output: Corresponde a los valores medios, máximos y mínimos modelados para cada uno de los segmentos de río.

WQ Output, WQ Min, WQ Max : Respectivamente son los datos medios, mínimos y máximos modelados de los diferentes parámetros de calidad del agua para cada uno de los segmentos del río.

Sediment Fluxes: Se presentan los resultados de los flujos que existen entre algunas de las variables y los sedimentos. En el modelo QUAL2Kw de manera adicional se presentan los flujos con la zona hiporreica.

Diel Water Column (QUAL2Kw) ó Diel Output (QUAL2K) : En ella se presentan los resultados de forma horaria de acuerdo al paso de cálculo seleccionado para el segmento del río que ha sido seleccionado para modelar de forma independiente.

Plot Summary (Únicamente modelo QUAL2K): Resumen general de los segmentos modelados para cada una de las corrientes tenidas en cuenta para la modelación Integrada e identificación de cada una de ellas de acuerdo al nombre asignado para el “headwater” (cabecera).

Diel Hyporeic (Únicamente modelo QUAL2Kw): Todo lo relacionado con la zona hiporreica del segmento seleccionado en escala horaria de acuerdo al segmento de paso de calculo seleccionado.

Diel Fluxes (Únicamente modelo QUAL2Kw): Se presenta los resultados de todos los intercambios o flujos de cambio de diferentes procesos, térmicos, de oxígeno entre otros.

El modelo QUAL2Kw y QUAL2K despliega una serie de gráficas que como se mencionó anteriormente corresponde a las hojas de color fucsia para toda la corriente y a las hojas de color azul claro para las correspondientes al segmento seleccionado para ser modelado a nivel diario, a continuación se hace referencia a los parámetros que de manera general QUAL2K y QUAL2Kw muestran dentro de sus gráficas, pueden existir más gráficas sobre el modelo de QUAL2Kw principalmente, pero se puede considerar que de forma importante para aplicaciones las más importante serán:

- Graficas hidráulicas
- Tiempo de viaje
- Caudal
- Velocidad
- Profundidad
- Reaireación
- Graficas de las variables de estado
- Temperatura
- Conductividad
- Sólidos suspendidos inorgánicos
- Oxígeno disuelto
- Material orgánico particulado
- DBOC de oxidación lenta
- DBOC de oxidación rápida
- Nitrógeno orgánico disuelto
- Amonio
- Nitratos

- Fósforo orgánico disuelto
- Fósforo inorgánico
- Fitoplancton
- Algas en el fondo
- Alcalinidad
- pH
- Graficas de variables de estado adicionales
- DBOCU
- Nitrógeno y fósforo total
- Sólidos suspendidos totales

Estabilidad del modelo. Una de las condiciones principales que debe cumplir el modelo es la relacionada con la estabilidad del número de Courant. En un modelo de calidad del agua existe una relación entre la longitud del segmento (Δx) y el paso de cálculo para solución de las ecuaciones diferenciales (Δt). El programa QUAL2K realiza la siguiente comprobación:

$$\Delta t \cdot U_i \leq \frac{\Delta x}{2} \quad \text{que es equivalente a decir} \quad \frac{\Delta t \cdot U_i \cdot \Delta x}{\Delta x^2} < 1 \quad \text{ó} \quad C < 1$$

Donde:

Δt : Tamaño de paso para resolver las ecuaciones diferenciales.

Δx : Tamaño del segmento

U_i : Velocidad promedio del segmento.

C : Número de Courant.

Si la condición no se cumple en al menos uno de los segmentos del modelo el programa no se ejecuta ante lo cual se tiene que variar el paso de cálculo, razón por la cual no todos son iguales en los diferentes días de modelación tal como se dijo anteriormente. Si al tomar el menor o mayor paso de cálculo no se cumplía la condición de Courant, era necesario correr algunos metros el segmento y comprobar para poder garantizar el funcionamiento del modelo hidráulico, en caso tal de encontrarse dos segmentos con características hidráulicas similares se procedía a la eliminación de uno de ellos para que el tamaño del segmento se ampliara y pudiera compensar el valor de velocidad elevada.

Algoritmo genético empelado para calibración. El modelo QUAL2Kw posee de forma adicional dentro de la hoja de cálculo “rates” una herramienta computacional llamada PIKAIA (Charbonneau and Knapp) que corresponde a una técnica metaheurística de optimización matemática enmarcada dentro de los algoritmos genéticos y que es utilizada para realizar calibración de las variables cinéticas que intervienen en los diferentes procesos modelados, ya que como se mencionó en el capítulo uno, el proceso de calibración de un modelo ambiental puede estar encaminado a la estimación de variables cinéticas que difícilmente se pueden establecer de manera experimental para un proyecto.

Un algoritmo genético es una herramienta computacional eficiente y que ha sido utilizada con éxito en múltiples problemas de optimización en ingeniería. Esta técnica se basa en conceptos de selección natural y genética, razón por la cual toda la terminología usada por ella es de carácter biológico con una connotación en la parte matemática de la programación usada. Un algoritmo genético funciona de manera similar a la naturaleza, creando poblaciones compuestas

por individuos, los individuos son cada uno de los valores generados de forma aleatoria para realizar una corrida sobre el modelo, esta corrida luego es evaluada por una función objetivo, a partir de la cual se hace una selección de las poblaciones más adaptadas, es decir de aquellas que hayan generados los mejores valores correspondientes a la función objetivo y que por ser las más aptas tienen el derecho a utilizarse como padres para la generación siguiente en la formación de nuevas poblaciones de prueba. Estas nuevas poblaciones se crean mediante unos controles de cruzamiento y además pueden ser introducidas características especiales que permitan la formación de nuevos individuos en un proceso de mutación que permita explorar una mayor variabilidad de la población, y que haga que el proceso de búsqueda pueda ampliar el rango de posibilidades, generando nuevos valores de la función objetivo en donde se supone la selección debe converger de forma secuencial en el desarrollo de múltiples generaciones al individuo más adaptado que corresponde en definitiva a la combinación de parámetros óptimos para el modelo planteado.

De manera general se pretende explicar de forma aproximada el funcionamiento del algoritmo genético, basándose en tres aspectos, uno, entendiendo el uso de las variables de entrada al modelo ([Public/models/pikaia/pikaia.htm](http://www.hao.ucar.edu/Public/models/pikaia/pikaia.htm)), dos; en la elaboración de la hoja utilizada como control del ajuste denominada “Fitness”, y tres el entendimiento de lo principal a tener en cuenta dentro de la hoja denominada “Auto-calibration”, ya que en definitiva serán estas las hojas que interactúan con el algoritmo genético PIKAIA; para un mejor entendimiento del mismo dentro de QUAL2Kw se presentan fichas para algunas de las variables de entrada, pero si se desea ampliar la información aquí suministrada el lector puede consultar la página oficial de PIKAIA: <http://www.hao.ucar.edu/Public/models/pikaia/pikaia.htm>

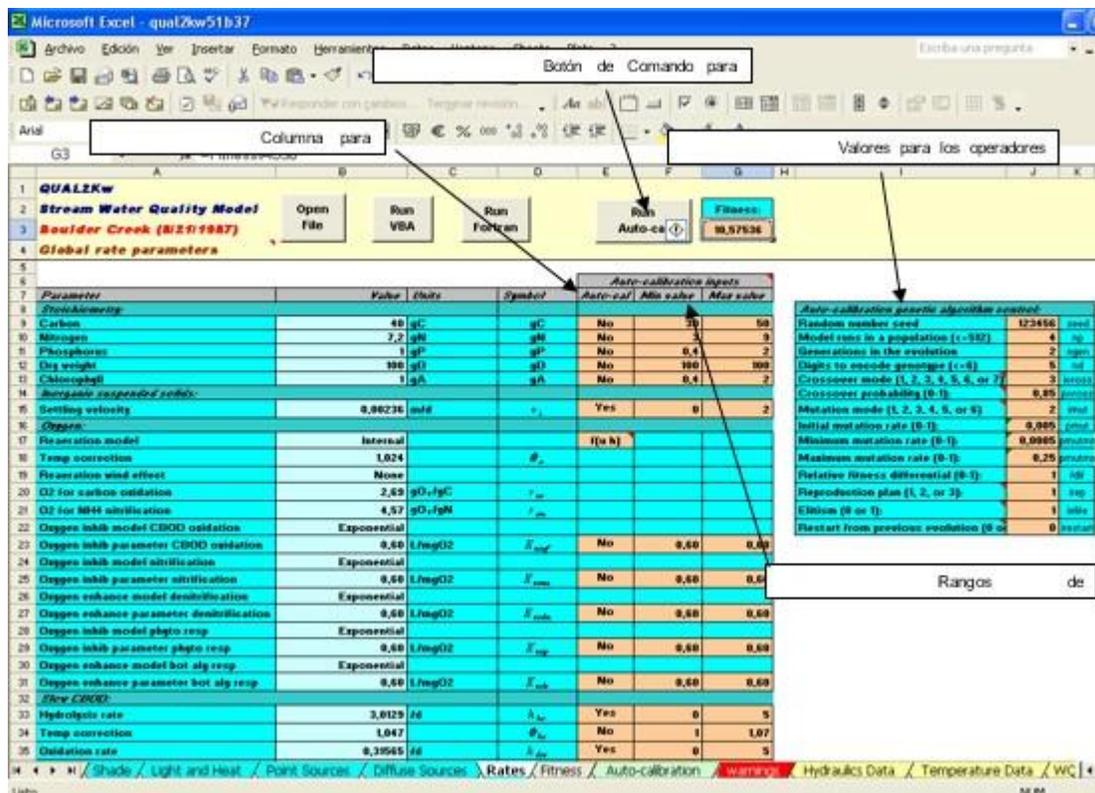


Figura 17 Hoja “Rates” resaltando los aspectos del algoritmo genético

La selección del valor de los diferentes operadores que deben ser introducidos por parte del usuario repercutirá en la eficiencia y convergencia de la solución obtenida para la calibración de modelo, por tanto es importante prestar atención sobre estos valores, de acuerdo a criterios propios y/o recomendaciones. Dichas variables de entrada del algoritmo genético PIKAIA son:

Random Number seed: Semilla para la generación de las poblaciones iniciales en el generador de números aleatorios de Fortran. Puede introducirse cualquier valor entero real pero por recomendación general las semillas pueden ser números enteros grandes preferiblemente números primos (Obregón,2007), para estas cuencas se ha seleccionado valores en cifras de millones. Los números aleatorios generados están en un rango entre 0 y 1, y por ello debe

introducirse rangos de variación de cada una de las variables que se van ingresar para poder reescalarlos en los valores usados para la generación aleatoria.

Model runs in a population: Corresponde al número de veces que corre el modelo en una generación. Representa el total de poblaciones de prueba que utiliza para cada generación. Se debe ingresar un número entero par, ya que si se ingresa un número entero impar el programa por defecto lo asume como el entero par anterior y realiza la corrida con ello, por ejemplo si se ingresa un valor de 5, el programa será corrido con 4 poblaciones. Puede introducirse hasta un máximo de 512 poblaciones, esta limitación se podría obviar al crear código propio para la optimización de los parámetros del modelo. Para este caso se ha seleccionado una población de 30 individuos dada la experiencia obtenida en el desarrollo de la tesis de maestría “Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo QUAL2K como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D.C.” donde los gráficos de análisis de este parámetro evidencian que 30 es una buena aproximación para obtener resultados óptimos.

Generations in the evolution: Es el número total de generaciones en que se desarrolla la población. Al igual que el parámetro anterior este se seleccionó con base a la experiencia lograda en el desarrollo de la tesis de maestría comentada y fue fijado en 80, dado que en este número evolutivo los resultados son buenos y el costo computacional no es excesivo.

Digits to encode genotype: Corresponde al proceso de codificación del individuo utilizado para la población. Normalmente los algoritmos genéticos utilizan sistemas binarios para codificar los números susceptibles de calibración, esto se hace para generar un código único del individuo

(asumido como el cromosoma del individuo) susceptible de cruzamiento en la siguiente generación y donde el padre deja su huella genética en la siguiente generación. Para el caso de PIKAIA este utiliza una codificación decimal es decir una variable susceptible de modificación será representada por números de 0 a 9 (ejemplo 0.235687 se representara como 235687) y este cambio se hace ya que no es muy fácil programar y manipular la codificación binaria en plataforma de Fortran. El máximo de dígitos para la codificación es de seis. El seleccionado para las cuencas estudiadas es de cuatro debido a la eficiencia computacional lograda en la formación del cromosoma total ya que este representa de buena forma los valores de las constantes que se quieren calibrar puesto que puede representar la cifra entera en algunos de los parámetros y tres cifras decimales relacionados con los mismos.

Crossover mode: El operador de cruzamiento actúa sobre el par de cromosomas padres para producir un par de cromosomas descendientes que se originaran a través de la selección e intercambio de partes de los cromosomas padres. Hay diferentes tipos de cruzamiento: cruzamiento un-punto, dos-puntos y uniforme. En el cruzamiento un-punto y dos-puntos el operador intercambia partes del cromosoma en puntos aleatoriamente seleccionados de los dos parámetros padres. Ellos difieren en el número de cortes hechos en los cromosomas padres (Pelletier et. al., 2006). En el cruzamiento uniforme son los genes individuales seleccionados aleatoriamente de los dos parámetros padres para el intercambio y no partes del cromosoma. Adicionalmente, a estos tres modos de cruzamiento el modelo QUAL2Kw presenta las opciones de cruzamiento aritmético y modos híbridos de cruzamiento que son combinaciones de un-punto, dos-puntos, uniforme y aritmético (Chapra y Pelletier, 2004) . Para este caso se toma la probabilidad equivalente de cruzamiento de uno o dos puntos para tener un mayor espacio de búsqueda en la solución

Crossover probability: Representa la probabilidad total de individuos susceptibles de cruzamiento, el valor estándar recomendado por múltiples autores es del 85% (0.85) (Martínez,2000), esto quiere decir que por cada 100 individuos susceptibles de cruzarse se deben usar 85 de ellos para realizar el cruzamiento. Fue el seleccionado para los distintos modelos

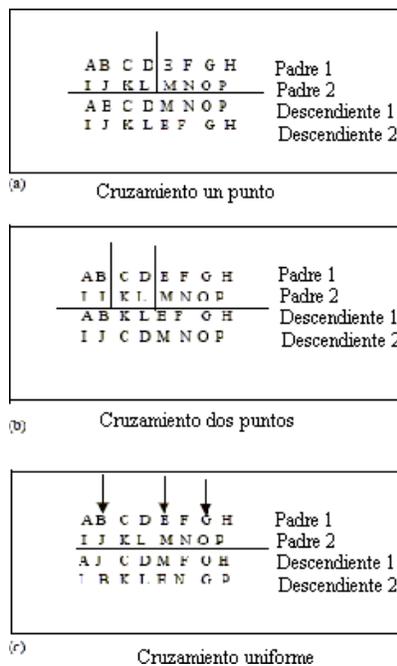


Figura 18 Modos de cruzamiento un-punto, dos-puntos y uniforme en un algoritmo genético (AG) (Ng and Perera, 2003).

Fuente: Adaptado de Ng A.W.M., Perera B.J.C. 2003. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration. Engineering Applications of Artificial Intelligence

Mutation mode: Representa la mutación posible que puede realizar el programa, se presentan básicamente cinco métodos de mutación, todos están basados en una tasa de modificación que es susceptible de modificación de acuerdo al ajuste o a la distancia sobre las respuesta obtenidas, o también este proceso se puede realizar con una tasa fija. La mutación es el factor que permite la existencia de diversidad de especie en la población en cada generación siguiente a la inicial de manera que pueda evitar la rápida convergencia de la misma a una

solución que puede ser la incorrecta (como por ejemplo un máximo local y no global) y que no pueda salir de allí. Para este caso se toma mutación de un punto y crecimiento basado en el ajuste para tener la posibilidad de explorar otras posibles soluciones.

Initial mutation rate: Representa la tasa de mutación inicial en el caso que se usen planes de mutación diferentes a la tasa fija, si se utiliza la opción de tasa fija este será el valor de la tasa de mutación. Puede variar entre 0 y 1, pero se recomiendan valores bajos (Martínez, 2000) debido a que si se fijan valores altos el algoritmo puede degradarse y perder la convergencia inicial planteada. Se toma el valor recomendado por el modelo cuando se descarga de la web.

Minimum mutation rate: Representa el valor mínimo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija. Puede variar entre cero y uno. Se toma el valor recomendado por el modelo cuando se descarga de la web.

Maximum mutation rate: Representa el valor máximo que puede asumir la tasa de mutación en caso de utilizar un método de mutación diferente al de la tasa fija. Puede variar entre cero y uno. Se toma el valor recomendado por el modelo cuando se descarga de la web.

Relative Fitness Differential: Se puede traducir como la presión de la selección, este parámetro indica cuanta ventaja supone tener una aptitud alta para ser elegido como padre. Cuando el valor es fijado en uno los individuos más aptos tienen las mayores ventajas para transmitir sus genes, mientras que cuando es fijado en cero se anula la presión de selección y los individuos serán elegidos al azar independiente de su aptitud eliminando así la componente de

selección genética del algoritmo. Se recomienda usar el valor máximo de uno y fue el utilizado para las cuencas.

Reproduction Plan: Es el plan de reproducción que el algoritmo debe usar. La selección de los individuos en el algoritmo PIKAIA se realiza por el método de la rueda de la ruleta “roulette wheel” usando el ajuste relativo obtenido para la población como una medida de la probabilidad de selección. Esto puede representarse como un juego de ruleta, en la cual cada individuo obtiene una sección de la ruleta y los individuos más aptos obtienen mayores secciones de la ruleta, luego la ruleta se hace girar y para en los individuos que va utilizar para realizar generaciones siguientes o crear hijos. Una vez definidos estos se debe seleccionar el método de reproducción a utilizar, que básicamente se divide en tres: En la primera alternativa se realiza un reemplazo total de la población, esto quiere decir que el total de hijos creados reemplaza al total de padres originales; la segunda alternativa se denomina selección aleatoria de eliminación; y la tercera eliminación de los peores, para estas dos últimas los planes de reproducción difieren en los miembros de la población que se eliminan cuando la generación siguiente es incorporada. El plan de reproducción utilizado implica el reemplazo aleatorio de las peores soluciones encontradas en las generaciones precedentes.

Elitism: Es una forma de conservar los individuos más aptos de una población de padres para que puedan pasar sin modificaciones a la generación siguiente. Si se coloca el valor de cero no se realizara elitismo, mientras si se coloca el valor de uno se realizará dicha preservación, que será únicamente ejecutada si se utiliza el segundo o tercer plan de reproducción. Para este caso se ha decidido conservar el elitismo dado que pueda conservar soluciones optimas sin que sean

totalmente reemplazadas, y que junto con la mutación le permiten al proceso de calibración buscar alternativas de solución óptimas.

Restart from previous evolution: Si se selecciona el valor de cero, indica que todas las poblaciones iniciales para la corrida de autocalibración serán generadas de forma aleatoria cada vez que se corra, mientras si se selecciona el valor de uno, siempre el programa toma una población inicial como los valores que se presentan para las variables a calibrar que se encuentren dentro de la hoja electrónica al momento de realizar la calibración. Siempre en las cuencas se ha tomado la población como aleatoria que le permita explorar espacios de búsqueda mayores.

Hasta aquí se muestra como cada variable influye dentro del algoritmo genético, ahora se explicará el funcionamiento de la hoja “Fitness” con la cual el algoritmo genético realiza la calibración.

Para evaluar el ajuste de cada uno de los parámetros en la calibración del modelo QUAL2Kw la función recomendada por Pelletier *et. al.* (2006), es una ecuación robusta que representa todas las variables del modelo. Esta función de ajuste es el recíproco del peso promedio (con el cual se pondera las variables que mas influyen en el proceso) de la normalización de la raíz cuadrada del error de la diferencia entre los datos obtenidos con el modelo y los datos de campo y se representa en la ecuación 10 - 1 . Se tomó el recíproco de esta función porque es importante mencionar que el

$$f(x) = \left(\frac{\sum_{j=1}^{np} W_j}{\sum_{j=1}^{np} \left[W_j * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nt} (O_{ij} - P_{ij})^2}{nt}} \right]} \right)^{-1}$$

Donde:

$O_{i,j}$ = Valor Observado

P_{ij} = Valor predicho por el modelo

nt = Numero de valores observados

np: Número de variables de calidad del agua a calibrar

w_j = Factor de peso

Esta función de error es programada de forma independiente dentro de la hoja “Fitness” todos los cálculos de la ecuación anterior deben ser realizados de forma secuencial y el resultado de este deber ser enlazado en la hoja “rates” en la celda G3. Una cosa que debe quedar clara, es que el usuario puede programar dentro de la hoja “Fitness” cualquier función de ajuste que a su modo de ver puede utilizar, esto es una libertad que permite el modelo. Todos los resultados que queden en la hoja “Fitness” solo serán guardados en el archivo de excel .xls, ya que ninguno de estos valores será almacenado en al archivo .q2k. Esta hoja “Fitness” debe ser llenada llamando los datos ingresados en las hojas de color amarillo (Temperatura Data, WQ Data, WQ Data Min, WQ Data MX) con los resultados obtenidos en las hojas finales de color verde (Temperature Output, WQ Output, WQ Max y WQ Min) para que sean tomados por la función objetivo definida y actualizado el valor final de ajuste para que el programa lo almacene por cada corrida. Una característica importante

Finalmente en la hoja “Auto-calibration” lo más importante para destacar es que en ella se muestra la forma de evolución de cada población a través de las distintas generaciones, lo cual es importante para determinar la velocidad de convergencia del algoritmo genético. En la hoja siguiente se presenta la forma secuencial de funcionamiento del algoritmo genético integrando las variables mencionadas anteriormente.

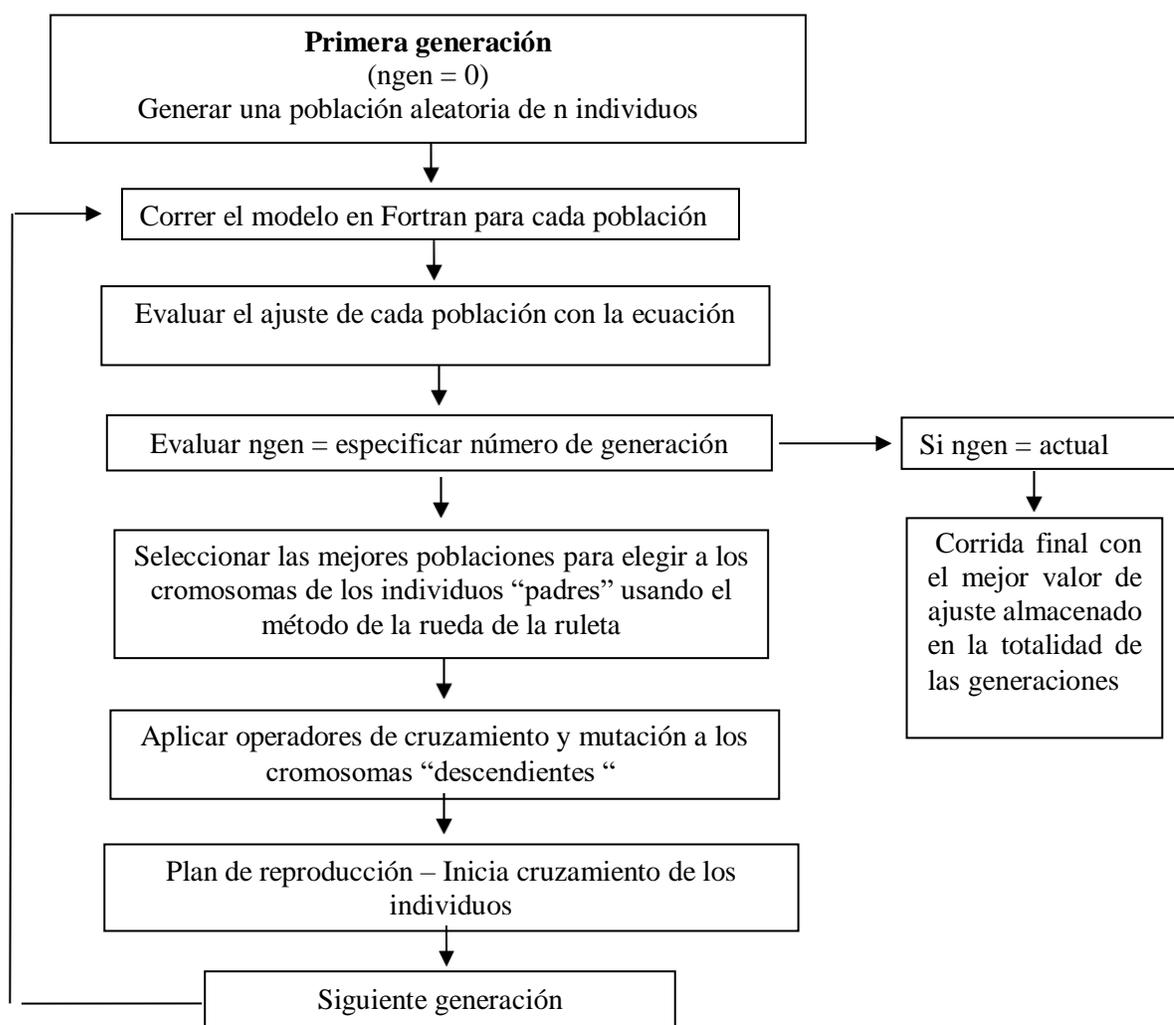


Figura 19 Evolución de cada población

Fuente: Adaptado de “Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo QUAL2K como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D.C.”

2.3. Marco histórico

El municipio de La Calera a lo largo de los últimos años ha venido incrementado su población de una manera más acelerada, esto debido a que su ubicación es considerada como una zona de expansión suburbana para la capital de nuestro país (Pedraza García, 2014). En la siguiente imagen podemos evidenciar como ha crecido la población del municipio de La Calera.

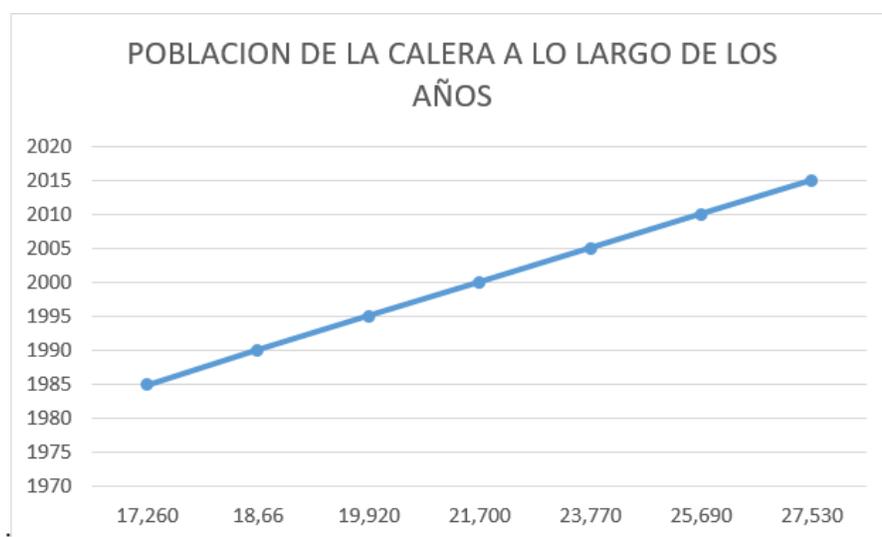


Figura 20 Población del municipio la calera a lo largo del tiempo
Fuente: population.city

Es evidente que a lo largo del tiempo el municipio se ha expandido, aumentando la demanda del recurso agua para las necesidades básicas de los habitantes, como para el consumo y otras actividades, tales como la agropecuaria, industrial y ecológica.

El municipio de La Calera enfrenta problemas de saneamiento básico, debido a que las aguas residuales provenientes del casco urbano son vertidas a la fuente superficial más

importante de la zona el Río Teusacá, Esta fuente superficial es usada durante su recorrido en varias actividades, como abastecimiento, agrícola, ecológico entre otras y debido a su deterioro constante las actividades que se dan han sido cambiadas o transformadas. Así mismo la falta de presupuestos municipales para la construcción de obras de saneamiento ambiental, baja cobertura de alcantarillado en zonas rurales y actividades industriales afectan aún más la calidad del agua del río Teusacá.

El cuerpo receptor de las aguas residuales del municipio de La Calera, Río Teusacá presenta caudales medios mensuales estimados para el POMCA de 3.01 m³/s. El comportamiento del río a través del tiempo no es cambiante estadísticamente se presentan las mismas curvas y se mantienen los promedios de caudales, diferente pasa con la dinámica poblacional, con el aumento constante de la población la carga contaminante que llega al río afecta dramáticamente el ecosistema, por tal razón el Río Teusacá no asimila los contaminantes que son vertidos a este como en décadas anteriores, en el cual el vertimiento contenía menor carga contaminante al río y la planta de tratamiento existente lograba remover gran parte de los contaminantes que las aguas residuales conllevan, situación que cambia y resulta obsoleto el tratamiento que se realiza.

Las cargas contaminantes normadas y las cuales son sujetas de cobro como retribución por la contaminación por las Corporaciones Autónomas Regionales, son la DBO y los SST. La DBO indica la carga orgánica y los SST los sólidos en suspensión que contiene el vertimiento, un mayor vertimiento es una mayor afectación y por ende será sujeto a un cobro de tasa retributiva mayor (calderon, 2015).

Esta retribución que se debe hacer por contaminar hace que los municipios o usuarios realicen mejores tratamiento a las aguas servidas. Por otro lado las CARs cuentan con mayores herramientas para hacer cumplir a los usuarios tratamientos efectivos que garanticen el usos de las aguas de las fuentes receptoras aguas abajo, como objetivos de calidad, norma de vertimiento máximos entre otras.

DBO a lo largo del tiempo. La DBO en proporciones pequeñas, no es contaminante ya que puede ser oxidada de forma natural por bacterias y otros organismos que la transforman en sustancias minerales inertes.

Si la cantidad de materia orgánica es suficientemente elevada, el consumo de oxígeno puede llevar a su agotamiento, lo que tiene una consecuencia inmediata en la destrucción de las comunidades acuáticas que necesitan el oxígeno para vivir. Además, el exceso de materia orgánica posibilita la proliferación de microorganismos, muchos de los cuales resultan patógenos (contaminación biológica), provoca déficit de oxígeno, lo que aumenta la solubilidad en el agua de ciertos metales y a la vez se incrementa el efecto de la corrosión de las conducciones y tuberías por la presencia de sulfuros (calderonlabs, 2013).

Esto en el municipio de La Calera se ha convertido en un problema ya, que como podemos ver en la en la siguiente Tabla, se ha venido aumentado de manera constante la carga de materia orgánica, y la administración del municipio no ha logrado controlar los vertimientos que le están llegando al Río Teusacá. Esta carga afecta a los usuarios aguas abajo que usan la fuente para abastecimiento y actividades agrícolas y ecológicas.

Tabla 3
factor precipita de la concentración de la DBO

FACTOR PERCAPITA DE CONCENTRACION DE DBO			
AÑO	HABITANTE	CARGA ORGANICA POR PERSONA *(kg/día)	CARGA (Ton/año)
1985	17260	0.05	315.0
1990	18660	0.05	340.5
1995	19920	0.05	363.5
2000	21700	0.05	396.0
2005	23770	0.05	433.8
2010	25690	0.05	468.8
2015	27530	0.05	502.4

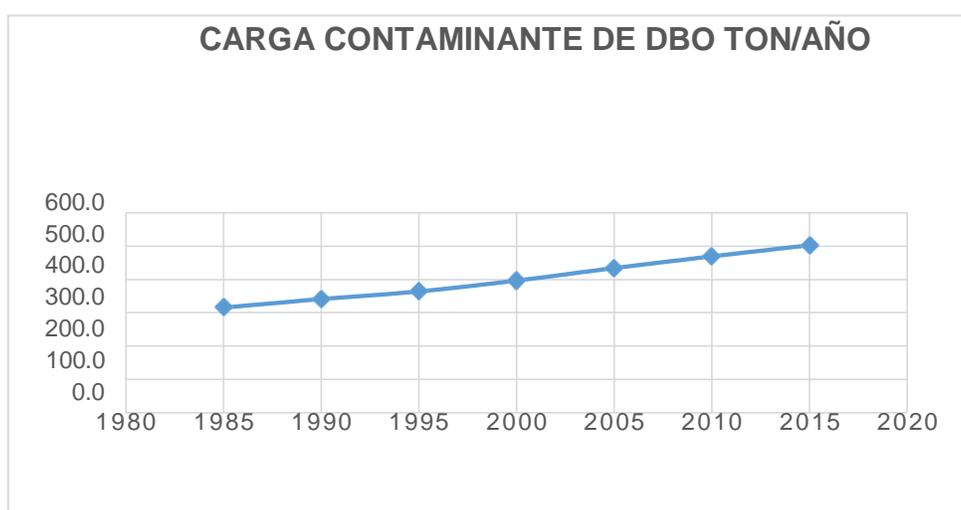


Figura 21 carga contaminante a lo largo del tiempo

Sólidos suspendidos totales a lo largo del tiempo. Los sólidos suspendidos totales juegan un papel muy importante en las escorrentías, en este caso no es la excepción, este parámetro afecta el oxígeno disuelto y la ecología del sistema, oscureciendo las aguas, no dejando que los rayos del sol penetren para degradar la materia orgánica de la fuente. Estadísticamente según la literatura una persona aporta una carga diaria de 0.05 kg/día de DBO y 0.04 kg/día de SST (Ortiz, 2012)

Tabla 4*Factor percapita de concentraciones de los SST*

FACTOR PERCAPITA DE CONCENTRACION DE SST			
AÑO	HABITANTE	CARGA ORGANICA* (kg/día)	CARGA (Ton/año)
1985	17260	0.04	252.0
1990	18660	0.04	272.4
1995	19920	0.04	290.8
2000	21700	0.04	316.8
2005	23770	0.04	347.0
2010	25690	0.04	375.1
2015	27530	0.04	401.9

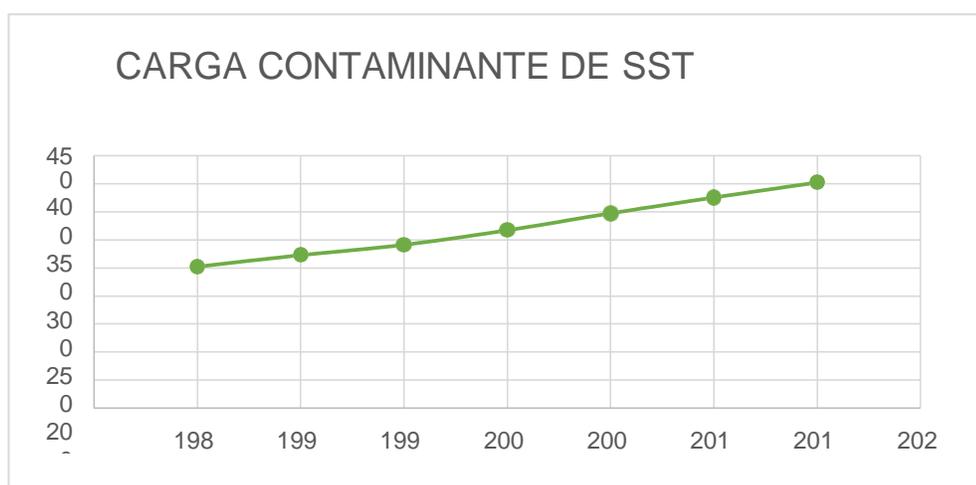


Figura 22 Carga contaminante de los sólidos suspendidos totales

Se estiman más de 400 toneladas de carga al año de sólidos suspendido y materia orgánica según las CARS, esta carga afecta la dinámica de las actividades en el Río, razón por la cual es necesario realizar los tratamientos debidos para remover estas cargas.

2.4. Marco legal

2.4.1. Normatividad colombiana.

Tabla 5.

Normativa en Colombia a lo largo del tiempo que a regido la calidad del agua

Normativa	Descripción
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. (REPUBLICA DE COLOMBIA, 2001)
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. (Colombia.Leyes Y Decretos, 2011)
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. (Secretaría Jurídica Distrital, 2010)
Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. En ejercicio de sus atribuciones constitucionales y legales, en especial las conferidas en el <u>numeral 11</u> del artículo <u>189</u> de la <u>Constitución Política</u> , el artículo 134 del Decreto-ley 2811 de 1974, el artículo 2º, los numerales 2, 10, 11 y 24 del <u>artículo 5º</u> y el <u>parágrafo 3º</u> del artículo <u>33</u> de la <u>Ley 99 de 1993</u> . (BEATIRZ URIBE BOTERO , 2010)
Resolución 631 de 2015.	Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En usos de sus facultades en especial en las conferidas por el numeral 25 del artículo 5 de la ly 99 de 1993 y el artículo 28 del decreto 3930 de2010 modificado por el artículo 1 del decreto 4728 de 2010 (Resolución 0631 de 2015, 2015)
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible. La pretensión de esta iniciativa es recoger en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental. Teniendo en cuenta esta finalidad este decreto no contiene ninguna disposición nueva, ni modifica las existentes. (decreto unico 1076 del 2015, 2015)
Acuerdo 43 de 2006	Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR, 2006)

2.4.2. Objetivos de calidad. El objetivo de Calidad según la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010), consiste en mejorar la calidad y minimizar la contaminación de los cuerpos de agua a través del ordenamiento y reglamentación de usos del recurso y el monitoreo, seguimiento y evaluación de la calidad del mismo. (Sostenible, 2018)

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR para efectos de fijar los objetivos de calidad clasificará en forma general los cuerpos de agua que se encuentran dentro de la jurisdicción de la CAR, teniendo en cuenta los usos para los cuales han sido asignados y establecerá los criterios y objetivos de calidad mínima que deben tener los diferentes tramos de la cuenca del río Bogotá con un horizonte proyectado al año 2020, con el fin de articular las acciones propuestas en el CONPES 3320 de 2004, lo dispuesto respecto a los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos y todos los programas y proyectos del nivel nacional, departamental y municipal.

En el caso del río Teusacá se analizará la parte media baja del río que según el acuerdo 43 del 2006 es clasificado como clase IV que corresponde a valores de los usos agrícola con restricciones y pecuario. (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR, 2006)

En la siguiente Tabla se expresan los valores de la Clase IV, así:

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	VALOR MÁS RESTRICTIVO (MÁXIMO QUE SE PUEDE OBTENER)
PARAMETROS ORGANICOS		
DBO	mg/L	50
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	20000
PARAMETROS NUTRIENTES		
NITRITOS	mg/L	10
SOLIDOS		
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg/L	40
PARAMETROS DE INTERES SANITARIO		
ALUMINIO	mg/L	5
ARSÉNICO	CL 96/50	0,1
BERILIO	CL 96/50	0,1
BORO	mg/L	0,3-0,4
CADMIO	CL 96/50	0,01
CINC	CL 96/50	2
COBALTO	mg/L	0,05
COBRE	CL 96/50	0,2
CROMO (Cr+6)	mg/L	0,1
FLUOR	mg/L	1
HIERRO	mg/L	5
LITIO	mg/L	2,5
MANGANESO	mg/L	0,2
MERCURIO	mg/L	0,01
MOLIBDENO	mg/L	0,01
NIQUEL	mg/L	0,2
PH	Unidades	4,5-9,0
PLOMO	mg/L	0,1
SALES	mg/L	3000
SELENIO	mg/L	0,02
VANADIO	mg/L	0,1

Figura 23 Valores de la Clase IV

2.4.3. Resolución 631 de 2015. En esta resolución se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Tabla 6*Parámetros permisibles de los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales*

PARÁMETRO	UNIDADES	Aguas residuales domesticas – ARD y aguas residuales no domesticas de los prestadores del servicio público del alcantarillado con una carga mayor a 625 Kg/día y menor o igual a 3000 Kg/Día DBO
GENERALES		
pH	Unidades	6,00 - 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	20
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	
Fenoles Totales	mg/L	
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
HIDROCARBUROS		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	mg/L	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	
Compuestos orgánicos Halogenados Adsorbibles	mg/L	
COMPUESTOS DE FOSFORO		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
COMPUESTOS DE NITRÓGENO		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	Mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
IONES		
Cianuro Total (CN)	mg/L	0.5
Cloruros (Cl)	mg/L	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	Análisis y Reporte
Sulfuros (S ₂)	mg/L	Análisis y Reporte
METALES Y METALOIDES		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0.1
Cinc (Zn)	mg/L	3
Cobre (Cu)	mg/L	1
Cromo (Cr)	mg/L	0.5

Continuación, Tabla 6 Parámetros permisibles de los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales

Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0.02
Níquel (Ni)	mg/L	0.5
Plata (Ag)	mg/L	
Plomo (Pb)	mg/L	0.5
OTROS PARÁMETROS PARA ANALISIS		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Color Real (Medida de absorbancia a las siguientes longitudes de onda de 463 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte

(Resolución 0631 de 2015, 2015)

Capítulo 3 Diseño Metodológico

3.1. Diseño metodológico de la investigación

El tipo de investigación que se emplea en este proyecto es descriptivo, teórico y técnico, ya que se hace una descripción de las características fisicoquímica del vertimiento de aguas residuales y del río Teusacá, se implementan las teorías para la modelación matemática y se realiza un procedimiento técnico para la obtención de los resultados.

3.2. Población

Para la realización de este proyecto se tomará para estudio los usuarios que prestan el servicio de alcantarillado del municipio la calera, que en este caso se cuenta con 4880 usuarios beneficiarios del servicio y un total de 27527 habitante en el casco urbano.

3.3. Protocolo de modelación

La modelación se llevará a cabo siguiendo el protocolo presentado como diagrama de flujo en la Figura 24 y el cual fue adaptado de Camacho y Díaz-Granados (2002), incorporando algunos elementos de Refsgaard *et al.* (2007). La metodología seguida consistió en los siguientes pasos:

- En primer lugar, se definirá el plan de modelación. En esta etapa se identificará el problema y los objetivos de la modelación. En este caso en particular consistirá en realizar el modelo predictivo que permite estimar los impactos sobre la calidad del agua del Río Teusacá en un tramo de 0.600 km de longitud, bajo diferentes condiciones de caudal sobre el cuerpo receptor y de descarga de aguas residuales domesticas tratadas provenientes del casco urbano. De acuerdo con esto, se definieron los requisitos mínimos de información

para conformar un modelo representativo de las condiciones existentes, dentro de los que se incluyó el análisis de la calidad físico-química del agua y la identificación de fuentes existentes de contaminación puntual y difusa.

- En la segunda etapa se realizó la investigación preliminar, la cual consistió en la búsqueda de datos históricos disponibles de hidrología, hidráulica y calidad del agua; la revisión de la normatividad ambiental aplicable al caso de estudio (decretos y resoluciones promulgados por entidades de nivel nacional, regional y municipal) en relación con los usos actuales y potenciales en la zona y las restricciones sobre la calidad del vertimiento (Límites Máximos Permisibles); investigación sobre fuentes de contaminación, identificando el tipo (doméstico, industrial), naturaleza (puntual, distribuida o difusa), origen y principales características (cantidad, calidad y localización). Como resultado de esta etapa, se obtuvo una idea más clara del tipo de modelo a utilizar, los requisitos adicionales de información y los estándares y restricciones sobre la calidad del agua.
- El tercer paso consistió en el reconocimiento de campo con el fin de confirmar la información preliminar obtenida e identificar nuevas fuentes de contaminación o características particulares del sistema natural receptor que puedan incluirse en la modelación y/o análisis de resultados. También, a partir del recorrido a lo largo del tramo de estudio, se definieron los sitios de medición, los procesos dominantes y la complejidad requerida para representar de forma apropiada el prototipo.
- Con la información recogida en las etapas anteriores, se desarrolló el modelo conceptual. Para ello se hizo un esquema detallado del sistema a modelar, indicando claramente las entradas, salidas, fuentes, sumideros y procesos considerados. Igualmente, en esta etapa se definieron los determinantes de la calidad del agua a simular.

- Dado el modelo conceptual, se definió si es necesario construir un código o si existe software que permita implementar la representación construida del sistema natural. En este caso en particular, y como se explicará más adelante, se optó por utilizar el software QUAL2Kw v.5.1, desarrollado por el Departamento de Ecología del Estado de Washington. Debido a que este software ha sido extensamente probado y utilizado en diversos casos en los Estados Unidos y en otros países, no fue necesaria la verificación del código en el desarrollo de soluciones analíticas y cerradas, ejecución de ejemplos sintéticos o la reproducción de pruebas pos-modelación.
- Seleccionado el código del modelo, y conocidas sus necesidades de información, se prosiguió con la caracterización hidráulica e hidrológica de la zona. En esta etapa se implementó el software hidráulico HEC-RAS v.5. El propósito principal de la aplicación de este programa fue la obtención de las curvas de calibración que describen la variación de las características hidráulicas (velocidad y profundidad) con el caudal. Igualmente, como resultado de esta modelación, se obtuvieron los parámetros hidráulicos, los tiempos de viaje o retención hidráulica y las consideraciones de mezcla (zona de mezcla, coeficientes de dispersión). Este paso corresponde a la primera etapa de toda modelación de calidad del agua, la cual se conoce como modelación hidrodinámica y de transporte.
- Con la información de la caracterización hidráulica se desarrolló el programa de monitoreo (toma de muestras, tiempos de viaje). En esta etapa también se definieron los métodos de muestreo y los recursos (personal, equipos, etc.). Como resultado, se obtuvieron los datos para calibrar el modelo y estudiar el estado actual de la calidad del agua del cuerpo receptor.

- Con los datos obtenidos de la campaña de monitoreo, se hizo el análisis del estado actual del cuerpo de agua receptor y de los conflictos existentes con los usos actuales y potenciales del recurso hídrico.
- Se procedió con la implementación del código del modelo. Una vez pre-procesados e introducidos los datos en el software, se definieron la función objetivo (medida del ajuste entre los datos medidos y los valores simulados), los parámetros y rangos de calibración. Una vez ejecutada la calibración del modelo, se obtuvo la combinación de parámetros que mejor representan las condiciones medidas

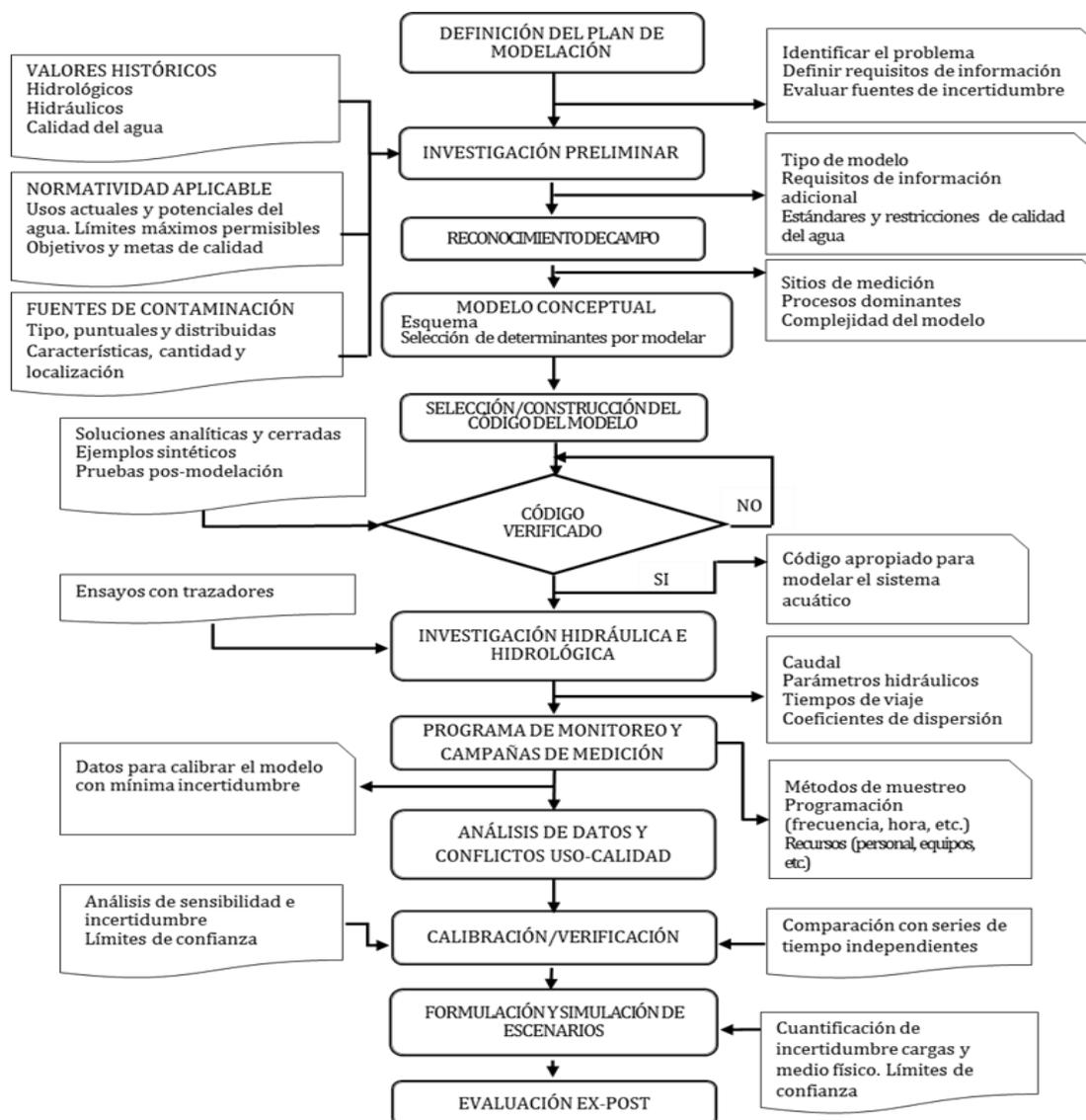


Figura 24. Protocolo de Modelación

Fuente: Modificado de Camacho Y Díaz-Granados (2002)

Una vez calibrado el modelo, se formularon los escenarios de simulación considerando diferentes condiciones de carga en el vertimiento y diferentes caudales en el cuerpo receptor. Se analizaron aspectos como la adición o remoción de carga contaminante a la salida del tramo de estudio, la capacidad de asimilación de la fuente receptora y la comparación entre los escenarios ejecutados. De acuerdo con el análisis de los resultados de la simulación, se elaboraron las respectivas conclusiones y recomendaciones del caso.

Capítulo 4. Presentación de resultados

4.1. Realizar las caracterizaciones y análisis de la calidad del agua en el río Teusacá y en el vertimiento de aguas residuales del municipio de La Calera, implementando métodos de índices de calidad de aguas

4.1.1. Investigación preliminar. Se realizó la visita de reconocimiento del tramo de modelación donde se ubicará el vertimiento de aguas residuales domesticas tratadas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de La Calera. En esta visita se definieron las siguientes actividades:

- Identificación de sitio de aforo de caudal liquido sobre la Rio Teusacá
- Identificar posibles aportes adicionales de carga contaminante puntual o difusa y usos actuales del recurso hídrico.
- La identificación de características especiales sobre la corriente como zonas muertas o de almacenamiento temporal, basura, malos olores, entre otros.

4.1.2 Aforo líquido. El método de aforo y el equipo necesario para el punto se estableció según las condiciones en el sitio de muestreo. Para este caso se utilizó un perfilador acústico Doppler, el cual funciona como un bote, el cual escanea el perfil del río para calcular el caudal total de la fuente receptora, como resultado para el punto aguas arriba del punto de vertimiento proyectado, el caudal encontrado fue de 1188,3 l/s

4.1.3. Cargas adicionales y usos del tramo. Las cargas adicionales en el tramo de modelación son de dos tipos: difusas por actividades agrícolas que se desarrollan a los márgenes del río y puntual por la Quebrada San Lorenzo la cual fue identificada como portadora de carga contaminante, a esta se realizó caracterización de calidad de aguas con el fin de establecer sus condiciones antes de la entrada al río Teusacá.



Figura 25. Localización Tramo de Modelación
Fuente: Modificado Google Earth

4.1.4. Características físicas del río Teusacá. El tramo de estudio del Río Teusacá es de pendiente baja y velocidades son bajas, presenta malos olores y en ocasiones transporta basuras.

Aunque la pendiente y la velocidad son relativamente bajas, el río en el tramo no presenta zonas muertas o de almacenamiento temporal que haya que tener en cuenta dentro del análisis hidráulico, en las condiciones encontradas.

El tramo en estudio no sufre ninguna turbulencia, estancamientos, entradas de conectividad eléctrica, otros drenajes o vertimientos, es un canal irregular donde el agua fluye sin ningún inconveniente ni detalles a mencionar.

4.1.5. Modelo conceptual. El sistema se modeló como un canal de sección irregular de longitud total de 0.504 km que recibe la descarga de aguas residuales domésticas a una distancia de 50 m desde la cabecera y no recoge más vertimientos ni tributarios a lo largo de su recorrido.

4.1.6. Selección del código del modelo. Una revisión detallada de los modelos de dominio público para la modelación de la calidad del agua en corrientes superficiales se puede encontrar en Kannel et al. (2010), Cox (2003) y, más recientemente, en Wang et al. (2013). De acuerdo con lo presentado por dichos autores, los modelos QUAL2K y WASP, ambos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), tienen los componentes necesarios para la modelación del caso de estudio. A diferencia del primero, WASP es más apropiado para la modelación de sustancias tóxicas; no obstante, presenta una desventaja importante que consiste en la dificultad de calibrarlo automáticamente dado que carece de un módulo para ello y no permite ser ejecutado en segundo plano (batch mode). Por otra parte, mientras la versión más reciente de QUAL2K de la USEPA, desarrollado en el entorno Excel, no incluye explícitamente un módulo de autocalibración, mediante el uso de macros es posible hacer múltiples simulaciones en línea. No obstante, para este último software, también existe la posibilidad de utilizar una versión paralela desarrollada por el Departamento de Ecología del Estado de Washington, QUAL2Kw, la cual incorpora un algoritmo genético para la autocalibración del modelo. Esta entidad también ha desarrollado herramientas (plug-ins) complementarias como YASAIw, basada en Excel, para realizar simulaciones de Monte Carlo y facilitar el respectivo análisis de

sensibilidad e incertidumbre. La versión más reciente del software QUAL2Kw es la 6.0, cuya principal diferencia con la versión 5.1 es que incluye la opción de la modelación dinámica de la calidad del agua. El análisis hidráulico de flujo no uniforme y no permanente, y la inclusión de zonas de almacenamiento temporal. Estas nuevas capacidades no son necesarias para este trabajo de modelación, puesto que se desarrolló un modelo en estado estable y se supone que la descarga de las aguas residuales tratadas es continua y constante en el tiempo, con el fin de considerar un efecto en condiciones de equilibrio sobre el cuerpo receptor.

4.1.7. Descripción conceptual. Teniendo en cuenta el impacto al tramo de estudio, se limita el modelo sobre el sector de impacto directo del vertimiento de la Planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de La Calera, se realiza una segmentación más específica con el fin de evaluar el impacto del vertimiento sobre el cuerpo Hídrico receptor, cual se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7.**

Tabla 7
Segmentación del modelo

<i>Downstream end of reach label</i>	<i>Number</i>	<i>Reach length (km)</i>	<i>Downstream Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Downstream location (km)</i>
Cabecera	0		4.72	73.98	0.504
Punto Vertimiento	1	0.04	4.72	73.98	0.462
	2	0.04	4.72	73.98	0.420
	3	0.04	4.72	73.98	0.378
	4	0.04	4.73	73.98	0.336
Q. San Lorenzo	5	0.04	4.73	73.98	0.294
	6	0.04	4.73	73.98	0.252
	7	0.04	4.73	73.98	0.210
	8	0.04	4.73	73.98	0.168
	9	0.04	4.73	73.98	0.126
	10	0.04	4.73	73.98	0.084
	11	0.04	4.72	73.98	0.042
K0+600	12	0.04	4.72	73.98	0.000

Fuente: Autor del proyecto, 2020

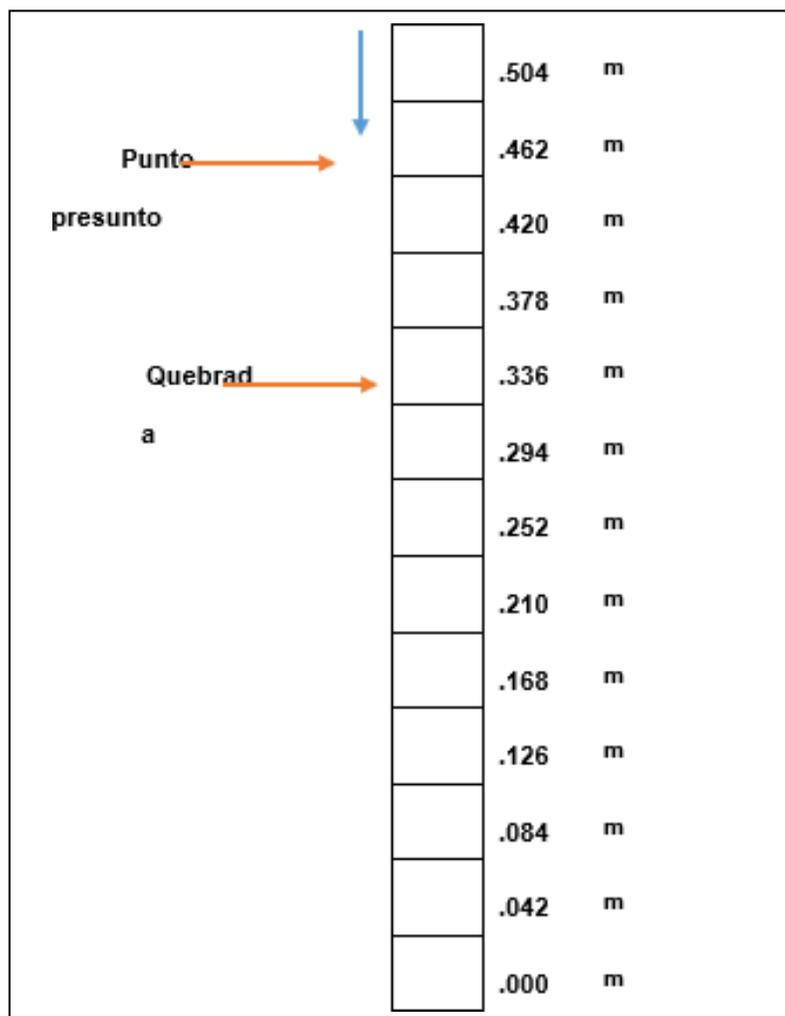


Figura 26. Representación conceptual del tramo de estudio
Fuente: Autor del proyecto, 2020

4.1.8. Caracterización hidrológica.

4.1.8.1. Estudio de caudales. La cuenca del Río Teusacá, cuenta con información hidrométrica directa, registrada en las estaciones limnimétricas Puente Adobes, La Cabaña y La Calera, localizadas aguas abajo del embalse, y la estación limnimétrica San Rafael localizada inmediatamente aguas arriba del embalse y anterior a la construcción del embalse, la estación El Tambor, localizada directamente en el sitio de presa y El Vergel, abajo de la estación de La Cabaña.

En el siguiente cuadro se presentan las estaciones hidrológicas de la cuenca.

Código	CAT	Nombre Estación	Corriente	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Instalación
2120729	LM	CABANA LA	TEUSACA	LA CALERA	4°46'N	73°57'W	2595	15/08/1946
2120788	LM	PTE ADOBES	TEUSACA	SOPO	4°53'N	73°58'W	2552	15/02/1964
2120872	LM	CALERA LA	TEUSACA	LA CALERA	4°43'N	73°58'W	2718	15/11/1985
2120873	LM	PARQUE LA CALERA	TEUSACA	LA CALERA	4°41'N	73°58'W	2750	15/03/1990
2120940	LM	AFLU. SAN RAFAEL	EMB. SAN RAFAEL	LA CALERA	4°42'N	74°0'W	2950	15/03/1997
2120958	LM	DESC. SAN RAFAEL	EMB. SAN RAFAEL	LA CALERA	4°43'N	74°1'W	2930	15/03/1997

Figura 27. Estaciones hidrológicas de la cuenca del río Teusacá

Para el tramo de interés se utilizó la estación La Calera, para esta estación se presenta en la siguiente tabla los caudales medios mensuales multianuales.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
CALERA LA	1,45	1,38	1,35	1,97	2,29	2,44	3,07	3,86	2,94	1,63	1,99	2,11	2,25

Figura 28. Caudales medios mensuales multianuales (m³/seg)

4.1.8.2. Cálculo de caudal ambiental. según el ministerio de Ambiente se define como caudal ecológico o ambiental el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas. (ANLA, 2013)

Existen diversos métodos para el cálculo del caudal ecológico los cuales pueden variar según el enfoque hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico. Para el caso particular y conociendo las condiciones de calidad de agua del río Teusacá se optó por el cálculo del caudal ecológico a partir de la hidrología.

Los métodos clasificados como hidrológicos permiten calcular el caudal ecológico a partir de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan

índices, se opta por un caudal calificado o establecido previamente como normativo o se calcula a partir de recomendaciones ya establecidas.

Siguiendo la metodología aplicada por el IDEAM en la Resolución 865 de 2014 se puede realizar el cálculo del caudal ambiental siguiendo la siguiente metodología:

Mínimo histórico: El Estudio Nacional del Agua (2000) a partir de las curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 años a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.

Siguiendo la metodología se presenta a continuación la curva de duración de caudales medios para la estación del Río Teusacá.

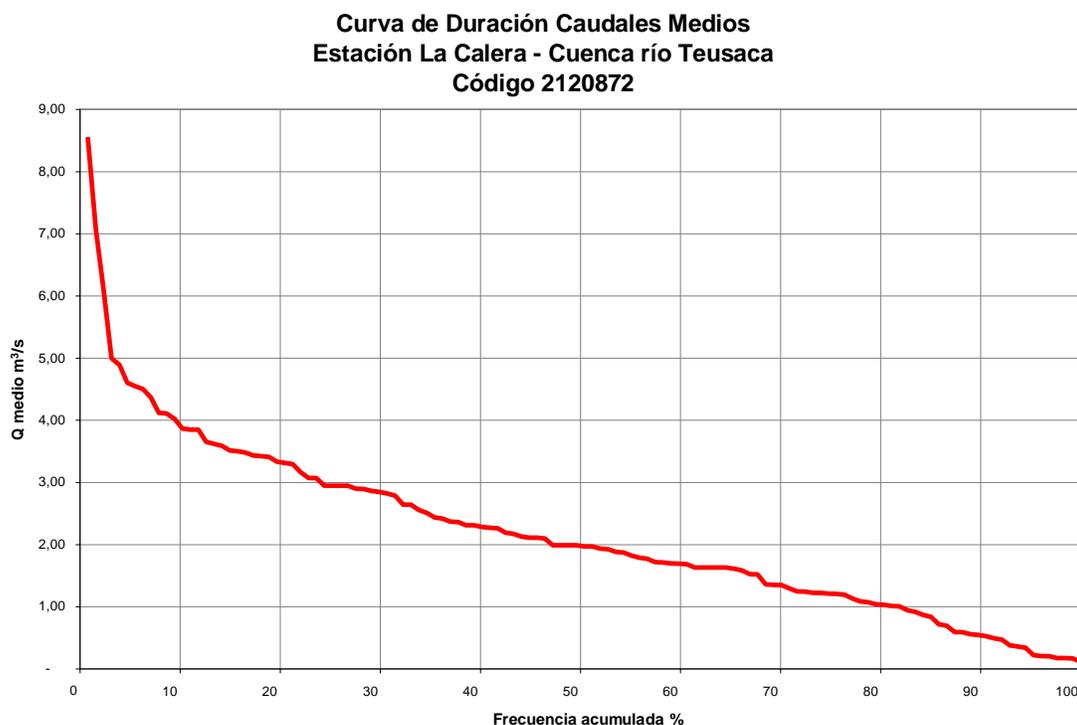


Figura 29. CDC MEDIOS RIO TEUSACÁ

Fuente: Información tomada del POMCA del Río Teusacá

Así mismo se presenta en la siguiente tabla los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno generados para la estación Río Teusacá, información tomada del POMCA del Río Teusacá.

Período de retorno (años)	2	5	10	20	50	100
CALERA LA	0,055	0,017	0,009	0,005	0,003	0,002

Figura 30. Caudales mínimos generados (m3/seg)

Para el punto de interés el caudal ecológico estimado es de 0.55 m3/seg.

4.1.9. Caracterización hidráulica y de transporte. La modelación hidráulica de la corriente se hizo con ayuda del software de modelación HEC-RAS v.5.0.3, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

Para la modelación hidráulica se consideró un tramo de 504 [m] de longitud aproximadamente que permite evaluar los parámetros hidráulicos de mayor interés como niveles, caudales, velocidades y pendientes.

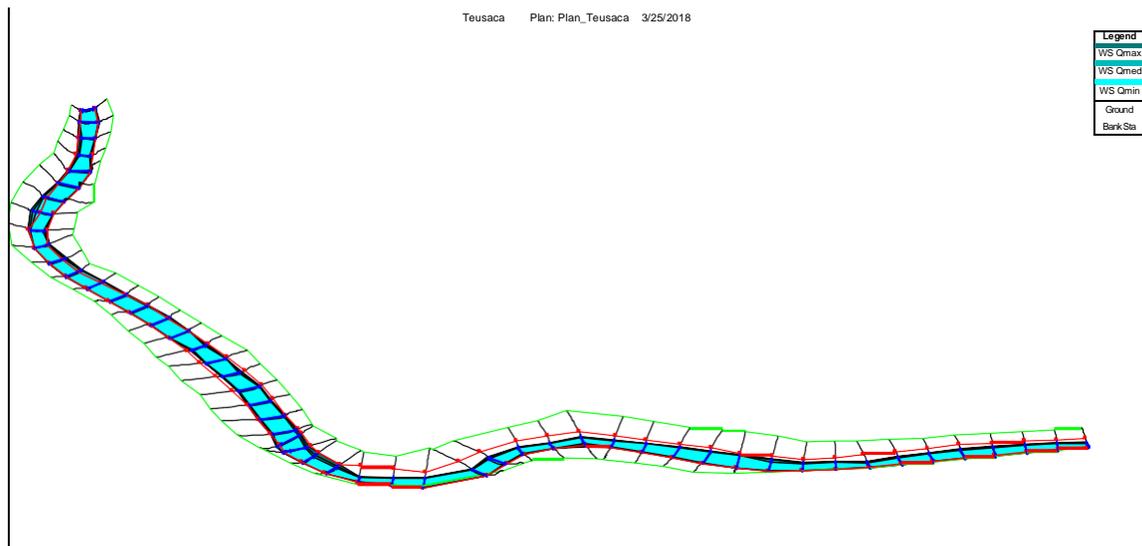


Figura 31. Tramo de modelación río Teusacá

Se hicieron simulaciones de flujo permanente no uniforme para diferentes condiciones de caudal sobre la corriente principal en un rango entre 1.35 y 3.86 m³/s. La condición de frontera establecida aguas abajo fue la de flujo uniforme. Con los resultados se obtuvieron las curvas de calibración de velocidad media U y de profundidad media H contra caudal Q . H se calculó como el área mojada A dividida entre el ancho superficial B . Dichas curvas se ajustaron a las relaciones potenciales de la forma.

$$H = aQ^b$$

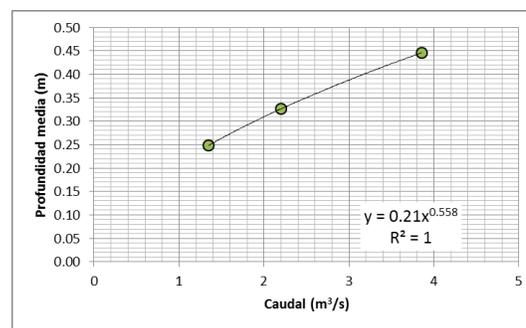
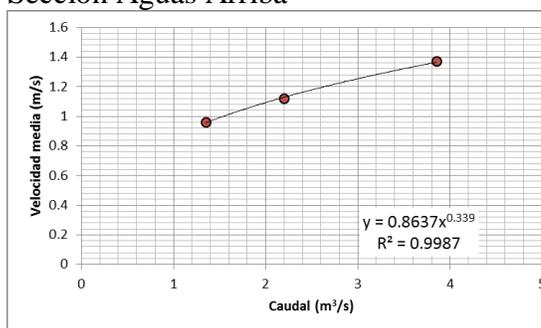
[1]

$$U = \alpha Q^\beta$$

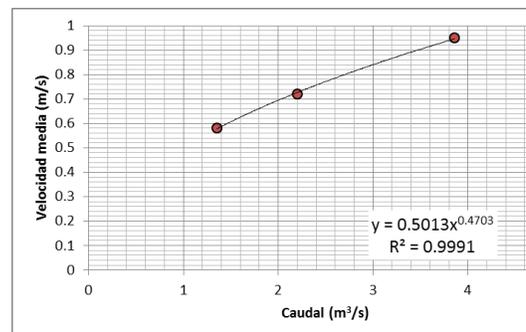
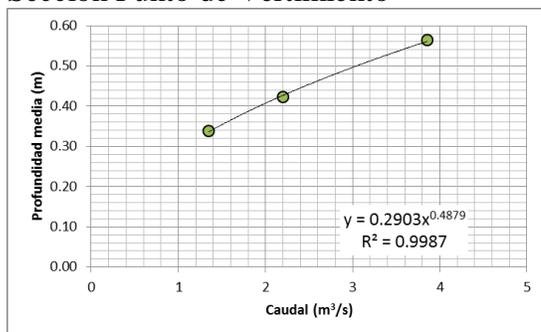
[2]

En la Figura 32 se indican las curvas correspondientes obtenidas para las secciones de los sitio de aguas arriba, punto de vertimiento y aguas abajo del vertimiento y en la Tabla 8 se presentan los coeficientes obtenidos para las diferentes secciones medidas e interpoladas a lo largo del tramo de estudio.

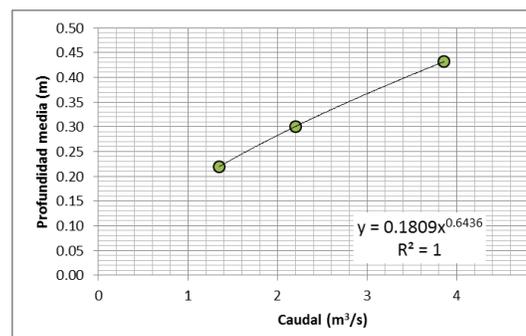
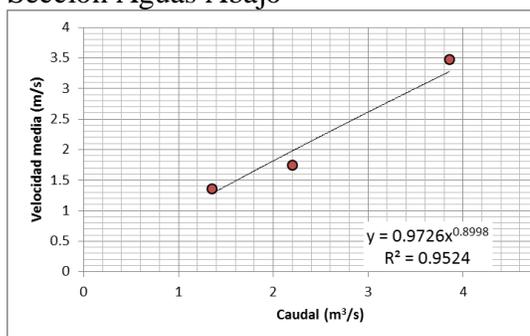
Sección Aguas Arriba



Sección Punto de Vertimiento



Sección Aguas Abajo



Velocidad media – Caudal

Profundidad media – Caudal

Figura 32. Curvas de calibración en la sección sitio de vertimiento

Tabla 8.
Coefficientes de las curvas de calibración

Sección	α	β	a	B
Sección Aguas Arriba	0.8637	0.339	0.21	0.558
Sitio Vertimiento	0.2903	0.4879	0.5013	0.4703
Sección Aguas Abajo	0.9726	0.8998	0.1809	0.6436

4.1.9.1. Consideraciones De Mezcla. Para la implementación del modelo unidimensional de la calidad del agua, es necesario que en el tramo estudiado se alcancen condiciones de mezcla completa. La distancia existente entre el punto de vertimiento y el lugar agua abajo donde se consideran condiciones de mezcla completa (i.e. variación de concentración máxima del 5% en el ancho y profundidad de la sección transversal) se conoce como longitud de mezcla.

De acuerdo con el artículo 3 del decreto 3930 de 2010, la zona de mezcla es un área técnicamente determinada a partir del sitio de vertimiento, indispensable para que se produzca mezcla homogénea de este con el cuerpo receptor; en la zona de mezcla se permite sobrepasar los criterios de calidad de agua para el uso asignado, siempre y cuando se cumplan las normas de vertimiento.

Para determinar la zona o longitud de mezcla L_m se pueden utilizar ensayos de trazadores, aproximaciones empíricas o implementar modelos bidimensionales de transporte de solutos (i.e. ecuación de advección-dispersión integrada en la profundidad).

La extensión de la zona de mezcla depende de la hidráulica y geometría del cuerpo receptor, así como de la forma y localización de la descarga de aguas residuales. En este estudio, el orden de magnitud de la zona de mezcla se determinó aplicando aproximaciones empíricas. En

particular, se recurrió a dos ecuaciones ampliamente utilizadas: las propuesta por Fischer et al. (1979, Ecuación 1 a 3) y por Yotsukura (1968, Ecuación 4), ambas para descarga lateral.

$$L_m = 0.4 \frac{UB^2}{D_{lat}} \quad 1$$

$$D_{lat} = 0.6HU_* \quad 2$$

$$U_* \cong \sqrt[3]{gS_oH}$$

Siendo D_{lat} el coeficiente de dispersión lateral o transversal, U_* la velocidad de fricción y g la aceleración de la gravedad.

$$L_m = 8.52 \frac{UB^2}{H}$$

4

En la Tabla 9, se presentan los resultados para la longitud de mezcla calculada por las anteriores expresiones considerando diversas condiciones hidrodinámicas de la sección transversal de la cabecera de modelación. Para cada caudal, se obtuvo una longitud de mezcla “promedio” la cual da idea del orden de magnitud de la zona requerida para alcanzar condiciones homogéneas de concentración en la sección transversal. Aguas abajo de dicha longitud empiezan a regir los objetivos y criterios de calidad para la destinación del recurso.

Tabla 9.*Longitudes de Mezcla*

U* (m/s)	Dlat	Dx	Fischer Lm1b	Yotsukura Lm2b	Promedio
0.95	0.3215	1.09	69.4	842.1	455.7
0.72	0.1823	1.06	89.1	819.7	454.4
0.58	0.1176	0.95	99.4	736.9	418.2

De acuerdo con los resultados, se espera que la longitud de mezcla esté entre 418 m y 455 m (0.442 km promedio). La longitud de modelación se definió en 0.504 km que abarca la condición de caudales medios y es el promedio para las tres condiciones hidrológicas y para la calibración del modelo se tomaron muestras a la entrada del tramo y en el punto final, no presenta cambios en la pendiente y se evidencia la presencia de una entrada en condiciones de calidad regulares Quebrada San Lorenzo K0+200. Las muestras se tomaron de manera integral en la sección transversal y en la profundidad.

4.1.10. Calidad del Agua

4.1.10.1. Fuente Receptora. Para este caso en particular, la toma de muestras para monitoreo de calidad del agua en el Rio Teusacá, la salida de la PTAR y la Quebrada San Lorenzo, se realizó en un tramo que incluye el punto de vertimiento previsto para la PTAR y que el tramo fuera lo suficientemente largo para asegurar que fuese superior a la longitud máxima de mezcla calculada teóricamente.

Tabla 10.
Parámetros de monitoreo de calidad del agua

PARAMETRO	UNIDADES	Quebrada San Lorenzo	AGUAS ARRIBA	VERTIMIENTO	AGUAS ABAJO
Temperatura	°C	14.8	19.1	19.7	20.9
Conductividad	uS/cm	130	140	765	314
Sólidos Suspendidos Inorgánicos	ml ST/L	12	5	48	6
Oxígeno disuelto	mg/L	7.1	5.6	3.7	5.4
DBO lenta	mg O ₂ /L	0	0	0	0
DBO rápida	mg O ₂ /L	22.7	22.7	19.0	20.8
N – organico	mg N-Norg/L	3.0	3.0	7.3	1.7
N - amoniacal	mg N-NH ₃ /L	0.3	0.3	23.8	5.6
N - Nitrato	mg N-NO ₃ /L	0.1	0.3	1	0.1
Fosforo Organico	mg P/L	0.07	0.07	0.131	0.078
Fosforo Inorganico	mg P/L	0.07	0.07	0.504	0.391
Coliformes Totales	NMP/100 ml	10462	2909	1829	1882
Grasas y Aceites	mg/L	6.1	5	8.3	10
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	36	25	296	85
pH	Unidades	8.1	7.46	7.91	6.83
DBO ₅	mg O ₂ /L	20	20	41	26
DBO soluble	mg O ₂ /L	12	12	10	11
DQO	mg O ₂ /L	50	50	53	54
Fosforo Total	mg P/L	0.07	0.07	0.634	0.468
N – Nitrito	mg N-NO ₂ /L	0.007	0.052	0.007	0.061
N - Total Kjeldahl (NTK)	mg N-Norg/L	3.3	3.3	31.1	7.3
Sólidos sedimentables	ml SS/L	0.5	0.5	0.5	0.5
Sólidos volátiles	ml SST/L	10	5	47	6
Sólidos totales	ml ST/L	22	5	95	12
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	565	269	259	526
Caudal	l/s	229.6	217.2	21.2	247.9

Fuente: CONOSER LTDA

4.1.10.2. Vertimiento presuntivo. Con el tratamiento de las aguas residuales domésticas en la PTAR, se prevé que el vertimiento presente las siguientes características fisicoquímicas, de acuerdo a los diseños de la PTAR La Calera.

Se determinaron dos fases en las cuales se tiene en cuenta el diseño de la planta. Se calculó el caudal de diseño, teniendo en cuenta el numeral D.3.2. De la norma RAS-2000. De acuerdo a este se determinan los valores para cada caudal según el nivel de complejidad del municipio el cual es medio (PIRAGAUTA, 2007)

$$Q_{sm} = \frac{C \cdot P \cdot R}{86400}$$

Dónde:

C: Dotación 120 (L/hab.*d)

P: Población (habitantes)

QSM: Caudal sanitario medio proyectado al año 2020

R: Factor de retorno 0.80 para nivel de complejidad medio

Tabla 11.

Parámetros fisicoquímicos del presunto vertimiento

Parámetro	Unidad	Valor Fase I	Valor Fase II
Caudal de diseño de procesos	l/s	52.58	94.53
DBO	mg/l	20.00	20.00
DQO	mg/l	30.00	30.00
SST.	mg/l	20.00	20.00

Fuente: La consultoría

Valores muy inferiores a los máximos permisibles indicados en la resolución 0631 de 2015.

4.1.10.3. Índice de contaminación: En cuanto a los índices de contaminación por sólidos suspendidos totales (ICOSUS), se reporta que no hay grado de contaminación tanto Aguas Arriba como Aguas Abajo. Entre tanto los índices de contaminación por materia orgánica (ICOMO), indicaron para el punto, Aguas Arriba un nivel de contaminación bajo, mientras que Aguas Abajo este pasó hacer alto;

Situación presentada, debido a que las condiciones del cuerpo de agua Aguas Abajo, como se muestre en lasiguie

De acuerdo con la información obtenida, se pudo determinar el cálculo de los ICO's del vertimiento, la quebrada San Lorenzo, aguas arriba y aguas abajo del río Teusacá, En cuanto a los índices de contaminación por sólidos suspendidos totales (ICOSUS), se reporta que no hay grado de contaminación tanto Aguas Arriba como Aguas Abajo como se muestra en la tabla siguiente..

Entre tanto los índices de contaminación por materia orgánica (ICOMO), indicaron para el punto. Aguas Arriba un nivel de contaminación bajo, mientras que Aguas Abajo este paso hacer alto; situación presentada, debido a que las condiciones del cuerpo de agua Aguas Abajo desmejoraron un poco en cuanto a las concentraciones de DBO5, Coliformes Totales y Oxígeno Disuelto.

Tabla 12.
Parámetros de índices de calidad

INDECE	QUEBRADA SAN LORENZO	AGUAS ARRIBA	VERTIMIENTO	AGUAS ABAJO
ICOMO	0.3033	0.3866	0.7954	0.5977
ICOSUS	0.16	0.29	0.6	0.472

Fuente: Autor del proyecto

4.1.10.3. Resolución 0631 de 2015. En esta resolución se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Tabla 12.*Parámetros aguas residuales domesticas Resolución 0631 de 2015*

PARÁMETRO	UNIDADES	Aguas residuales domesticas – ARD y aguas residuales no domesticas de los prestadores del servicio público del alcantarillado con una carga mayor a 625 Kg/día y menor o igual a 3000 Kg/Día DBO
GENERALES		
pH	Unidades	6,00 - 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	20
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	
Fenoles Totales	mg/L	
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
HIDROCARBUROS		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	mg/L	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	
Compuestos orgánicos Halogenados Adsorbibles	mg/L	
COMPUESTOS DE FOSFORO		
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
COMPUESTOS DE NITRÓGENO		
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte
IONES		
Cianuro Total (CN)	mg/L	0.5
Cloruros (Cl)	mg/L	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO4)	mg/L	Análisis y Reporte
Sulfuros (S2)	mg/L	Análisis y Reporte
METALES Y METALOIDES		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0.1
Cinc (Zn)	mg/L	3
Cobre (Cu)	mg/L	1
Cromo (Cr)	mg/L	0.5
Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0.02
Níquel (Ni)	mg/L	0.5
Plata (Ag)	mg/L	
Plomo (Pb)	mg/L	0.5
OTROS PARÁMETROS PARA ANALISIS		
Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	Aguas residuales domesticas – ARD y aguas residuales no domesticas de los prestadores del servicio público del alcantarillado con una carga mayor a 625 Kg/día y menor o igual a 3000 Kg/Día DBO
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Color Real (Medida de absorbancia a las siguientes longitudes de onda de 463 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte

Fuente. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Los parámetros físico químicos y sus valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domesticas – ARD según la última norma emitida por el ministerio de ambiente, serán tenidos en cuenta en conjunto con el acuerdo, de esta manera buscar cumplir con todas las normas vigentes en materia de vertimientos.

4.1.10.4. Acuerdo 043 De 2016 Objetivos De Calidad. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales está ubicada en la cuenca río Bogotá, específicamente en la subcuenca del Río Teusacá, el vertimiento proyectado en la corriente principal del río Teusacá. El acuerdo 043 de 2006 en su artículo segundo, inciso 12.2 indica lo siguiente; Cuencal de Río Teusacá código: 212013

4.1.10.5. Subcuenta del Río medio y bajo Teusacá. Compreendida por río Teusacá desde la descarga del Embalse San Rafael hasta su desembocadura en el río Bogotá, comprendiendo la quebrada Mi Padre Jesús corresponden a la clase IV.

CLASE IV.- Corresponde a valores de los usos agrícola con restricciones y pecuario. En la siguiente Tabla se expresan los valores de la Clase IV, así:

Tabla 13.*Parámetros Clase IV Acuerdo 043 de 2006*

PARAMETRO	EXPRESADO COMO	VALOR MAS RESTRICTIVO (MAXIMO QUE SE PUEDE OBTENER)
PARAMETROS ORGANICOS		
DBO	mg/l	50
Coliformes Totales	NMP/100 ml	20000
PARAMETROS NUTRIENTES		
Nitritos	mg/l	10
SOLIDOS		
solidos suspendidos totales	mg/l	40
PARAMETROS DE INTERES SANITARIO		
Aluminio	mg/l	5
Arsenico	CL 96/50	0.1
Berilio	CL 96/50	0.1
Boro	mg/l	0.3-0.4
Cadmio	CL 96/50	0.01
Cinc	CL 96/50	2
Cobalto	mg/l	0.05
Cobre	CL 96/50	0.2
Cromo	mg/l	0.1
Fluor	mg/l	1
Hierro	mg/l	5
Litio	mg/l	2.5
Manganeso	mg/l	0.2
Mercurio	mg/l	0.01
Molibdeno	mg/l	0.01
Niquel	mg/l	0.2
Ph	Unidades	4.5-9.0
Plomo	mg/l	0.1
Sales	mg/l	3000
Selenio	mg/l	0.02
Vanadio	mg/l	0.1

Fuente: CAR. Acuerdo 043 de 2006

CL 96 50: Denomínese a la concentración de una sustancia, elemento o compuesto, solo o en combinación, que produce la muerte al cincuenta por ciento (50%) de los organismos sometidos a bioensayos en un período de noventa y seis (96) horas.

4.2. Ejecutar la modelación de calidad de aguas utilizando el software QUAL2Kw, teniendo en cuenta la hidrología, la hidráulica y climatología del área del proyecto

4.2.1. Modelación De Calidad De Agua.

4.2.1.1. Implementación Del Modelo. *Ingreso de parámetros al modelo de calidad.* En esta sección se describe el montaje del modelo, haciendo énfasis en el procesamiento preliminar de la información de calidad del agua obtenida en campo y laboratorio en relación con las variables modeladas en QUAL2Kw v.5.1. En la siguiente tabla se presenta los parámetros de entrada al modelo.

Tabla 14.

Parámetros de monitoreo de calidad de agua

Parámetros	Unidad
Temperature	C
Conductivity	umhos
Inorganic Solids	mgD/L
Dissolved Oxygen	mg/L
CBODslow	mgO2/L
CBODfast	mgO2/L
Organic Nitrogen	ugN/L
NH4-Nitrogen (Cargado como Nitrógeno Amoniacal)	ugN/L
NO3-Nitrogen	ugN/L
Organic Phosphorus	ugP/L
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L
Phytoplankton	ugA/L
Detritus (POM)	mgD/L
Pathogen	cfu/100 mL
Alkalinity	mgCaCO3/L
pH	s.u.

Fuente: Qual 2Kw V 5.1

Se presenta a continuación como se cargó cada parámetro monitoreado.

Temperatura: Ingresada al modelo como se reporta

Conductividad: Ingresada al modelo como se reporta

Solidos Inorgánicos: Solidos Totales – Solidos Volátiles

Oxígeno Disuelto: Ingresada al modelo como se reporta

DBO lenta: Ingresada al modelo como 0 por recomendación, ya que el tiempo de viaje es menor a 5 días.

DBO lenta

- Materia orgánica *soluble* de difícil descomposición
- Opción 1

$$\begin{aligned} &\text{➤ } DBO_{C_L} = 0 \\ &\text{➤ } DBO_{C_R} = DBO_{CFN_u} \end{aligned}$$

- Opción 2

$$\begin{aligned} &\text{➤ } DBO_{C_R} = DBO_{CFN_u} \\ &\text{➤ } DBO_{C_L} = r_{oc} COD - DBO_R \end{aligned}$$

- Otras aproximaciones útiles para el cálculo de DBO lenta

$$DBO_{C_L} = DQO_F - DBO_{CFN_u}$$

$$DBO_{C_L} = 2,69 \text{ COT}$$

¡Recomendación: usar la opción 1 tratando de que el tiempo de viaje en el segmento o tramo sea menor de 5 días!

DBO rápida: Para esta se utilizó la siguiente expresión

DBO rápida

- Materia orgánica soluble de fácil descomposición
- Si se usa datos de DBO_5 , la muestra debe ser filtrada e inhibida

$$DBO_{rápida} = DBO_{CFN_u} = \frac{DBO_{CFN_5}}{1 - e^{-k_1 \cdot 5}}$$

DBO_{CFN_5} : DBO_5 soluble o filtrada (mg O_2/L)

FN : muestra filtrada e inhibida

k_1 (d^{-1}): constante de la botella

*La constante de a botella para el caso es 0.15 (d^{-1})

Nitrógeno Orgánico: Para esta se utilizó la siguiente expresión

$$N_{org} = NTK - NH_4^+$$

Nitrógeno Amoniacal: Ingresada al modelo como se reporta

Nitrato: Ingresada al modelo como se reporta

Fosforo Orgánico: Para esta se utilizó la siguiente expresión

$$P_{org} = PT - SRP$$

Fosforo Inorgánico: Ingresada al modelo como se reporta

Fitoplancton: No requerido

Detritus: No requerido

Patógenos: Ingresada al modelo como se reporta

Alcalinidad: Ingresada al modelo como se reporta

pH: Ingresada al modelo como se reporta

4.2.1.2. Discretización del modelo. El modelo fue dividido en 12 elementos de 0.042 m cada uno. Esta discretización no obedece directamente a criterios de estabilidad y precisión numérica, ya que estos no son estrictamente relevantes en modelos en estado estable de sistemas altamente advectivos como los ríos (pp. 207 Chapra, 1997). Los gradientes de concentración en la dirección longitudinal para sustancias conservativas son despreciables en el caso de descargas continuas (Rutherford, 1994), lo que refuerza lo anterior.

4.2.1.3. Anotaciones adicionales.

- El número de días simulados internamente fue de 3.
- El paso de tiempo se definió en 2.25 minutos.
- El método de integración fue el de Euler.
- El método de solución para el pH fue el de Brent.
- Se asignó una conductividad térmica del sedimento de $1.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y una difusión térmica del sedimento de $0.0051 \text{ cm}^2/\text{s}$, valores típicos para lodos.
- La abertura del cielo para la entrada de radiación de onda larga se supuso del 100% para no alterar los cálculos por defecto.
- Los parámetros de luz y calor se dejaron con los valores por defecto asignados en el software.
- Las tasas de desnitrificación y de crecimiento máximo de algas de fondo se definieron ambas en cero.

4.2.2. Calibración Del Modelo.

4.2.2.1. Algoritmo de calibración. Para la calibración automática del modelo matemático se utilizó la herramienta incorporada en QUAL2Kw que utiliza un algoritmo genético como técnica iterativa de búsqueda del set de parámetros óptimos que maximiza el ajuste entre los valores simulados y los medidos. La configuración de dicho algoritmo se dejó por defecto, a excepción del número de generaciones y la población de cada generación, los cuales se definieron en 30 y 100, respectivamente, para un total de 3100 simulaciones, incluyendo la población inicial (generación 0).

En el siguiente cuadro se presenta como se utilizó el algoritmo genético para la calibración del modelo de calidad de aguas.

Tabla 15.

Algoritmo de calibración

Auto-calibration genetic algorithm control:		
Random number seed	123456	seed
Model runs in a population (<=512)	100	np
Generations in the evolution	30	ngen
Digits to encode genotype (<=6)	5	nd
Crossover mode (1, 2, 3, 4, 5, 6, or 7)	3	icross
Crossover probability (0-1):	0,85	pcross
Mutation mode (1, 2, 3, 4, 5, or 6)	2	imut
Initial mutation rate (0-1):	0,005	pmut
Minimum mutation rate (0-1):	0,0005	pmutmn
Maximum mutation rate (0-1):	0,25	pmutmx
Relative fitness differential (0-1):	1	fdif
Reproduction plan (1, 2, or 3):	1	irep
Elitism (0 or 1):	1	ielite
Restart from previous evolution (0 or 1):	0	irestart

Fuente: La consultoría Qual 2 K

En este se indica cual es la Población Inicial y generaciones de evolución. Luego de tener el modelo con las condiciones de campo obtenidas se procedió a realizar la simulación de los diferentes escenarios.

4.2.2.2 Parámetros y rangos de calibración. De acuerdo con las variables de salida utilizadas para la calibración, se definieron los siguientes parámetros y rangos de calibración. Para facilitar la comprensión de su selección, los parámetros se presentan por las variables que representan de manera directa. Los rangos se establecieron a partir de una calibración manual llevada a cabo de manera preliminar y exploratoria, ayudada de recomendaciones de la literatura especializada (e.g. Bowie et al., 1987).

SST

- Velocidad de sedimentación (vss). Rango entre 0 y 2 d-1.

DBO última

- Tasa de hidrólisis de la CDBO lenta (k_{hc}). Rango entre 0 y 5 d-1.
- Tasa de oxidación de la CDBO lenta (k_{dcs}). Rango entre 0 Y 0.5 d-1.
- Tasa de oxidación de la CDBO rápida (k_{dc}). Rango entre 0 y 5 d-1.

Cadena de nitrógeno

- Hidrólisis del nitrógeno orgánico (k_{hn}). Rango entre 0 y 5 d-1.
- Velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (v_{on}). Rango entre 0 y 2 m d-1.
- Tasa de nitrificación (k_n). Rango entre 0 y 10 d-1.

Cadena de fósforo

- Hidrólisis del fósforo orgánico. (k_{hp}) Rango entre 0 y 5 d-1.
- Velocidad de sedimentación del fósforo orgánico (v_{op}). Rango entre 0 y 2 m d-1.
- Velocidad de sedimentación del fósforo inorgánico (v_{ip}). Rango entre 0 y 2 m d-1.

Coliformes totales

- Velocidad de sedimentación (v_{path}). Rango entre 1 y 5 m d-1.

Los parámetros y constantes restantes que no se calibraron se dejaron con sus valores por defecto.

4.3. Realizar los escenarios de simulación para las diferentes condiciones de cantidad y calidad de las aguas, del vertimiento de aguas residuales y de la fuente receptora

4.3.1. Condiciones De Escenarios De Calidad. Para el ecosistema descrito anteriormente y el cual cuenta con un modelo calibrado en la versión Qual 2Kw, se simularon diferentes escenarios en donde se realizó variación de los caudales de la fuente receptora y cambios en las condiciones de calidad del vertimiento para la Fase I y para Fase II.

Escenario 1: Condiciones actuales de la fuente receptora, caudal vertimiento actual (21,2 l/s, este fue el resultado de la caracterización teniendo en cuenta que es un flujo discontinuo y que el aforo fue realizado al inicio de la descarga del SBR, la planta actualmente tiene un caudal de diseño de 32 l/s) y sin tratamiento.

Escenario 2: Condiciones actuales de la fuente receptora, caudal vertimiento actual (21,2 l/s, este fue el resultado de la caracterización teniendo en cuenta que es un flujo discontinuo y que el aforo fue realizado al inicio de la descarga del SBR, la planta actualmente tiene un caudal de diseño de 32 l/s) y con tratamiento.

Escenario 3: Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase I (61,53 l/s) sin tratamiento.

Escenario 4: Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase I (61,53 l/s) con tratamiento.

Escenario 5: Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase II (86,50 l/s) sin tratamiento.

Escenario 6: Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase II (86,50 l/s) con tratamiento.

4.3.2. Resultados Del Modelo De Calidad. A continuación, se presenta los resultados de los escenarios simulados presentados anteriormente.

4.3.2.1. Escenario 1. Condiciones actuales de la fuente receptora, caudal vertimiento actual 21,2 l/s y sin tratamiento.

Resch_Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mg/DL)	DO(mgO2/L)	BODs (mgO2)	TODI (mgO2)	No(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po (ugP/L)	org P (ugP/L)	Phyto (ugA4)	viritus(mg/D)	Pathogen	constituent	Alk	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	22.70	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	4.59	5.53	0.00	22.61	2797.13	500.98	299.54	68.81	69.24	0.00	0.00	2636.49	4.99	25.71	7.62
	0.44	195.63	7.81	5.32	0.00	22.21	2989.92	2780.34	361.45	73.16	106.64	0.00	0.00	2346.68	5.27	50.49	7.93
	0.40	195.63	7.22	5.26	0.00	22.13	2794.72	2973.23	361.00	72.00	105.37	0.00	0.00	2152.29	5.26	51.15	8.11
	0.36	195.63	6.68	5.21	0.00	22.05	2611.56	3153.92	360.55	70.85	104.12	0.00	0.00	1978.44	5.25	51.76	8.29
	0.32	163.46	8.90	6.10	0.00	22.32	2686.62	1869.27	232.76	69.80	86.91	0.00	0.00	5807.81	5.66	44.42	8.35
	0.27	163.46	8.52	6.07	0.00	22.28	2575.34	1979.30	232.68	69.15	86.37	0.00	0.00	5494.25	5.66	44.78	8.47
	0.23	163.46	8.15	6.03	0.00	22.23	2468.41	2084.93	232.59	68.50	85.85	0.00	0.00	5204.06	5.65	45.12	8.57
	0.19	163.46	7.79	6.00	0.00	22.19	2365.65	2186.32	232.51	67.86	85.32	0.00	0.00	4935.09	5.64	45.44	8.66
	0.15	163.46	7.45	5.96	0.00	22.14	2266.93	2283.61	232.42	67.22	84.80	0.00	0.00	4685.41	5.64	45.74	8.72
	0.11	163.46	7.13	5.93	0.00	22.10	2172.09	2376.96	232.33	66.59	84.29	0.00	0.00	4453.28	5.63	46.02	8.78
	0.06	163.46	6.82	5.90	0.00	22.05	2080.99	2466.49	232.24	65.97	83.77	0.00	0.00	4237.12	5.62	46.29	8.83
	0.02	163.46	6.62	5.88	0.00	22.02	1995.46	2550.89	232.18	65.46	83.53	0.00	0.00	4076.99	5.62	46.53	8.87
Terminus	0.00	163.46	6.62	5.88	0.00	22.02	1995.46	2550.89	232.18	65.46	83.53	0.00	0.00	4076.99	5.62	46.53	8.87

Figura 33. Resultados escenario 1.

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo, después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, la condiciones de calidad del río baja, sin embargo por ser muy bajo el cambio de calidad el río recupera rápidamente en el tramo la calidad del agua.

4.3.2.2. Escenario 2. Condiciones actuales de la fuente receptora, caudal vertimiento actual 21,2 lps y con tratamiento.

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	BODs (mgO2/L)	BODl (mgO2/L)	NOx(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po (ugP/L)	org P (ugP/L)	Phyto (ugA/L)	eritrus (mgD)	Pathogen	constituent	Aik	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	37.90	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	4.59	5.50	0.00	37.77	2797.13	501.01	299.52	68.81	69.24	0.00	0.00	2636.49	4.99	25.71	7.61
	0.44	140.89	5.51	5.26	0.00	37.67	2383.07	620.05	290.19	70.45	62.56	0.00	0.00	2603.09	4.54	24.64	7.72
	0.40	140.89	5.09	5.18	0.00	37.56	2228.05	773.63	289.72	69.33	62.04	0.00	0.00	2386.06	4.53	25.18	7.90
	0.36	140.89	4.71	5.10	0.00	37.45	2082.55	917.71	289.23	68.23	61.53	0.00	0.00	2192.24	4.52	25.67	8.09
	0.32	135.55	7.94	6.03	0.00	37.61	2428.20	718.12	196.37	68.47	65.39	0.00	0.00	5910.34	5.29	31.09	8.24
	0.27	135.55	7.60	5.96	0.00	37.54	2327.82	817.59	196.26	67.83	65.07	0.00	0.00	5590.83	5.28	31.42	8.38
	0.23	135.55	7.27	5.93	0.00	37.48	2231.34	913.14	196.14	67.20	64.75	0.00	0.00	5295.26	5.28	31.73	8.50
	0.19	135.55	6.95	5.88	0.00	37.42	2138.63	1004.90	196.03	66.57	64.44	0.00	0.00	5021.40	5.27	32.02	8.59
	0.15	135.55	6.65	5.83	0.00	37.35	2049.55	1093.01	195.92	65.95	64.13	0.00	0.00	4767.27	5.26	32.30	8.67
	0.11	135.55	6.36	5.78	0.00	37.29	1963.96	1177.59	195.80	65.33	63.81	0.00	0.00	4531.06	5.26	32.56	8.73
	0.06	135.55	6.08	5.73	0.00	37.23	1881.75	1258.78	195.69	64.72	63.51	0.00	0.00	4311.16	5.25	32.80	8.78
	0.02	135.55	5.90	5.70	0.00	37.18	1804.56	1335.23	195.59	64.23	63.39	0.00	0.00	4148.10	5.25	33.03	8.83
Terminus	0.00	135.55	5.90	5.70	0.00	37.18	1804.56	1335.23	195.59	64.23	63.39	0.00	0.00	4148.10	5.25	33.03	8.83

Figura 34. Resultados escenario 2.

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo, después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, las condiciones de calidad del río baja.

4.3.2.3 Escenario 3. Fase I. Fuente con caudal ecológico (0,055) y caudal de vertimiento

Fase I (61,53 l/s) sin tratamiento.

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	BODs (mgO2/L)	BODl (mgO2/L)	NOx(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po (ugP/L)	org P (ugP/L)	Phyto (ugA/L)	eritrus (mgD)	Pathogen	constituent	Aik	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	37.90	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	3.75	5.22	0.00	37.47	2600.34	693.18	298.59	66.49	66.59	0.00	0.00	2233.43	4.96	26.39	7.68
	0.44	469.94	23.32	4.23	0.00	58.44	4602.53	13360.08	667.02	97.74	289.10	0.00	0.00	1743.29	6.70	170.37	8.04
	0.40	469.94	20.06	4.05	0.00	58.18	4165.82	13786.14	664.95	95.02	281.04	0.00	0.00	1509.63	6.67	171.86	8.16
	0.36	469.94	17.26	3.88	0.00	57.93	3767.76	14172.46	662.64	92.36	273.33	0.00	0.00	1311.61	6.64	173.20	8.27
	0.32	244.62	13.03	5.94	0.00	44.56	3108.59	5125.77	289.67	76.67	137.24	0.00	0.00	6890.48	6.27	82.76	8.34
	0.27	244.62	12.28	5.87	0.00	44.47	2964.13	5267.82	289.62	75.79	135.85	0.00	0.00	6432.30	6.27	83.24	8.42
	0.23	244.62	11.58	5.79	0.00	44.38	2825.90	5403.51	289.56	74.91	134.48	0.00	0.00	6013.89	6.26	83.69	8.49
	0.19	244.62	10.92	5.72	0.00	44.29	2693.68	5533.09	289.50	74.04	133.13	0.00	0.00	5631.12	6.25	84.12	8.55
	0.15	244.62	10.29	5.65	0.00	44.20	2567.21	5656.80	289.43	73.18	131.79	0.00	0.00	5280.32	6.24	84.52	8.60
	0.11	244.62	9.70	5.58	0.00	44.11	2446.27	5774.85	289.36	72.33	130.48	0.00	0.00	4958.20	6.23	84.90	8.64
	0.06	244.62	9.15	5.51	0.00	44.02	2330.65	5887.48	289.28	71.49	129.18	0.00	0.00	4661.85	6.22	85.26	8.68
	0.02	244.62	8.80	5.47	0.00	43.95	2223.05	5992.89	289.23	70.83	128.44	0.00	0.00	4447.91	6.21	85.59	8.72
Terminus	0.00	244.62	8.80	5.47	0.00	43.95	2223.05	5992.89	289.23	70.83	128.44	0.00	0.00	4447.91	6.21	85.59	8.72

Figura 35. Resultado escenario 3 Fase I

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo, después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, las condiciones de calidad del río baja.

4.3.2.4. Escenario 4. Fase I. Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase I

(61,53 l/s) con tratamiento.

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgDL)	DO(mgO2/L)	BODs (mgO2)	BODf(mgO2)	No(ugNL)	NH4(ugNL)	NO3(ugNL)	Po (ugP/L)	org P (ugPL)	Phyto (ugA/L)	etritus (mgD)	Pathogen	constituent	Alk	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	37.90	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	3.75	5.22	0.00	37.47	2600.34	693.18	298.59	66.49	66.59	0.00	0.00	2233.43	4.96	26.39	7.68
	0.44	145.28	10.61	4.34	0.00	37.50	1114.28	439.22	245.59	81.85	31.49	0.00	0.00	3176.74	2.33	16.66	7.45
	0.40	145.28	9.12	4.22	0.00	37.30	1010.64	541.57	244.59	79.59	31.52	0.00	0.00	2743.33	2.32	17.03	7.49
	0.36	145.28	7.85	4.10	0.00	37.10	915.97	635.05	243.54	77.38	31.55	0.00	0.00	2378.35	2.31	17.36	7.51
	0.32	135.15	10.03	6.03	0.00	37.55	2192.10	517.17	148.31	71.68	56.72	0.00	0.00	7224.83	4.82	30.08	8.04
	0.27	135.15	9.45	5.96	0.00	37.47	2090.95	617.29	148.21	70.86	56.36	0.00	0.00	6743.64	4.81	30.42	8.17
	0.23	135.15	8.91	5.89	0.00	37.39	1994.14	713.09	148.11	70.04	56.01	0.00	0.00	6304.71	4.80	30.75	8.28
	0.19	135.15	8.40	5.83	0.00	37.30	1901.49	804.72	148.02	69.23	55.66	0.00	0.00	5903.52	4.80	31.05	8.39
	0.15	135.15	7.92	5.76	0.00	37.22	1812.84	892.34	147.92	68.43	55.32	0.00	0.00	5536.10	4.79	31.34	8.48
	0.11	135.15	7.47	5.70	0.00	37.14	1728.04	976.10	147.82	67.64	54.98	0.00	0.00	5198.92	4.78	31.61	8.55
	0.06	135.15	7.04	5.64	0.00	37.06	1646.93	1056.16	147.73	66.85	54.65	0.00	0.00	4888.87	4.77	31.87	8.61
	0.02	135.15	6.77	5.61	0.00	37.00	1571.44	1130.91	147.65	66.23	54.52	0.00	0.00	4664.67	4.77	32.10	8.67
Terminus	0.00	135.15	6.77	5.61	0.00	37.00	1571.44	1130.91	147.65	66.23	54.52	0.00	0.00	4664.67	4.77	32.10	8.67

Figura 36. Resultado escenario 4.

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, la condiciones de calidad del río baja.

4.3.2.5. Escenario 5. Fase II. Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase II (86,50 l/s) sin tratamiento.

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgDL)	DO(mgO2/L)	BODs (mgO2)	BODf (mgO2)	No(ugNL)	NH4(ugNL)	NO3(ugNL)	Po (ugP/L)	org P (ugPL)	Phyto (ugA/L)	etritus (mgD)	Pathogen	constituent	Alk	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	37.90	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	3.75	5.22	0.00	37.47	2600.34	693.18	298.59	66.49	66.59	0.00	0.00	2233.43	4.96	26.39	7.68
	0.44	522.07	27.14	4.14	0.00	61.83	5003.91	15278.75	725.56	103.39	326.16	0.00	0.00	1749.07	6.98	192.83	8.03
	0.40	522.07	23.92	3.99	0.00	61.61	4572.22	15700.59	723.56	100.91	318.62	0.00	0.00	1544.45	6.96	194.30	8.14
	0.36	522.07	21.08	3.85	0.00	61.39	4175.42	16086.62	721.35	98.48	311.34	0.00	0.00	1367.46	6.93	195.64	8.24
	0.32	279.74	14.68	5.79	0.00	46.79	3293.36	6482.36	337.26	80.02	160.70	0.00	0.00	6552.49	6.41	97.49	8.33
	0.27	279.74	13.89	5.72	0.00	46.70	3143.74	6629.39	337.20	79.14	159.15	0.00	0.00	6139.34	6.40	97.99	8.40
	0.23	279.74	13.15	5.65	0.00	46.61	3000.47	6769.96	337.14	78.27	157.62	0.00	0.00	5760.33	6.39	98.45	8.46
	0.19	279.74	12.44	5.58	0.00	46.52	2863.29	6904.30	337.07	77.40	156.11	0.00	0.00	5412.09	6.38	98.90	8.52
	0.15	279.74	11.77	5.51	0.00	46.43	2731.97	7032.65	336.99	76.55	154.62	0.00	0.00	5091.59	6.38	99.32	8.57
	0.11	279.74	11.14	5.45	0.00	46.34	2606.28	7155.25	336.90	75.70	153.16	0.00	0.00	4796.14	6.37	99.72	8.61
	0.06	279.74	10.54	5.39	0.00	46.26	2486.00	7272.31	336.81	74.86	151.71	0.00	0.00	4523.31	6.36	100.09	8.65
	0.02	279.74	10.16	5.35	0.00	46.20	2373.83	7382.10	336.75	74.19	150.86	0.00	0.00	4325.56	6.35	100.44	8.68
Terminus	0.00	279.74	10.16	5.35	0.00	46.20	2373.83	7382.10	336.75	74.19	150.86	0.00	0.00	4325.56	6.35	100.44	8.68

Figura 37. Resultados escenario 5 Fase II

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, la condiciones de calidad del río baja.

4.3.2.6. Escenario 6. Fase II. Fuente con caudal ecológico y caudal de vertimiento Fase II

(86,50 l/s) con tratamiento.

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO2/L)	BODs(mgO2)	BODf (mgO2)	Nc(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po (ugP/L)	org P (ugP/L)	Phyto (ugA/L)	stritus (mgD)	Pathogen	constituent	Alk	pH
Cabecera	0.50	140.00	5.00	5.60	0.00	37.90	3000.00	300.00	300.00	70.00	70.00	0.00	0.00	2909.00	5.00	25.00	7.46
	0.48	140.00	3.75	5.22	0.00	37.47	2600.34	693.18	298.59	66.49	66.59	0.00	0.00	2233.43	4.96	26.39	7.68
	0.44	146.11	12.06	4.26	0.00	37.57	926.10	353.12	237.47	84.91	26.18	0.00	0.00	3443.12	1.92	14.96	7.38
	0.40	146.11	10.63	4.16	0.00	37.40	848.07	430.25	236.58	82.90	26.45	0.00	0.00	3031.27	1.92	15.23	7.40
	0.36	146.11	9.36	4.07	0.00	37.24	776.18	501.31	235.67	80.92	26.71	0.00	0.00	2677.64	1.91	15.49	7.41
	0.32	136.15	10.43	5.89	0.00	37.57	2054.61	472.10	151.71	73.39	53.24	0.00	0.00	7019.08	4.49	28.50	7.97
	0.27	136.15	9.87	5.82	0.00	37.50	1962.15	563.67	151.60	72.58	52.97	0.00	0.00	6575.12	4.49	28.82	8.08
	0.23	136.15	9.34	5.77	0.00	37.42	1873.56	651.38	151.50	71.78	52.72	0.00	0.00	6168.50	4.48	29.12	8.19
	0.19	136.15	8.84	5.71	0.00	37.34	1788.71	735.36	151.40	71.00	52.46	0.00	0.00	5795.38	4.48	29.40	8.29
	0.15	136.15	8.37	5.65	0.00	37.26	1707.44	815.76	151.29	70.21	52.20	0.00	0.00	5452.39	4.47	29.67	8.38
	0.11	136.15	7.92	5.60	0.00	37.19	1629.61	892.70	151.18	69.44	51.95	0.00	0.00	5136.49	4.46	29.92	8.46
	0.06	136.15	7.49	5.54	0.00	37.11	1555.10	966.32	151.08	68.67	51.70	0.00	0.00	4844.99	4.46	30.16	8.52
	0.02	136.15	7.22	5.51	0.00	37.06	1485.61	1035.20	150.99	68.07	51.63	0.00	0.00	4633.15	4.45	30.38	8.59
Terminus	0.00	136.15	7.22	5.51	0.00	37.06	1485.61	1035.20	150.99	68.07	51.63	0.00	0.00	4633.15	4.45	30.38	8.59

Figura 38. Resultado Escenario 6 Fase II.

El comportamiento luego del vertimiento es estable, sin embargo, después de la entrada de la Quebrada San Lorenzo 200 metros aguas abajo del punto de vertimiento, la condición de calidad del río baja.

4.4. Comparar los resultados obtenidos de los diferentes escenarios simulados, con el fin de establecer las capacidades de asimilación de la fuente receptora en condiciones de caudales variables y los impactos que genera el vertimiento.

4.4.1. Comparación De Escenarios. A continuación, se presentan gráficas comparativas de los escenarios modelados para los principales agentes contaminantes (DBOf, SST) además del pH. En todas las gráficas se incluye una recta con la máxima magnitud permisible por el acuerdo 043 de 2006.

4.5. Determinar si existen conflicto, entre los usos del agua, aguas abajo del vertimiento y la calidad establecida en los objetivos de calidad establecido en el acuerdo 46 del 2006

4.5.1. DBO. El acuerdo 043 de 2006 establece que el valor máximo que se puede obtener para la DBO5 es de 50 mg/L.

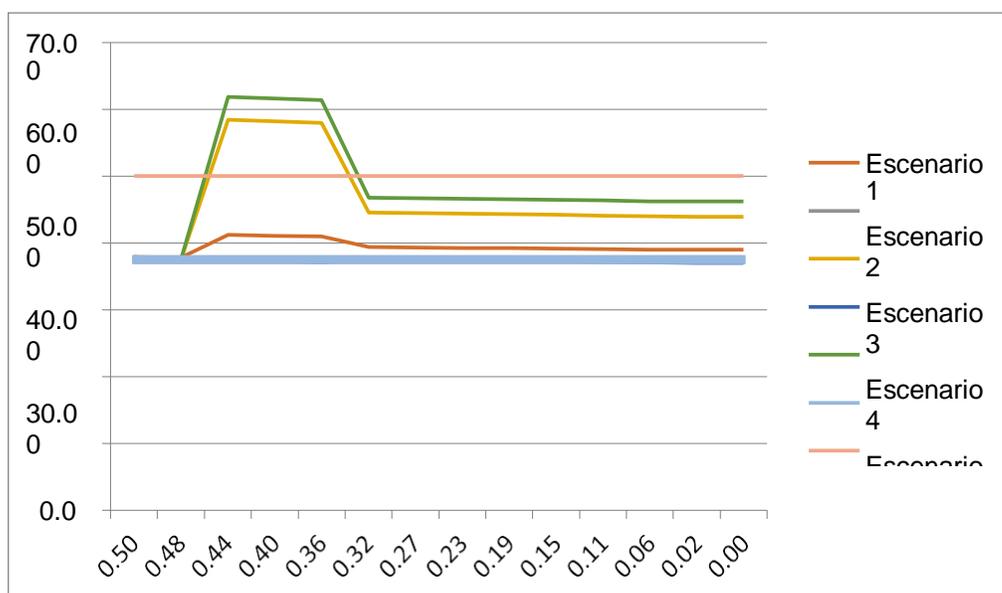


Figura 39. Comparación DBOf

Fuente: Autor del proyecto de investigación

4.5.2. Sólidos suspendidos Totales. En la Figura 40 se presenta la comparación de los escenarios modelados para sólidos suspendidos, los cuales se puede obtener un valor máximo de 40 mg/L según lo establecido en el acuerdo 043 de 2006.

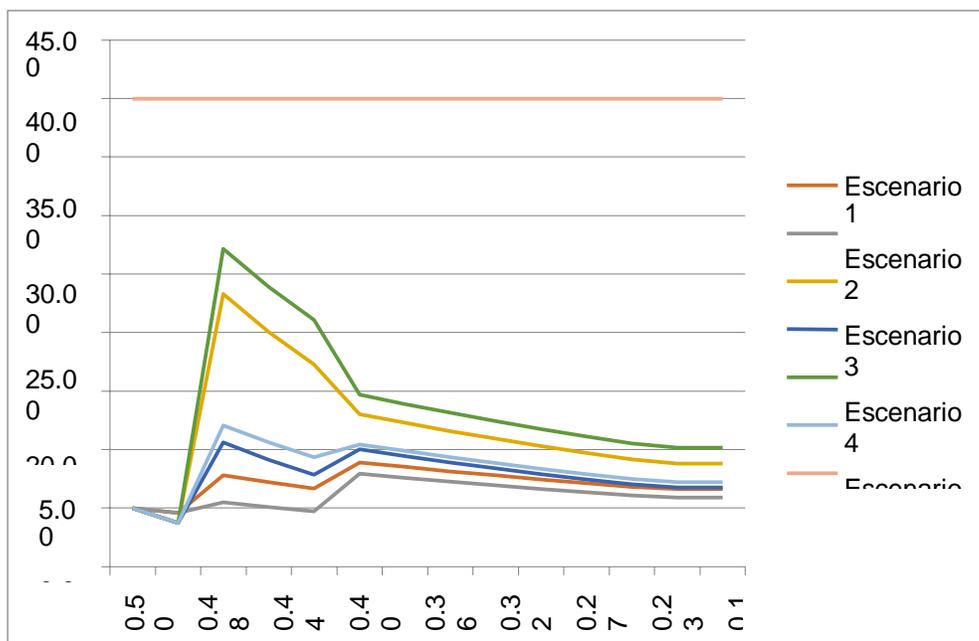


Figura 40. Comparación SST

Fuente: Autor del proyecto de investigación

Conclusiones

La caracterización de calidad fisicoquímica y bacteriológica del Rio Teusacá en el tramo de este estudio, señala que el cuerpo de agua presenta condiciones de calidad del agua buenas, contaminación por materia orgánica es baja, bajas concentraciones de sólidos suspendidos y nutriente según los índices de calidad ICOMO e ICOSUS.

En la ejecución del modelo de calidad de aguas se definen las condiciones iniciales en la fuente hídrica, la cual presenta condiciones de caudal permanente que permite una alta dilución de contaminantes, se realizaron los cálculos hidráulicos y se determinó una longitud de mezcla inferior a los 500 metros.

Se definieron 6 escenarios de modelación, en general para condiciones promedio el vertimiento es asimilado en 80 % en el tramo de modelación. Por otro lado, bajo condiciones críticas de caudales ecológicos y vertimientos sin tratamientos se observa la afectación en el tramo de la condición inicial de la DBO, se recomienda en todos los casos realizar vertimiento tratado con el fin de minimizar los efectos a la fuente superficial, así mismo se recomienda la supervisión y caracterización de la Quebrada San Lorenzo, debido a que esta genera mayor carga contaminante que pueden afectar los Objetivos de Calidad Planteados para el tramo del río Teusacá.

Con base en los resultados de modelación de la calidad del agua por efecto del vertimiento, se obtiene que es viable, desde el punto de vista técnico, realizar las descargas de aguas

residuales domésticas. Las observaciones de los parámetros aguas abajo del vertimiento, muestran estabilización y aumento en la concentración de oxígeno disuelto y disminución de la concentración para todos los parámetros, por efecto de la capacidad de asimilación de la carga orgánica aportada que se daría por el vertimiento, señalando la capacidad de dispersión y autodepuración de la corriente.

Al realizar el análisis del modelamiento y con los resultados de laboratorio obtenidos en cuanto a la calidad de agua de las fuentes y a la caracterización del vertimiento, es evidente que el recurso cumple con los criterios establecidos en el Acuerdo 43 de 2006 “Objetivos de Calidad del Río Bogotá”.

Referencias

- BEATIRZ URIBE BOTERO . (23 de diciembre de 2010). Decreto 3930 de 2010. *DECRETO NÚMERO 4728*. BOGOTA, COLOMBIA: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE.
- calderon. (septiembre de 2015). *Dr. calderon labs* . Obtenido de Dr. calderon labs :
http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Interpretacion_Analisis_de_Aguas.htm
- calderonlabs. (2013). *IMPACTOS AMBIENTALES DE LA DBO EN DIFERENTES CUENCAS HIDROGRAFICA* . MEDELLIN.
- CARREÑO, J. P. (2015). *MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RIO AZUL, MUNICIPIO DE PIJAO DEPARTAMENTO DEL QUINDIO*. armedia : Cooperacion Utonoma Regional Del Quindio.
- Colombia.Leyes Y Decretos. (23 de DICIEMBRE de 2011). *OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTA*. Obtenido de OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTA:
http://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3841
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR. (17 de octubre de 2006). ACUERDO NÚMERO 43 DEL 17 DE OCTUBRE DE 2006 . *ACUERDO NÚMERO 43 DEL 17 DE OCTUBRE DE 2006* . bogota, Colombia.
- DÁVILA, J. E. (2018). *DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA (ICA e ICOs) SOBRE TRAMOS SUPERFICIALES DEL RÍO DE ORO Y RÍO VETAS PARA EL ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA*. BUCARAMANGA.

decreto unico 1076 del 2015. (26 de mayo de 2015). MINISTERIO DE AMBIENTE Y

DESARROLLO SOSTENIBLE. bogota, colombia: republica de Colombia.

Department of Ecology state of washintong . (2014). Obtenido de Department of Ecology state of

washintong : <https://ecology.wa.gov/>

Diana, A., Agustín, M., Francisco, T., & Dario, G. (2013). ESTUDIO DEL MODELAMIENTO

DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SINÚ, COLOMBIA. *Revista Ingenierías*

Universidad de Medellín, 34-36.

Ortiz, S. (2012). Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales

urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. *ingenieria cientifica y*

desarrollo vol. 30, 15. Obtenido de ingenieria cientifica y desarrollo vol. 30 .

Pedraza García, L. F. (2014). *Análisis y evaluación del impacto ambiental de los procesos de*

urbanización campestre en el sector de la cuenca media-baja del rio Teusacá, municipios

de La Calera, Guasca y Sopó. bogota.

PIRAGAUTA, R. A. (2007). *DIAGNÓSTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y*

DE MANTENIMIENTO DEL REACTOR DISCONTINUO SECUENCIAL (SBR) DE LA

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE LA

CALERA . Bogota: UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERIA

AMBIENTAL Y SANITARIA .

REPUBLICA DE COLOMBIA. (18 de DICIEMBRE de 2001). DECRETO 2811 DEL 18 DE

DICIEMBRE DE 1974. *DECRETO 2811 DEL 18 DE DICIEMBRE DE 1974*. BOGOTA,

COLOMBIA.

Resolución 0631 de 2015. (17 de marzo de 2015). parámetros y los valores límites máximos

permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas

de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones . bogota , colombia :
minambiente .

Sebastián, J., & Arias, C. (s.f.). *DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN (Icos) EN CUERPOS DE AGUA*. Bogota: Makro Construcciones LTDA, Bogotá, Colombia.

Secretaría Jurídica Distrital. (23 de DICIEMBRE de 2010). *ALCALDIA MAYOR DE BOGOTS D.C.* Obtenido de ALCALDIA MAYOR DE BOGOTS D.C.:
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=41009>

SONIA, R., & LUZ, G. (2017). *MODELACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE ASIMILACIÓN DE CONTAMINANTES DE LA QUEBRADA CHAGUANI POR VERTIMIENTOS DE AGUAS DE UNA ESTACIÓN DE SERVICIO EN SILVANIA (CUNDINAMARCA)*. BOGOTA: Universidad catolica de Colombia .

Sostenible, M. d. (19 de septiembre de 2018). *minambiente*. Obtenido de minambiente:
<http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad>