

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

NICOLÁS BELTRAN FERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ 2019**

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

NICOLAS BELTRAN FERNANDEZ

**Pasantía para optar al título de Ingeniero Ambiental en la Empresa de
Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.**

**Director de trabajo de grado Ángela María Jaramillo Londoño
Codirectora Dayam Soret Calderón Rivera**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ 2019**

Contenido

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVO GENERAL:	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	9
3. MARCO REFERENCIAL	10
3.1 MARCO CONTEXTUAL.	10
3.2 MARCO TEÓRICO.	10
3.2.1 Modelación matemática.....	11
3.2.2 Componentes de un modelo	13
3.2.3 Modelación de calidad de agua.....	14
3.2.4 Modelo Qual2K	15
3.3 MARCO CONCEPTUAL	16
4 DESARROLLO DE LA PASANTÍA	18
4.1 DEFINICIÓN DE METAS Y OBJETIVOS DE ESTUDIO.	20
4.2 INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	20
4.2.1 Condiciones hidráulicas del cuerpo de agua a modelar.	20
4.2.2 Localización y caracterización de sitios de vertimiento al cuerpo de agua.....	20
4.2.3 Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH.	20
4.3 FORMULACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.	21
4.4 DESARROLLO DEL CÓDIGO DEL MODELO.....	21
4.4.1 Flujo	21
4.4.2 Características Hidráulicas.....	22
4.4.4 Oxígeno Disuelto (OD).....	24
4.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	25
4.6 FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE ESCENARIOS	25
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
7. BIBLIOGRAFÍA.....	38

RESUMEN

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

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

Palabras Clave: Parque Ecológico Distrital de Humedal PEDH, conexiones erradas, modelación, canales aferentes, demanda biológica de oxígeno DBO, oxígeno disuelto OD.

1. INTRODUCCIÓN

La Convención Ramsar es un tratado intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos en 1971, define los humedales como “aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancado o corriente, dulce, salobre o salado, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. [1]

En Bogotá se ratificó la convención Ramsar y los humedales fueron reconocidos como un elemento vital en la gran variedad de ecosistemas que encontramos en el país gracias a su amplia oferta de bienes y prestación de servicios ambientales, ya que estos sirven como reguladores del ciclo del agua, esto se debe a que pueden ayudar a la prevención y control de inundaciones, dificultan el paso de sedimentos y de nutrientes, favorecen la recarga y descarga de acuíferos, funcionan como reservorios, ayudan a mejorar la calidad del aire ya que funcionan como receptores de CO₂, retienen grandes cantidades de polvo, regulan la temperatura y generan microclimas, así como la producción de oxígeno, además tienen un rol de suma importancia dentro del mantenimiento de la calidad ambiental y de regulación hídrica de las cuencas, estuarios y aguas costeras [2].

Este tipo de ecosistemas ha recibido una presión en su mayoría antrópica, que los ha llevado a una condición deplorable, la constante urbanización legal e ilegal, la actividad agrícola de alto impacto como la floricultura, la siembra de papa y la ganadería y actividades industriales de toda índole alrededor y al interior de estos ecosistemas tan importantes. [3] Debido a esto se ha creado la necesidad de una inminente recuperación de los mismos por medio de la articulación de las entidades del estado como La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, La Secretaría de Ambiente SDA, las Corporaciones Autónomas Regionales CAR, El Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público DADEP, entre otras mediante actividades de recuperación de espacio público, mantenimiento y conservación de los humedales de la capital.

El Humedal Córdoba hace parte de la localidad de Suba; localidad número 11, ubicada al noroccidente de Bogotá, entre las avenidas Boyacá y Córdoba y 116 y 127. La parte baja del humedal está ubicado entre la avenida Boyacá y el club del banco de la república, entre los barrios San Nicolás, Niza y Avenida Suba y hace parte del corredor ambiental sistema Córdoba, Juan Amarillo, Jaboque. [3]

La problemática ambiental del Parque Ecológico Distrital humedal Córdoba se observa desde los componentes físico, ecológico, económico y sociocultural, como resultado de la

caracterización del humedal y su área de influencia directa y las interacciones entre los diferentes componentes, se resume así:

- Afectación de la Calidad de agua por aportes de aguas residuales.
- Estructuras hidráulicas deficientes originando restricciones al flujo de agua y acumulación de basuras.
- Desconexión hídrica y ecológica del humedal con la Estructura Ecológica Principal.
- La fragmentación del humedal en tres sectores.
- Limitaciones en calidad y cantidad de agua que ingresa al humedal debido a la cantidad de conexiones erradas presentes a lo largo de los canales y a la restricción de caudal que se hace en la entrada del humedal.
- Disposición de basuras y escombros en zonas del humedal.
- Pastoreo de animales, presencia de animales domésticos y otros depredadores.
- Desarrollo de usos no compatibles o permitidos al interior de la Zona de Manejo y Preservación Ambiental del humedal.
- Incompatibilidad de algunas actividades urbanas contiguas, respecto a las expectativas de conservación y manejo del humedal.
- Falta de control y vigilancia en el humedal. [4]

La fragmentación es uno de los factores presentes más complejos, esto se debe a que las Avenidas Suba, Boyacá y 127 fragmentaron el Humedal Córdoba en tres sectores.

La fragmentación del ecosistema genera un aislamiento entre sectores que da un grado alto de complejidad al manejo de la calidad del agua debido a que se debe hacer un manejo sectorizado. [4] Sin embargo, las entidades a cargo de la restauración, mantenimiento y conservación de estos ecosistemas tan importantes, como La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB- ESP, articulada con entidades como la Secretaría de Medio Ambiente SDA, Aguas de Bogotá, Las alcaldías, y demás están ejecutando el plan de identificación y corrección de conexiones erradas PICCE que tiene como fin reducir la cantidad de conexiones independientes de alcantarillado que tributan a los canales aferentes al humedal, lo que está encaminado a la mejora progresiva de la calidad del agua de los canales aferentes y por lo tanto del humedal.

El Parque Ecológico Distrital de Humedal PEDH de Córdoba es alimentado por tres canales aferentes al mismo, los cuales son, Córdoba, molinos y callejas. Estos reciben grandes cantidades de aguas residuales debido a que tributan a las aguas que provienen de colectores sanitarios y de aguas combinadas, de igual manera, recibe aportes de sistemas independientes de alcantarillado (conexiones erradas), lo que supone una problemática en aumento debido a que a medida que crece la densidad poblacional del sector también lo hace la carga aportada a los canales, lo que se traduce en la calidad actual del PEDH.

En adición a lo mencionado anteriormente, existen diversos factores que potencian la mala calidad del agua tanto de los Canales como del humedal como lo son el constante arrastre de sedimentos provenientes del sistema de alcantarillado y los sedimentos provenientes de la constante disposición inadecuada de residuos sólidos orgánicos RSO's y residuos de construcción y demolición RCD's a los canales por parte de los habitantes del sector que acaban por colmatar las estructuras de control presentes en los mismos (Boxculvert, desarenadores, etc...) que al estar en mal estado no cumplen con sus funciones al cien por ciento, comprometiendo el buen funcionamiento del sistema.

La modelación de la calidad del agua del PEDH Córdoba se hace necesaria debido al deterioro progresivo generado por los agravantes previamente identificados, esto crea la necesidad de elaborar una proyección de los parámetros de calidad de agua tales como PH, DBO, DQO, Oxígeno disuelto ya que actualmente no se cuenta con una que permita tomar decisiones concretas sobre las estrategias a seguir para lograr la restauración progresiva de este ecosistema tan importante para la ciudad.

La propuesta del trabajo de pasantía que se desarrolló en el Parque ecológico distrital de humedal PEDH, a cargo de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá, consiste en la modelación de los parámetros físico químicos del canal cordoba, el cual hace parte del PEDH Córdoba por medio del software Qual2K con el fin de proponer algunas estrategias para la recuperación de la calidad de agua del humedal Córdoba y sus canales aferentes, dentro del proceso de implementación del Plan de Intervención y Corrección de Conexiones Erradas PICCE adelantado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

Ilustración 1. Mapa de Ubicación y delimitación Humedal Córdoba.



Fuente. Autor

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Realizar la modelación de la calidad de agua (DBO y OD) del humedal Córdoba enfocado al canal cordoba, utilizando datos históricos disponibles de parámetros fisicoquímicos, mediante el uso del software QUAL2K con el fin de crear escenarios que sirvan como herramienta para la toma de decisiones frente al contante cambio y deterioro de este ecosistema.

2.2 Objetivos específicos:

- Recopilar información necesaria para el modelo a partir de diferentes fuentes tanto bibliográficas como registros históricos de monitoreo en el humedal y sus canales aferentes.
- Calibrar y ejecutar el modelo en el software qual2k para realizar la modelación de los parámetros.
- Proponer recomendaciones a partir de los resultados obtenidos a través del software para el manejo óptimo del humedal y sus canales aferentes y las acciones a tomar a partir del modelo.

3. Marco Referencial.

3.1 Marco Contextual.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP es una empresa pública la cual presta los servicios de acueducto y alcantarillado sanitario y pluvial , cuenta con 130 años de experiencia la cual le permite abastecer a más de 2 millones de usuarios en la ciudad de Bogotá y prestar servicio a 11 municipios vecinos. Poseen una cobertura residencial que supera el 99% en acueducto y el 98.5 % en alcantarillado sanitario y pluvial.

Por otra parte la EAAB-ESP tiene a su cargo la protección de 40 mil hectáreas en la Reserva Natural Chingaza, y 5 mil en los cerros orientales de la capital. Esta encargada del saneamiento de los 4 grandes ríos de la ciudad (Rio Bogotá, Rio Tunjuelito, Rio Fucha y Rio Salitre), así como de la recuperación y el mantenimiento de más de 100 quebradas y 13 humedales pertenecientes a la capital del país, la gerencia encargada de lo mencionado con anterioridad es la gerencia ambiental que a su vez se divide en 2 direcciones: La dirección de saneamiento, y La Dirección de Gestión Ambiental del Sistema Hídrico (que es en la dirección donde se desarrolló la pasantía).

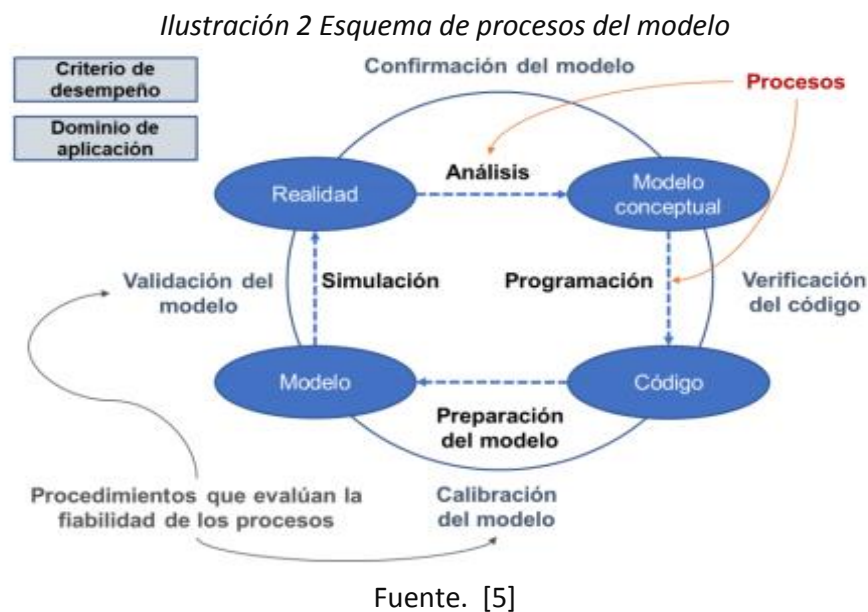
La Dirección de Gestión Ambiental del Sistema Hídrico DGASH tiene a su cargo la recuperación y el mantenimiento integral de los Humedales, Ríos, Canales y Quebradas del distrito, cargo que fue otorgado a la EAAB-ESP por el decreto 190 del 2004, el humedal Córdoba es administrado por la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sostenible (SDA) la cual en conjunto con la EAAB- ESP coordinan labores de mantenimiento y Preservación por medio del contratista Aguas de Bogota que tiene como función ejecutar las actividades coordinadas por los nombrados previamente los cuales tienen que rendir cuentas a las entidades de control del estado bajo el principio de transparencia.

3.2 Marco Teórico.

En todo proceso natural, las condiciones de flujo de agua, sedimentos y contaminantes en un cuerpo de agua constituyen un proceso de alta complejidad en el que se da la interacción constante entre múltiples variables físico - químicas (caudales, niveles de agua, temperatura, oxígeno disuelto, DBO, DQO entre otros), generando una gran dificultad para su descripción y entendimiento. Teniendo en cuenta las limitaciones y complejidades previamente descritas, la modelación de la calidad del agua resulta ser una herramienta de gran utilidad, permitiendo hacer la representación de las condiciones naturales a partir de una serie de información de entrada y condiciones iniciales, aumentando el conocimiento de los sistemas naturales y permitiendo realizar predicciones acerca de posibles escenarios que se pueden presentar en las diferentes en el ecosistema. [5]

3.2.1 Modelación matemática

En términos generales, el proceso de modelación consiste en la representación de la realidad mediante un modelo conceptual, el cual implica una serie de simplificaciones e hipótesis que permiten describir de forma aceptable el sistema natural a representar. Este modelo conceptual es posteriormente trasladado a un código computacional, con el fin de realizar las simulaciones y cálculos con ayuda de un computador. Posteriormente, el código computacional construido es configurado para que represente las condiciones particulares del área de estudio (por ejemplo, caudales, vertimientos, etc.), con lo cual se obtiene el modelo de un caso de estudio particular. Finalmente, el modelo implementado debe ser calibrado y validado, con el fin de garantizar su capacidad de representar las condiciones reales, de forma que pueda ser usado para la simulación de distintos escenarios. [5] A continuación se mostrará el proceso, paso a paso, para la confirmación de un modelo, así como, la explicación de cada uno de sus componentes.



- Realidad

Este hace referencia a la representación de sistemas de tipo natural, utilizando al sistema natural como área de estudio. Para efectos de este proyecto investigativo la realidad hace referencia a los procesos de tipo natural que tienen interacción e incidencia sobre la calidad medida en los cuerpos de agua. Debido a la cantidad y complejidad de los procesos que se involucran en el comportamiento de este sistema, es necesario tener en cuenta que la

realidad representada será caracterizada por magnitudes macroscópicas de medición inmediata (Niveles, velocidades, Parámetros de calidad, etc.), lo que condiciona dicha realidad volviéndola más simple. [5]

- Modelo conceptual

Este constituye una representación de la realidad a través de ecuaciones, contemplaciones verbales o leyes de tipo natural. Este representa procesos de tipo químico, físico y biológico que predominan conjuntamente con los límites permisibles preestablecidos en un área determinada, en miras de una alcanzar los objetivos de la modelación. Este es la consecuencia del análisis al detalle de los diversos procesos que ocurren en la realidad. [5]

Este se compone de una descripción matemática, la cual tiene como objetivo, por medio de declaraciones lógicas combinadas, representar o simular el sistema natural ya sean procesos de tipo hidrológico, hidrogeológico, geológico, ecológico etc. También se compone del modelo conceptual, el cual es constituido por hipótesis y teorías de tipo científico que son adaptadas para el caso particular de estudio, en este caso para la modelación de calidad de agua del humedal córdoba. [5]

- Código del Modelo

Hace referencia a la utilización de un programa o código de computadora con el fin de realizar una formulación lógico-matemática del modelo conceptual previamente desarrollado con el fin de crear una herramienta aplicable en escenarios y casos de estudio similares, variando solo los datos de entrada y parámetros de modelación. Esto se conoce como programación. [5]

- Modelo

Este es una aproximación a las condiciones asociadas a un área de interés en particular. Este incluye datos de entrada y condicionantes o parámetros que son particulares para cada caso de estudio, en otras palabras es una aplicación de un código predeterminado para unas condiciones particulares para cada situación. Teniendo en cuenta lo previamente descrito un modelo se compone de parámetros variables, condiciones de frontera, condiciones iniciales y criterios de desempeño. [5]

- Calibración y validación del modelo

La calibración de un modelo consiste en ajustar los valores correspondientes a los parámetros de un modelo, con el objetivo de representar de la manera más acertada posible las características reales, de acuerdo la aceptabilidad establecida en los criterios de desempeño. [5]

La validación del modelo consiste en la aplicación del modelo con valores y escenarios diferentes que permitan ver el desempeño del modelo con diferentes entradas y parámetros, con el fin de verificar su veracidad y fiabilidad.

3.2.2 Componentes de un modelo

- Parámetro

Es una expresión matemática o declaración lógica que compone un modelo matemático. Este se determina con pruebas de campo, de laboratorio y de calibración de modelo matemático. [5]

- Variable

Son magnitudes aplicadas al modelo que describen el estado de un sistema en un momento y lugar específico. Este corresponde a los datos que se le ingresan al modelo, a la respuesta y a la salida de mismo, correspondientes a un componente o elemento en particular. También corresponden a variables compuestas, es decir variables que se calculan a partir de otras variables para su posterior aplicación dentro del modelo. [5]

- Condición de frontera

Estas están asociadas a las variables de entrada de un modelo, es decir consiste en la función o distribución de dichas variables en el sistema. Un ejemplo es la función de distribución de un contaminante (el comportamiento), esta puede ser puntual o funcional, distribuida en el tiempo. [5]

- Condición inicial

Hace referencia al tiempo 0 del modelo, es decir con las condiciones que el modelo va a iniciar a correr y con qué parámetros va a iniciar con el fin de dar un punto de partida para la simulación. [5]

- criterios de desempeño

Este hace referencia al nivel de ajuste aceptable entre la respuesta observada en el sistema real y la respuesta del modelo. Este criterio es aplicado a la calibración y validación del modelo. [5]

3.2.3 Modelación de calidad de agua

La calidad del agua de un cuerpo de agua es la consecuencia de un conjunto de factores, ya que tanto el régimen hidrológico de la cuenca a estudiar como las características hidráulicas, hidromorfológicas, hidrogeológicas y de calidad de agua del sistema fluvial influyen en su composición. En adición a lo previamente nombrado, hoy en día se ve una alteración drástica del funcionamiento ideal del sistema debido al ingreso de contaminantes de origen antropogénico, que provienen de fuentes puntuales y difusas. [6]

El detrimento de la calidad del agua es un problema ambiental muy complejo, sin contar las repercusiones económicas y sociales que conlleva esta problemática. La contaminación del agua hace referencia a una modificación, natural o artificial, que directa o indirectamente perturba la calidad un cuerpo hídrico. Puede causar riesgos sanitarios, comprometer el bienestar de las comunidades colindantes además del detrimento de las comunidades acuáticas. [6] La contaminación constante y sin una regulación, tratamiento y control puede sobrepasar la capacidad de resiliencia del ecosistema y en el peor de los casos destruirlo.

3.2.3.1 Parámetros necesarios para la modelación de calidad de agua

Tabla 1. Parámetros calidad de Agua

Parámetro	Unidades
Elementos contaminantes (Aluminio, Bario, cadmio, etc.)	mg /L
Coliformes Fecales Termotolerantes – Sustrato	NMP/100 mL
DBO5	mg O2/L
DQO total	mg O2/L
Fosforo Total	mg P/L
Hidrocarburos totales	mg/L
Nitrógeno amoniacal	mg N/L
Solidos suspendidos totales	mg/L
Solidos totales	mg/L
Turbiedad	UNT
PH	Unidad de PH
Temperatura	°C
OD	mg/L

Fuente. EAAB- ESP (2017)

Los parámetros físico - químicos previamente mencionados son necesarios para una modelación de calidad de agua mediante el software elegido (QUAL2K), ya que funcionan tanto como condiciones iniciales como condiciones de frontera para el correcto

funcionamiento de la misma. Además de lo previamente descrito en el decreto 3930 de 2010 se exponen los parámetros mostrados en la tabla 1 como parámetros mínimos requeridos en una modelación del recurso hídrico sumados a los datos hidrobiológicos disponibles.

3.2.4 Modelo Qual2K

El modelo computacional QUAL2K es un modelo de tipo unidimensional que fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA el cual puede ser aplicado en lagos, ríos, reservorios y estuarios, además puede utilizarse para representar descargas de aguas residuales, extracciones, flujos tributarios, mediante la representación de un río y sus afluentes como una descarga lateral. En el cual cada elemento fluye de manera unidimensional y se mezcla en la corriente de manera completa en las dimensiones, además se asumen niveles de agua, temperatura y varios parámetros de calidad del agua, en condiciones de flujo permanente. [7]

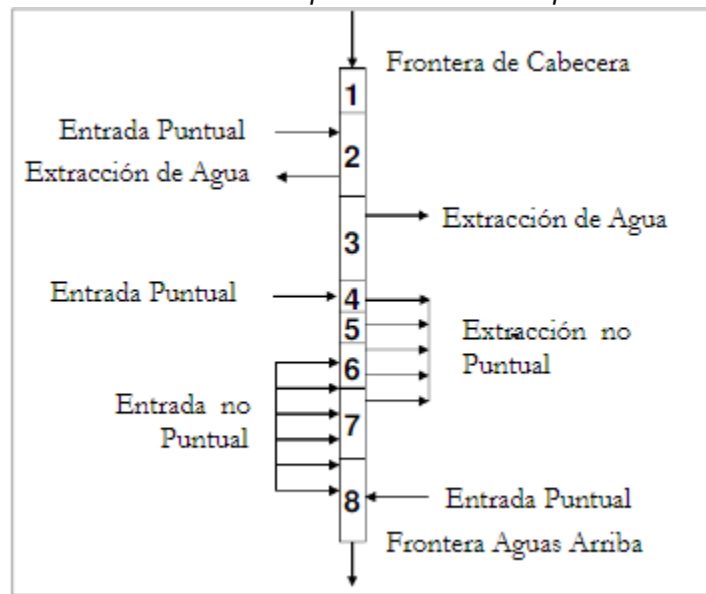
En el modelo computacional QUAL2K las ecuaciones de transporte de masa (advección - dispersión) y de reacción son resueltas mediante un esquema de diferencias finitas. En donde el río es dividido en tramos y subdividido en subtramos o elementos computacionales, y en cada elemento computacional se efectúa un balance hidrológico en términos de flujo, un balance de calor en términos de temperatura y un balance de masa en términos de concentración de los materiales. [7]

Los parámetros utilizados por el modelo QUAL2K en diferentes combinaciones para representar los diferentes escenarios planteados por el modelador son:

- Ciclo del nitrógeno
- Ciclo del fósforo
- La presencia de algas (utilizando como indicador la clorofila)
- La temperatura y sus variaciones
- Los coliformes totales
- La Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO (de rápida y lenta oxidación)
- El potencial de hidrógeno PH
- La alcalinidad
- La conductividad
- Condiciones de flujo

La representación conceptual hace referencia a la idealización gráfica que va a tener el modelo como se describe previamente, en la representación conceptual se muestran los diferentes vertimientos y salidas que tiene el modelo como se muestra a continuación.

Ilustración 3. Representación Conceptual



Fuente. [7]

3.3 Marco Conceptual

Hace 6 millones de años el territorio que hoy conocemos como la Sabana de Bogotá, estaba cubierto en su totalidad por agua, salvo unas pequeñas islas que Surgían de este enorme lago. Un evento geológico que ocurrió hace 30.000 millones de años, hizo que el dique del Tequendama se rompiera, las aguas se drenarán y quedarán al descubierto las tierras de la Sabana. Los restos del lago crearon los humedales, que tomaron forma gracias a los constantes desbordamientos del Río Bogotá y sus afluentes. Sin embargo en Bogotá se adoptó el término humedal hace relativamente poco tiempo ya que en el territorio se desconocía totalmente el término y estos se asociaban con pantanos y zonas de seguridad precaria. [8]

Debido a la falta de conocimiento sobre el tema, en los últimos 60 años de Bogotá, sus habitantes han contribuido a la pérdida de 50.000 hectáreas de humedales dentro del perímetro urbano, por lo tanto quedan hoy en día 674 hectáreas, repartidos en 14 humedales, los humedales Juan Amarillo, La Conejera, Guaymaral, Córdoba, El Burro, Techo, La Vaca, Capellanía, Meandro del Say, Jaboque, Santa María del Lago, Torca, Tibanica y El Salitre. La gran mayoría de estos humedales en el 2003, fueron declarados Área Importante para la Conservación de las Aves de Colombia y el Mundo por el Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y Bird Life International. El humedal es decisivo para la vida de muchas especies, algunas de ellas endémicas, en peligro de extinción y amenaza. [9]

Asumiendo el aumento de interés por parte del Distrito en los Parques Ecológicos de Humedal PEDH, se inició el proceso para la inclusión de los mismos dentro del convenio RAMSAR el cual es un tratado intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. En el cual para lograr ingresar como humedales de interés internacional tienen que cumplir con los "tres pilares" de la Convención, en los cuales las Partes Contratantes se comprometen a:

- trabajar en pro del uso racional de todos los humedales de su territorio.
- designar humedales idóneos para la lista de Humedales de Importancia Internacional (la "Lista de Ramsar") y garantizar su manejo eficaz.
- cooperar en el plano internacional en materia de humedales transfronterizos, sistemas de humedales compartidos y especies compartidas. [10]

La Convención Ramsar fue ratificada por Colombia mediante la Ley 357 de 1997 y en el año 2002 fue definida la Política Nacional Para Humedales Interiores de Colombia. [4] En esta se plantea que “los humedales de vital importancia dentro del amplio mosaico de ecosistemas con que cuenta el país y constituyen, por la oferta que ofrecen a nivel de bienes y prestación de servicios ambientales, un renglón importante de la economía nacional, regional y local”. [4]

Sin embargo, se reconoce que estos ecosistemas se encuentran amenazados por diferentes presiones antrópicas y muchos presentan un alto nivel de perturbación, lo cual ha tenido efectos negativos en la calidad de vida de la población humana y en el ambiente en general. [4] Al comprometerse con las metas a cumplir para el posterior ingreso de los humedales del distrito a la convención RAMSAR se expidió la Resolución N°. 157 de febrero de 2004, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ordenó a las autoridades ambientales del país la elaboración y formulación de los Planes de Manejo Ambiental para los humedales, y estableció que éstos son bienes de uso público y que el parágrafo 2 del artículo 86 del Decreto Distrital 190 de 2004, faculta a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB - ESP , a realizar estudios y acciones necesarias para mantener, recuperar y conservar los humedales en sus componentes, hidráulico, sanitario, biótico y urbanístico realizando el seguimiento técnico de las zonas de ronda y de manejo y preservación ambiental. [4]

La implementación de modelos matemáticos para representar procesos de transporte y dispersión de los contaminantes que han sido vertidos en cuerpos de agua, ha experimentado un auge en las últimas décadas. Esto se debe a la necesidad que existe de estudiar o evaluar la contaminación causada por los vertimientos y sus impactos en los cuerpos de agua, ya que afecta el desarrollo de las actividades humanas y la calidad del medio ambiente. De esta manera la modelación matemática de la calidad del agua se ha convertido en una herramienta que contribuye a la planificación integral de los recursos hídricos. [11]

El modelo computacional QUAL2K es una versión extendida del modelo QUAL2E el cual es de libre acceso publicado por la Environmental Protection Agency EPA, sus creadores son

Steven Chapra, Greg Pelletier y Hua Tao, en el 2012 y tiene como objetivo representar de manera acertada el comportamiento de los componentes hidráulicos y la calidad de agua de una corriente, está desarrollado en lenguaje Visual Basic y opera con el programa Excel de Microsoft Office. [12]

Este Software permite modelar varios escenarios con un número de tramos y subtramos ilimitados, es decir, que el cuerpo de agua a modelar puede ser dividido las veces que sea necesario con el fin de optimizar el modelo. Este modelo permite la modelación de parámetros de calidad de agua tales como: DBO5, OD, Fosforo orgánico e inorgánico, Phytoplankton, Nitrógeno orgánico y amoniacal, entre otros, lo que da un amplio panorama de los parámetros a modelar.

Existen aplicaciones previas del modelo computacional QUAL2K en humedales en distintos países como es el caso de un humedal artificial el cual se creó en un río con alta contaminación con el objetivo de medir tasas de reaeración y los comportamientos tanto de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5, como del oxígeno disuelto OD, ya que dicho humedal sería utilizado como sistema de amortiguamiento. [13] Otro caso de aplicación del modelo consistió en la aplicación del modelo para la dinámica de calidad de agua del río Dalí en Taiwan para evaluar la implementación de tratamiento ecológico de aguas residuales por medio un humedal artificial. [14]

El modelo computacional QUAL2K no ha sido utilizado para modelar este cuerpo de agua anteriormente da la oportunidad de que este proyecto sirva como orientación para la aplicación del modelo tanto en este como en otros Humedales del distrito. Sin embargo hay un caso en el que se utilizó para hacer una proyección de la calidad del agua de los principales ríos urbanos presentes en la ciudad de Bogotá por parte de la Pontificia Universidad Javeriana en el 2007 el cual sirve como punto de partida para el presente trabajo de grado.

4 Desarrollo de la pasantía

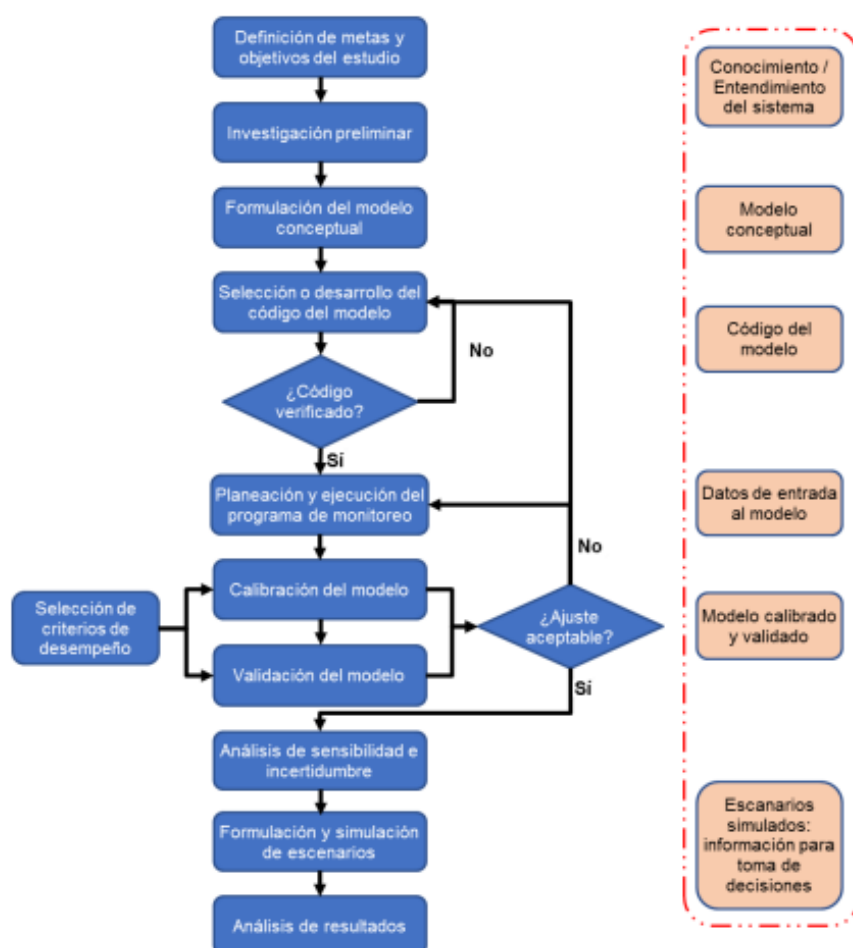
La pasantía fue desarrollada en la Dirección de Gestión de Sistema Hídrico De La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP en la cual se desarrollaron actividades Relacionadas a la realización de visitas técnicas para la posterior emisión de conceptos técnicos sobre problemáticas presentadas en el área de influencia de la dirección, humedales, ríos, canales y quebradas del distrito, Específicamente en las cuencas Fucha, Torca y Guaymaral y Salitre. De igual manera se desarrollaron actividades con la comunidad, con motivo tener claridad sobre el avance realizado sobre los PMA's de cada humedal y las distintas problemáticas que la comunidad y las entidades de control consideraran pertinente.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado se hizo necesaria la aplicación del conocimiento técnico adquirido durante la carrera de ingeniería ambiental, así como la adquisición de nuevos conocimientos prácticos y técnicos sobre el funcionamiento interno de la empresa, los Parques Ecológicos Distritales de Humedal PEDH's , canales y estructuras presentes en los mismos.

Durante la experiencia dentro de la DGASH tuve la oportunidad de estar presente en varias presentaciones de modelos hidrodinámicos por parte de contratistas, así como de informes tanto de mantenimiento como de avance de proyectos de infraestructura en humedales y canales.

Para efectos del proyecto a desarrollar se asumió la metodología propuesta por el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible [5] la cual se muestra en la figura 4, la cual resume los aspectos planteados por diversos autores y el correcto procedimiento para efectuar procedimientos de modelación de calidad de agua.

Ilustración 4. Protocolo de modelación



Fuente. [5]

4.1 Definición de metas y objetivos de estudio.

Para iniciar un proceso de modelación de calidad de agua se definieron de manera muy clara los objetivos del estudio realizado, como los planteados en el numeral 2 del presente proyecto.

4.2 Investigación preliminar

Este paso correspondió al levantamiento de información de tipo secundario que esté relacionada con el objetivo previamente establecido la cual fue proporcionada por la Dirección de Gestión de Sistema Hídrico DGASH (anexo 1), también se realizaron visitas de reconocimiento en campo que permitieron visualizar las particularidades y dinámicas que presenta el cuerpo de agua modelado teniendo en cuenta los siguientes aspectos, así como análisis de tipo cartográfico por medio del Software ArcGis.

4.2.1 Condiciones hidráulicas del cuerpo de agua a modelar.

Las cuales fueron medidas y suministradas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP teniendo en cuenta las condiciones de diseño del humedal Córdoba así como de los canales aferentes al mismo (Anexo 2).

4.2.2 Localización y caracterización de sitios de vertimiento al cuerpo de agua.

Esto incluye cargas puntuales y difusas: estas 4 mediciones puntuales se hicieron en campo con el fin de identificar la calidad de agua en cada punto los cuales incluyen, el canal Córdoba a la altura de la calle 117 con transversal 60, Canal Callejas a la altura de la carrera 55 con calle 127, Canal Molinos a la altura de la carrera 55 con calle 115 y El espejo de agua del humedal Córdoba ubicados en los sectores 2 y 3 del humedal.

4.2.3 Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH.

El cual según el IDEAM se compone de:

Oferta: Información hidrometeorológica accesible desde la Red Básica Nacional de Monitoreo del IDEAM, de las Autoridades ambientales y la de otros actores que realicen mediciones periódicas sobre el comportamiento de los cuerpos de agua del país.

Demanda: con el uso de datos de las concesiones de aguas otorgadas por las Autoridades Ambientales del país, quienes son responsables de hacer seguimiento al aprovechamiento del recurso hídrico en su jurisdicción.

Calidad: las Autoridades Ambientales adelantan tareas de seguimiento a las condiciones de calidad de las fuentes hídricas; con el resultado de estas actividades se busca recopilar

información que permita registrar las mediciones de los puntos de monitoreo (vertimientos y red de monitoreo hídrico), como seguimiento a la calidad de los componentes físicos, químicos y bacteriológicos del agua, para la toma de decisiones en el aprovechamiento del recurso por parte de los usuarios.

Gestión: Con la implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico, se busca consolidar los documentos de planificación en ordenación del recurso hídrico, que permitan ser punto de partida para el establecimiento de las estrategias de seguimiento de la disponibilidad del recurso hídrico, bajo el contexto del comportamiento de calidad y cantidad de las corrientes de agua y sus áreas de influencia.

4.3 Formulación del modelo conceptual.

Se definieron las entradas y salidas que para el modelo ejecutado, las condiciones iniciales ingresadas al modelo fueron DBO₅, OD, caudal, nitratos, nitritos, alcalinidad, fosforo orgánico e inorgánico, condiciones hidráulicas (caudal, n de manning, pendiente del canal, pendiente de los costados del canal y el área del mismo), como condiciones de frontera se utilizaron la DBO, el OD y el caudal y los parámetros que se variaron en el modelo fueron el OD y la DBO además de las características físicas del sistema que se modeló que hacen referencia a: Caudales, Temperatura, Potencial de hidrogeno pH, así como las condiciones meteorológicas utilizadas para el desarrollo del mismo, Radiación solar, Nubosidad, punto de rocío, temperatura y precipitación. Lo previamente identificado permitió visualizar los elementos que modificaron la calidad del agua a lo largo del sistema modelado, un ejemplo son los puntos de vertimiento que entraron al sistema modelado las cuales fueron 3(Canal Córdoba, Canal Callejas y Canal Molinos).

4.4 desarrollo del código del modelo

Para dar alcance al desarrollo del modelo se escogió el modelo computacional QUAL2K en función de los resultados buscados y el objetivo del estudio. La selección del mismo se hizo principalmente estableciendo la naturaleza del problema de calidad de agua a modelar, así como el dominio espacial y temporal del mismo. Para el caso del proyecto a desarrollar se tuvo en cuenta que el sistema modelado, canal Córdoba, es un cuerpo de agua lótico, este tipo de corrientes pueden representarse usando un modelo unidimensional en estado estable y en mezcla completa, con énfasis en las variables escogidas a modelar las cuales son demanda bioquímica de oxígeno DBO Y oxígeno disuelto OD.

4.4.1 Flujo

Qual2K utiliza un balance de flujo estacionario para cada elemento del modelo como se puede observar en la ilustración 5. [12]

Ilustración 5 ecuación de flujo estacionario

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_{evap,i}$$

Fuente [12]

Donde Q_i = caudal o flujo de salida del modelo o caudal total (m³/d), Q_{i-1} = Caudal de entrada del modelo (m³/d), $Q_{in,i}$ es el flujo total a la corriente principal desde fuentes puntuales y no puntuales (m³/d), y $Q_{evap,i}$ es la pérdida de flujo debido a la evaporación, es decir la ecuación hace referencia a una sumatoria de entradas y salidas de flujo del modelo.

4.4.2 Características Hidráulicas

- Ecuación de manning

Cada elemento en cada tramo en particular puede ser idealizado como un canal trapezoidal bajo condiciones de flujo estacionario, la ecuación de Manning puede ser expresar las relaciones entre flujo y profundidad de la siguiente manera. [12]

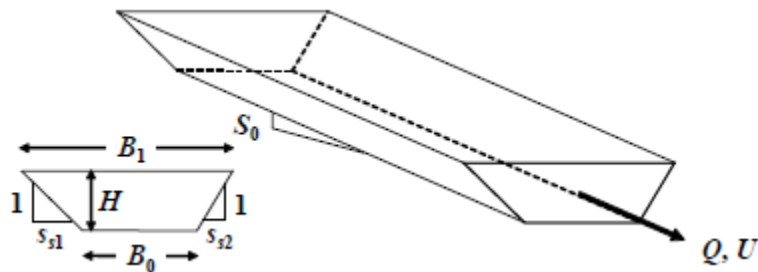
Ilustración 6 Ecuación de Manning

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n} \frac{A_c^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Fuente [12]

Donde Q = Caudal (m³/s), S = pendiente del fondo (m/m), n = coeficiente de rugosidad de manning, A_c = área de la sección transversal (m²), P = perímetro mojado (m).

Ilustración 7 Canal Trapezoidal



Autor [12]

El coeficiente de rugosidad de manning varía según el material con el que el agua del canal interactúa, es decir este dependerá el material con el que este revestido el canal, si hay interacción con vegetación en el mismo o de si existe obstrucciones a lo largo del canal. Para este proyecto se eligió un coeficiente de rugosidad de manning de 0.018 debido a que se trata de una sección revestida en concreto. Estos valores fueron tomados de acuerdo con la norma ns-085 de la EAAB ilustración 8. Valores de coeficiente de rugosidad de Manning n para conductos abiertos. [15]

Ilustración 8. N de manning

Canales revestidos		n
Canal revestido en concreto		0.015 – 0.018
Canal revestido en piedra		0.025 – 0.030
Canal revestido con vegetación baja		0.050 – 0.060
Canales o corrientes naturales		n
Dependerá del material en el fondo del canal y sus banquetas. Sin embargo de acuerdo a las obstrucciones y cantidad de vegetación dentro del mismo, se recomienda adicionar a la rugosidad los siguientes ajustes:		
Efecto de las obstrucciones		
Mínimas		0.005 – 0.015
Apreciables		0.020 – 0.030
Severas		0.040 – 0.060
Efecto de la cantidad de vegetación		
Poco		0.002 – 0.010
Media		0.010 – 0.025
Alta		0.025 – 0.050
Severa		0.050 – 0.100

Fuente. EAAB-ESP

Otras condiciones hidráulicas consideradas para el modelo fueron la pendiente del canal, Ancho del canal y la pendiente de los taludes, información que fue proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

Tabla 3 Condiciones hidráulicas

Parámetro	Unidades y cantidad
Pendiente del canal	0.000083
Ancho del canal	18.64 m
N de manning	0.0180
Pendiente Taludes	0.05

Fuente. EAAB-ESP

4.4.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)

La demanda bioquímica de oxígeno se gana gracias a la disolución de detritus y a la hidrólisis de la DBO de lenta reacción y se pierde vía oxidación y des nitrificación. La ecuación utilizada fue la exponencial, que está programada por defecto en el modelo matemático Qual2K. [12]

Ilustración 9 Ecuación exponencial

$$F_{oxp} = (1 - e^{-K_{scf} \cdot t})$$

Fuente [12]

Donde F= atenuación debido al oxígeno bajo, Kscf= coeficiente exponencial para el efecto del oxígeno en la oxidación de la DBO5 (L/mgO2).

4.4.4 Oxígeno Disuelto (OD)

El Oxígeno disuelto incrementa debido a la fotosíntesis de las plantas. Esta presenta pérdidas debido a la oxidación de DBO, a la nitrificación y a la respiración de las plantas. Dependiendo de si el cuerpo de agua esta sobresaturado o subsaturado presenta pérdidas o ganancias vía re aireación. [12]

Ilustración 10 ecuación de oxígeno disuelto

$$S_o = r_{oa} \text{PhytoPhoto} + r_{oa} \frac{\text{BotAlgPhoto}}{H} - r_{oc} \text{FastCOxid} - r_{on} \text{NH4Nitr} \\ - r_{oa} \text{PhytoResp} - r_{oa} \frac{\text{BotAlgResp}}{H} + \text{OxReaer}$$

Autor [12]

Donde OxRear=Ka(T)(Os(T,elev)-o)

Donde Ka(T)= la temperatura dependiente del coeficiente de re aireación del oxígeno(/d), Os(T,elev) = a la saturación de la concentración de oxígeno(mgO2/L) a una temperatura T y a una elevación determinada.

La fórmula elegida para la re aireación fue la ecuación de Churchill debido a las condiciones hidráulicas del sistema es decir velocidad y profundidad. [12]

Ilustración 11 Ecuación de Churchill

$$k_{ah}(20) = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}}$$

Fuente [12]

Dónde: U= velocidad promedio (m/s), H= profundidad promedio del agua

4.5 Calibración y validación del modelo

La calibración consistió en ajustar el modelo para lograr una representación adecuada el sistema que modelado en términos de calidad de agua (oxígeno disuelto OD y demanda bioquímica de oxígeno DBO5). Los parámetros de un modelo de calidad del agua son los coeficientes o tasas de reacción y transporte, los cuales para el desarrollo del presente proyecto fueron ajustados utilizando como variables respuesta datos secundarios de muestras de los parámetros ya mencionados, así como las variables sensibles que afectan el comportamiento de dichos parámetros (velocidad, caudal, profundidad y reaeración) con el fin de alcanzar un nivel de ajuste aceptable del modelo y que represente de manera acertada de la realidad de este ecosistema.

Los datos que se obtienen en una modelación tienen que ser capaces de proyectar las condiciones de un cuerpo de agua de manera acertada, si los resultados obtenidos de la modelación representan de forma aceptable los datos medidos en campo, se considera que el modelo se encuentra calibrado y validado. [5]

4.6 Formulación y simulación de escenarios

Una vez el modelo fue calibrado y validado, y se tuvo la certeza de que el mismo representa adecuadamente las transformaciones y procesos que ocurren en el cuerpo de agua a modelar, dicho modelo fue usado para la simulación de escenarios que permitirán apoyar la toma de decisiones en fases posteriores del proceso, es decir dicho modelo puede ser utilizado modificando sus variables con el fin de ver la afectación de los mismos sobre el cuerpo de agua en cuestión y así tomar decisiones pertinentes con respecto a la calidad de agua del previamente nombrado. Los escenarios utilizados fueron uno implementando a totalidad el Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas PICCE uno disminuyendo la carga de DBO aportada por el canal molinos, disminuyendo la carga la DBO por parte del canal callejas y otro disminuyendo los aportes de DBO de ambos canales.

5. Análisis de resultados

La opción de grado bajo la cual se realizó el presente proyecto fue modalidad de pasantía, en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, se desempeñaron labores de apoyo en elaboración de informes y oficios, visitas operativas, reuniones institucionales,

además de la asignación y desarrollo del tema del proyecto el cual sus resultados se presentan a continuación.

En esta etapa se presenta el desarrollo de lo presentado en la metodología utilizada para el presente proyecto la cual hace referencia a la guía nacional de modelación presentada por la secretaria de ambiente y desarrollo sostenible. Posteriormente se consolidó el modelo y se analizaron los escenarios creados frente a los cambios previstos en el ecosistema (PEDH Córdoba) y dicho análisis se plantea sea utilizado como estrategia para la orientación de las decisiones con respecto al cuerpo de agua, así como de la respuesta del mismo frente a alteraciones previstas, sin modificar los datos utilizados para calibrar el modelo con el fin de que los resultados sean confiables y comparables a lo largo del proceso y así tener un panorama de cómo puede ser afectado este ecosistema en diferentes condiciones.

Escenarios planteados

En el presente proyecto se presentan tres diferentes escenarios los cuales hacen referencia a la aplicación del Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas PICCE el cual consiste, como su nombre lo dice en corregir las conexiones independientes de alcantarillado, las cuales son de carácter ilegal y afectan negativamente sistema de alcantarillado de agua pluvial de interés el cual está compuesto por el canal Córdoba, el Canal Molinos y el Canal Callejas, que a su vez aunque estén hidráulicamente desconectados del Humedal Córdoba, este se ve afectado en situaciones en la que existen crecientes y desbordamiento del canal Córdoba, esto afecta de manera directa la calidad de agua que ingresa al Humedal Córdoba y así mismo afecta la preservación de la flora y fauna requerida en el mismo.

El planteamiento de los escenarios se hizo bajo el marco tanto del decreto 3930 de 2010 en el cual se contemplan las concentraciones mínimas de OD para aguas destinadas a la preservación de la fauna y flora, como el acuerdo 43 del 2006 del cual se tomaron las concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO y de Oxígeno Disuelto OD de las metas de recuperación del río Bogotá para el año 2020, que a su vez están contempladas en el CONPES 3020 de 2004 en el cual se define la estrategia ambiental de manejo del Río Bogotá.

Los escenarios contemplados son los siguientes:

- Implementación en un 30 % del PICCE: este escenario se planteó de manera que solo se corrigieran las conexiones erradas presentes sobre el canal callejas.
- Implementación en un 60 % del PICCE: En este escenario se planteó una implementación del PICCE en una medida que se corrijan las conexiones erradas tanto en el canal Callejas como en el Canal Molinos con el fin de determinar cómo sería el comportamiento aguas debajo de estos aportes en el Canal Córdoba.

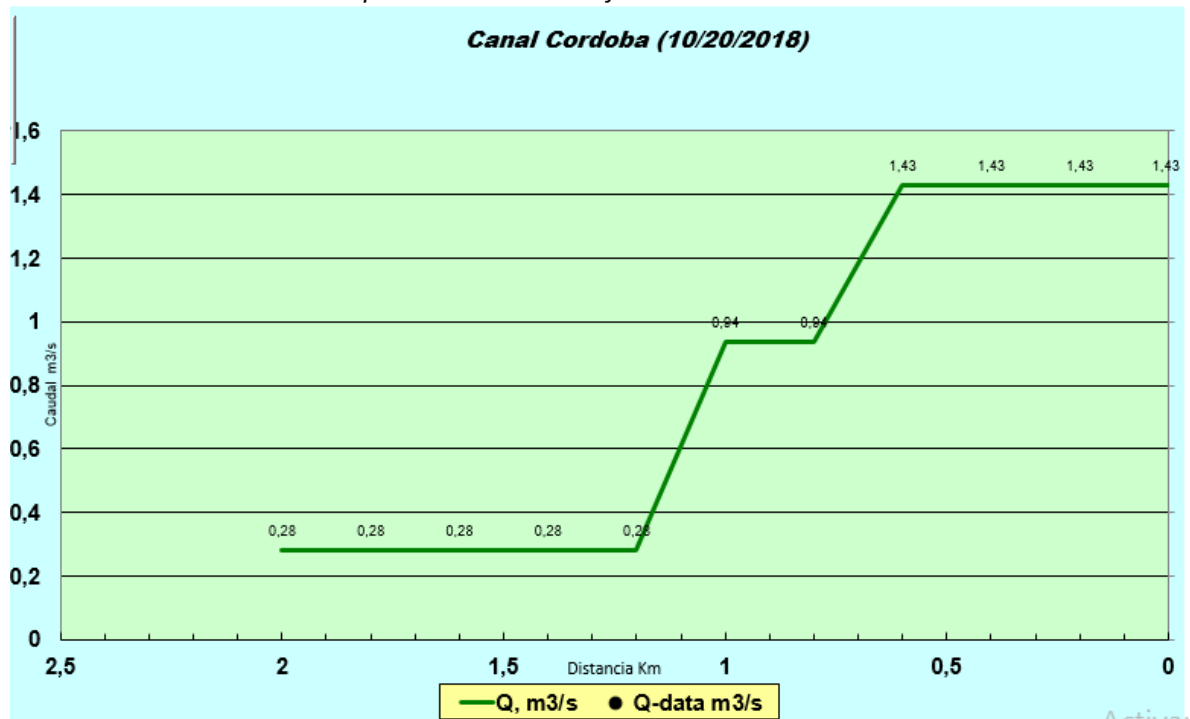
- Implementación del PICCE en un 100 %: En este escenario se planteó de manera que se haga corrección de las conexiones erradas en los 3 canales (Córdoba, Callejas y Molinos) tomando como referencia para el modelo el decreto 3930 de 2010 y el acuerdo 43 de 2006 como se mencionó con anterioridad.

A continuación se presenta el flujo presentado en el canal, así como las calibraciones de los parámetros escogidos para el desarrollo del proyecto los cuales son DBO y OD:

Flujo en el canal

El flujo del canal se determinó mediante el software a partir de los balances de flujo, tomando como punto de partida el caudal cabecera del canal, y los aportes desde fuentes puntuales (canal Molinos y Canal Callejas). Es de suma importancia tener en cuenta que no se contaba con información de fuentes difusas y solo que se tomaron los vertimientos del canal Callejas y el canal Molinos como fuentes puntuales debido a la información limitada de la que se dispuso durante el desarrollo del presente proyecto a continuación se muestra los resultados del comportamiento del caudal en la ilustración 7.

Ilustración 7. Comportamiento del Flujo Canal Córdoba en modelo Qual 2K



Fuente. Qual2K

De este resultado se puede analizar que el caudal del canal Córdoba aumenta de manera progresiva a lo largo de su recorrido, este presenta un caudal o flujo de 0.28 m³/s y desemboca con un caudal aproximado de 1,43 m³/s.

Calibración de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5 y el oxígeno disuelto OD.

- **Oxígeno Disuelto OD**

La calibración del Modelo consistió en una iteración manual de la variable sensible para el modelo de DBO y de OD la cual hace referencia a la tasa de oxidación de la DBO el cual se muestra en el numeral 4.4.3 del presente documento, calculando así el error porcentual y así mismo el ajuste del modelo a los parámetros de calibración. Para la realización de lo descrito anteriormente se utilizó la Ecuación del Error porcentual (ilustración 8), con el fin de hallar el ajuste del modelo al modificar las variables sensibles del modelo de DBO y OD.

Ilustración 8 Ecuación del error Relativo

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0}$$

Fuente. [16]

Dónde: $\Delta x = IX - X_0$

Dónde: X = valor simulado y X_0 = valor real

La concentración de oxígeno disuelto OD utilizada como condición inicial se tomó de los resultados de toma muestras proporcionadas por la EAAB-ESP de una primera campaña de toma de muestras, cuyas concentraciones fueron de 3.83 mgO₂/L para las condiciones iniciales del canal Córdoba y de 3.2 y 5.69 mgO₂/L para el canal Callejas y el canal Molinos respectivamente. Subsiguientemente se utilizaron para la calibración del modelo concentraciones de 2.2 y 3.7 mgO₂/L las cuales fueron tomadas de una segunda campaña de toma de muestra y de la cual se tomó un segundo resultado de dichas muestras proporcionado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

Una vez introducidas las variables respuesta para la calibración se procedió a realizar la iteración manual de la variable sensible, para este modelo la cual vario desde 0.9 a 1.1 mgO₂/L/d con el fin de encontrar el mejor ajuste para el modelo en ambos puntos, se encontró que la tasa que mejor se ajustaba era de 1.05 mgO₂/L/d, como se puede evidenciar en la tabla 4 e ilustración 9.

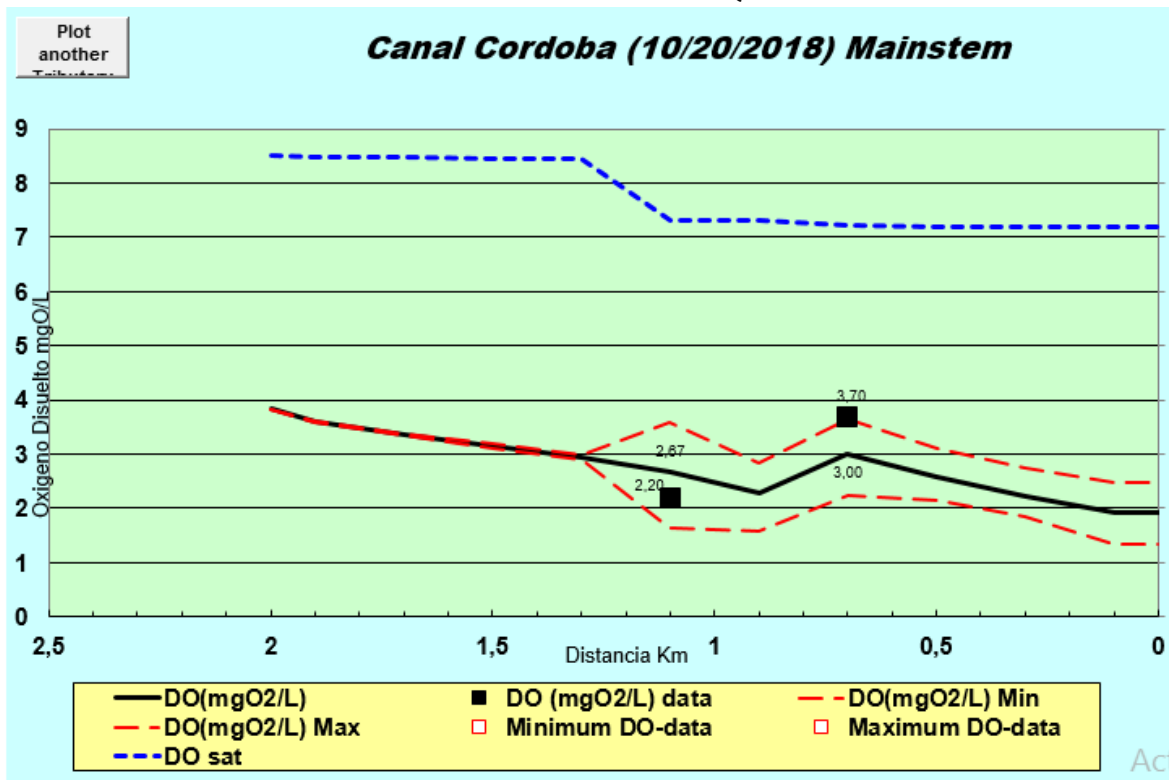
Tabla 4 Calculo de ajuste modelo OD

Oxígeno disuelto					
Tasa de consumo de Oxígeno de la DBO5	Punto	OD modelado	OD calibración	Error	Ajuste
0,9	1	2,76	2,2	25,4545455	74,5454545
	2	3,13	3,7	15,4054054	84,5945946
0,95	1	2,73	2,2	24,0909091	75,9090909
	2	3,08	3,7	16,7567568	83,2432432
1	1	2,69	2,2	22,2727273	77,7272727
	2	3,03	3,7	18,1081081	81,8918919
1,05	1	2,66	2,2	20,9090909	79,0909091
	2	2,97	3,7	19,7297297	80,2702703
1,1	1	2,62	2,2	19,0909091	80,9090909
	2	2,92	3,7	21,0810811	78,9189189

Fuente. Autor

Una vez calibrada esta concentración se tomó como valor de la tasa de consumo de Oxígeno de la DBO5 1.05 mgO₂/L, ya que este daba como resultado el mayor ajuste posible en del modelo a las condiciones reales que correspondió a 79.09% y 80.27% para los puntos de calibración en la OD.

Ilustración 9 calibración OD Qual2K



Fuente. Qual2k

El modelo se asume como calibrado y validado debido a la limitada cantidad de datos que fueron proporcionados para el desarrollo del presente proyecto, ya que se cuenta con 2 muestras puntuales las cuales una fue utilizada para parametrizar el modelo y la segunda muestra puntual fue utilizada para la calibración mostrada previamente. Así mismo como no se contó con una tercera muestra para realizar la validación del modelo, este se asume como calibrado y validado.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO**

El comportamiento de la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5 antes de la implementación del PICCE además de no cumplir con lo planteado como meta para el 2020 en el acuerdo 43 de 2006 y en el CONPES 3320 2004 , aumenta aún más en con los aportes de los canales Callejas y Molinos lo cual a su vez es generado por la gran cantidad de conexiones erradas presentes a lo largo de los 3 cauces, al entrar en rigor el Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas lo que se tiene como meta es reducir la carga contaminante aportada por conexiones independientes de alcantarillado para así aportar a la recuperación de estos 3 canales y por ende a la recuperación del humedal Córdoba.

La calibración de este parámetro también se utilizó la ecuación del error relativo (ilustración 8), esto consistió en iteración manual de la variable sensible detectada, la cual fue la tasa de oxidación de DBO_f o DBO5 demostrada en el numeral 4.4.3 del presente documento, mostrando la fórmula utilizada por el modelo matemático QUAL2K a continuación se muestra la iteración manual de la ya nombrada variable (tabla 5).

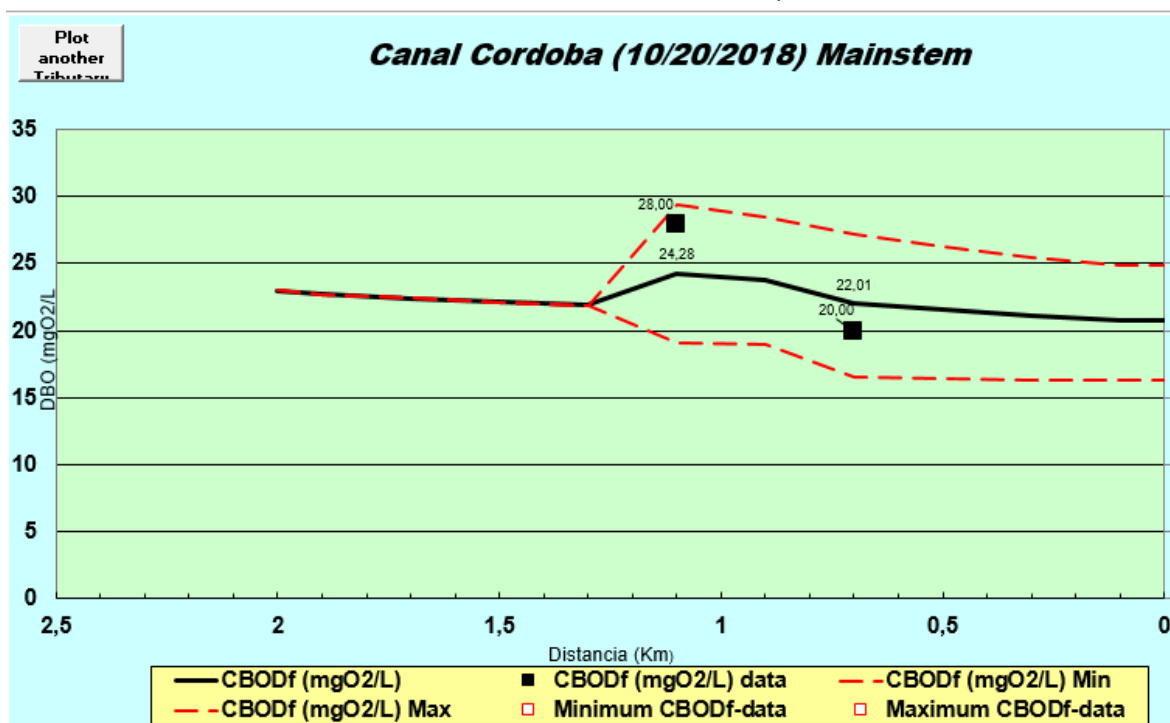
Tabla 5 Calculo de ajusta modelo DBO

Demanda Bioquímica de Oxígeno					
Tasa de consumo de Oxígeno de la DBO5	Punto	DBO modelado	DBO calibración	Error	Ajuste
0,9	1	24,37	28	12,9642857	87,0357143
	2	22,15	20	10,75	89,25
0,95	1	24,33	28	13,1071429	86,8928571
	2	22,09	20	10,45	89,55
1	1	24,3	28	13,2142857	86,7857143
	2	22,03	20	10,15	89,85
1,05	1	24,22	28	13,5	86,5
	2	21,93	20	9,65	90,35
1,1	1	24,26	28	13,3571429	86,6428571
	2	21,98	20	9,9	90,1

Fuente. Autor

Este proceso se realizó tanto para oxígeno disuelto como para demanda bioquímica de oxígeno y se tomó el valor que diera un mayor porcentaje de ajuste para ambos parámetros por ende se presentan los resultados en dos tablas diferentes (tabla 4 y tabla 5). Una vez calibrada esta concentración se tomó como valor de la tasa de consumo de Oxígeno de la DBO5 1.05 mgO₂/L, ya que este daba como resultado el mayor ajuste posible en del modelo a las condiciones reales que correspondió a 86.5% y 90.35% para los puntos de calibración en la DBO5.

Ilustración 11 calibración DBO en Qual2k



Fuente. Qual2k

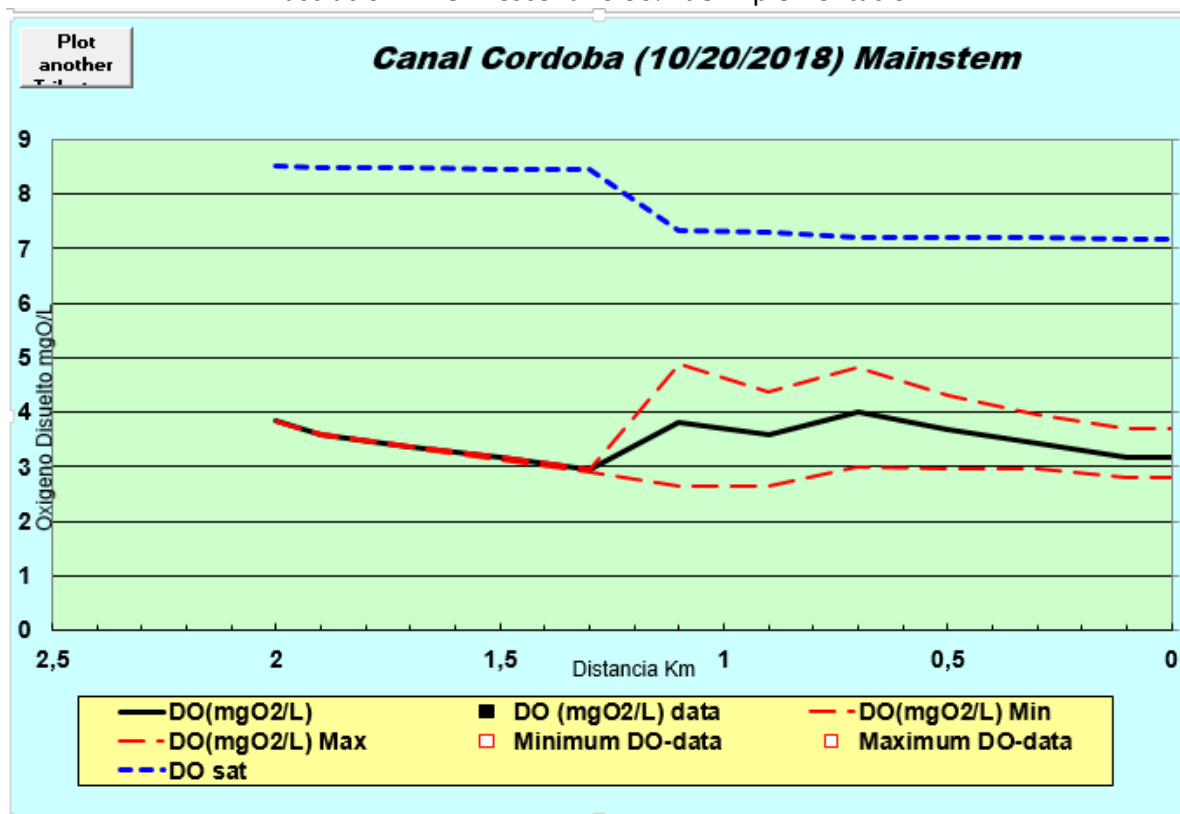
La DBO se asume como calibrada y validada debido a lo explicado en la calibración del OD. Una vez calibrado y validado el modelo se procedió a crear el escenario de implementación del Plan de Identificación y corrección de conexiones erradas PICCE con el fin de representar un contexto en el que se ajuste a los valores de DBO establecidos en la norma en el acuerdo 43 de 2006.

A continuación se presentan los escenarios previamente planteados para la implementación del PICCE.

Escenarios de implementación del PICCE

- Implementación del PICCE al 30 %

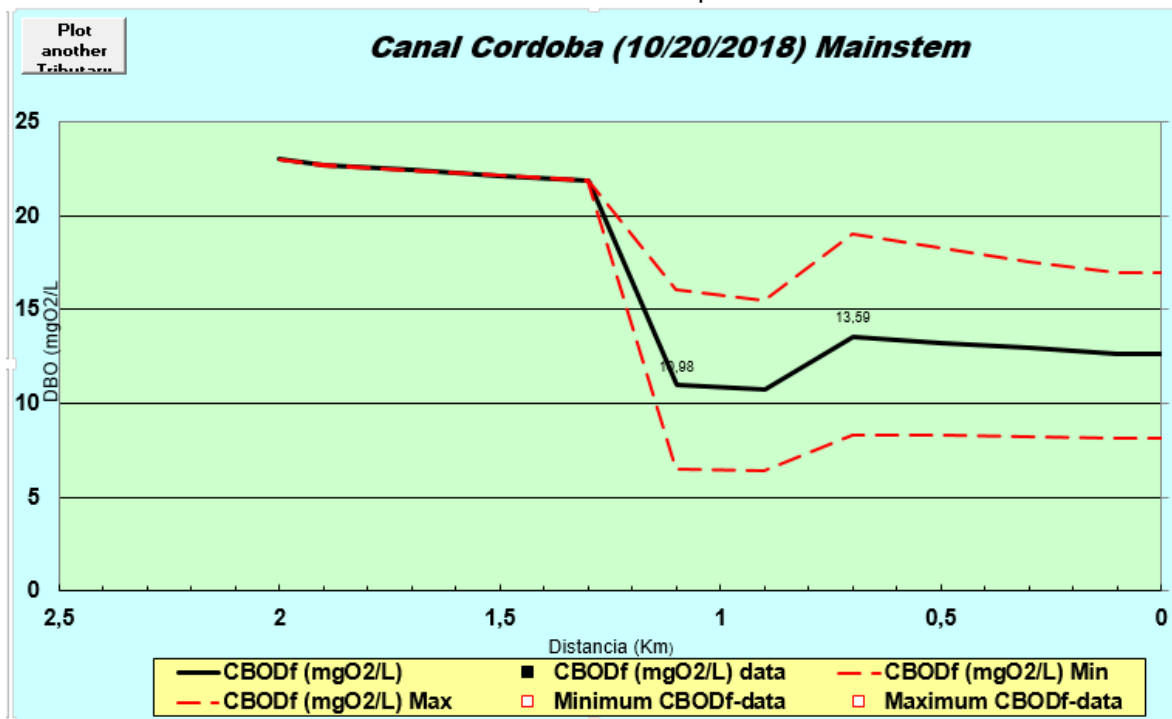
Ilustración 12 OD escenario 30% de implementación



Fuente (Qual2K)

En este escenario se plantea una implementación del 30% del PICCE en el cual se hace la identificación y corrección de conexiones erradas a lo largo únicamente del Canal Callejas y como se puede observar el oxígeno disuelto presenta una disminución debido al consumo por la DBO hasta el kilómetro 1.2 en el cual entra el canal callejas con la concentración planteada en el tanto en el acuerdo 43 de 2006 como en el decreto 3930 para aguas destinadas a preservación de la flora y fauna de concentraciones mayores a 4 mg/L, se tomó una concentración de 4,5 mg/L.

Ilustración 13 DBO escenario de implementación 30%



Fuente. (Qual2K)

La DBO presenta una caída importante ya que con la implementación del PICCE en esta fase se utilizó el valor presentado en el acuerdo 43 del 2006 para el valor de DBO como meta para el 2020 en la recuperación del río Bogotá, el cual es una concentración de DBO menor a 7 mg/L. Debido a esto se tomó una concentración de 6,5 mg/L que reemplaza la concentración tomada en un principio que era de 26 mg/L por lo cual si se corregiría un gran aporte de carga contaminante y a su vez se mejoraría la calidad del sistema y por lo tanto se mejoraría la calidad del agua vertida al humedal córdoba en época de lluvia en situaciones de desborde.

- **Análisis del escenario**

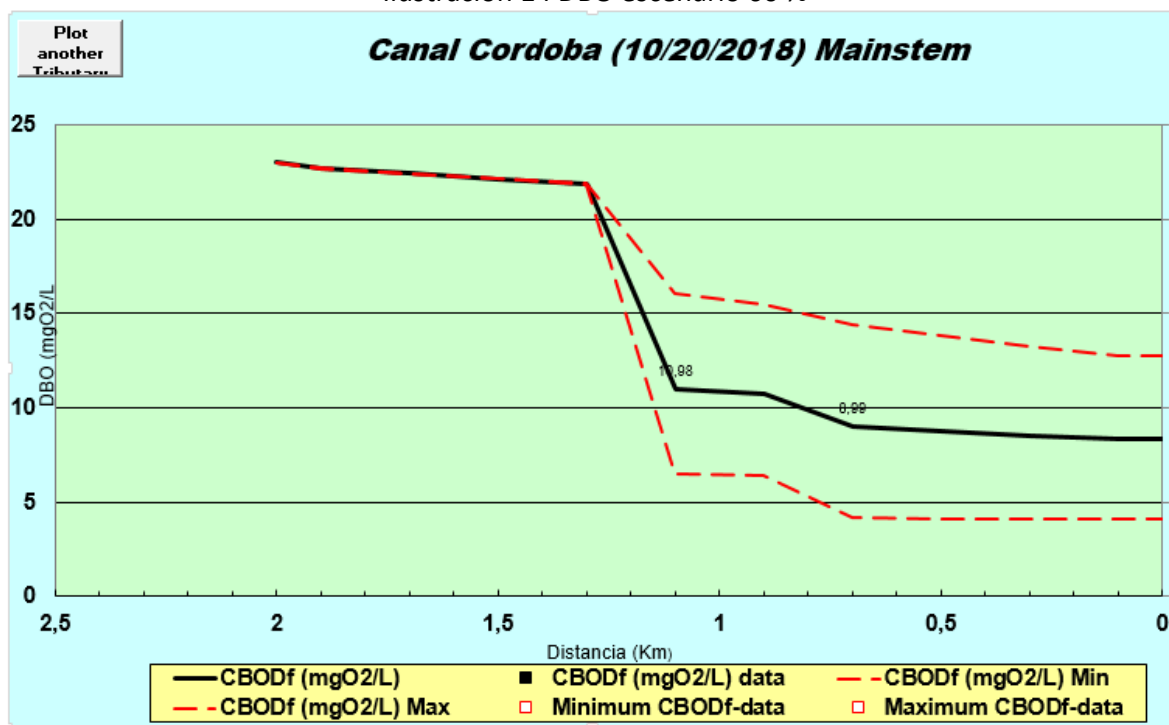
En este escenario se puede observar que hay una recuperación importante debido a que este canal es el que presenta calidad más deficiente debido a la cantidad y calidad de vertimientos ilegales o conexiones erradas presentes en el mismo como se identifica en el diagnóstico presentado del Plan de Manejo y Preservación Ambiental PMA del Humedal córdoba, por lo cual si se hace una implementación primaria o una primera fase de implementación es recomendable empezar por este canal debido a lo previamente descrito.

Sin embargo empezar desde una fase de 30 % como la que se plantea en este escenario generaría costos menores a comparación de los otros dos escenarios debido a que al no acaparar un área tan grande puede realizarse con unos costos de operación y administrativos de menor valor. Sin embargo cuando el sistema recibe los aportes del canal Molinos vuelve a tener un aumento en la concentración de la DBO debido a que este escenario no contempla una implementación en un solo canal, así que en lo que refiere a la recuperación del

ecosistema este escenario aunque es un punto de partida sigue siendo insuficiente para que se evidencie una recuperación a gran escala del ecosistema.

- Implementación del PICCE al 60 %

Ilustración 14 DBO escenario 60 %

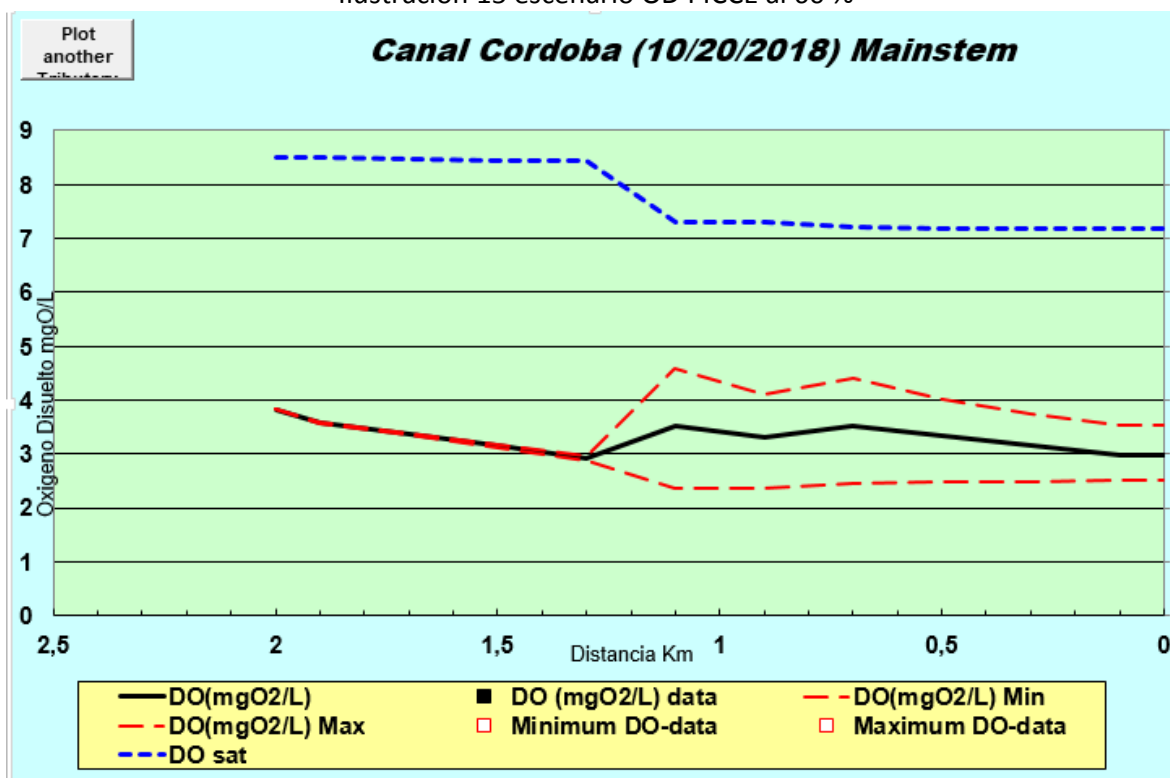


Fuente. (Qual2K)

En este escenario se muestra una implementación del PICCE a un 60 % el cual equivale a la identificación y corrección de conexiones erradas tanto en el canal Callejas como en el canal Molinos, en este escenario se utilizó la misma concentración la cual fue tomada del acuerdo 43 del 2006 que a su vez se basa en el CONPES 3320 de 2004 que plantea el plan estratégico para la recuperación del río Bogotá, una concentración de 6,5 mg/L para cada canal.

Así mismo, en el modelo se evidencia una disminución desde la entrada del canal Callejas en el kilómetro 1.2 y una recuperación mayor aguas debajo del ingreso del canal Molinos en el kilómetro 0.8.

Ilustración 15 escenario OD PICCE al 60 %



Fuente. (Qual2K)

El escenario de la implementación del 60 % del PICCE para oxígeno disuelto OD se basó en los valores presentados en el decreto 3930 de 2010 para agua destinada para preservación de la fauna y flora así como el acuerdo 43 de 2006, que plantean una concentración ideal mayor a 4 mg/L, se tomó una concentración para ambos canales de 4,5 mg/L. debido a esto se puede evidenciar que en los puntos de ingreso de estos dos tributarios del canal córdoba (Molinos y Callejas), la concentración del OD aumenta debido a la identificación y corrección exitosa de las conexiones erradas presentes en ambos canales, esto representa una recuperación a mayor escala del ecosistema y por lo tanto para la conservación de la fauna y flora del humedal córdoba y sus canales aferentes.

- **Análisis del escenario**

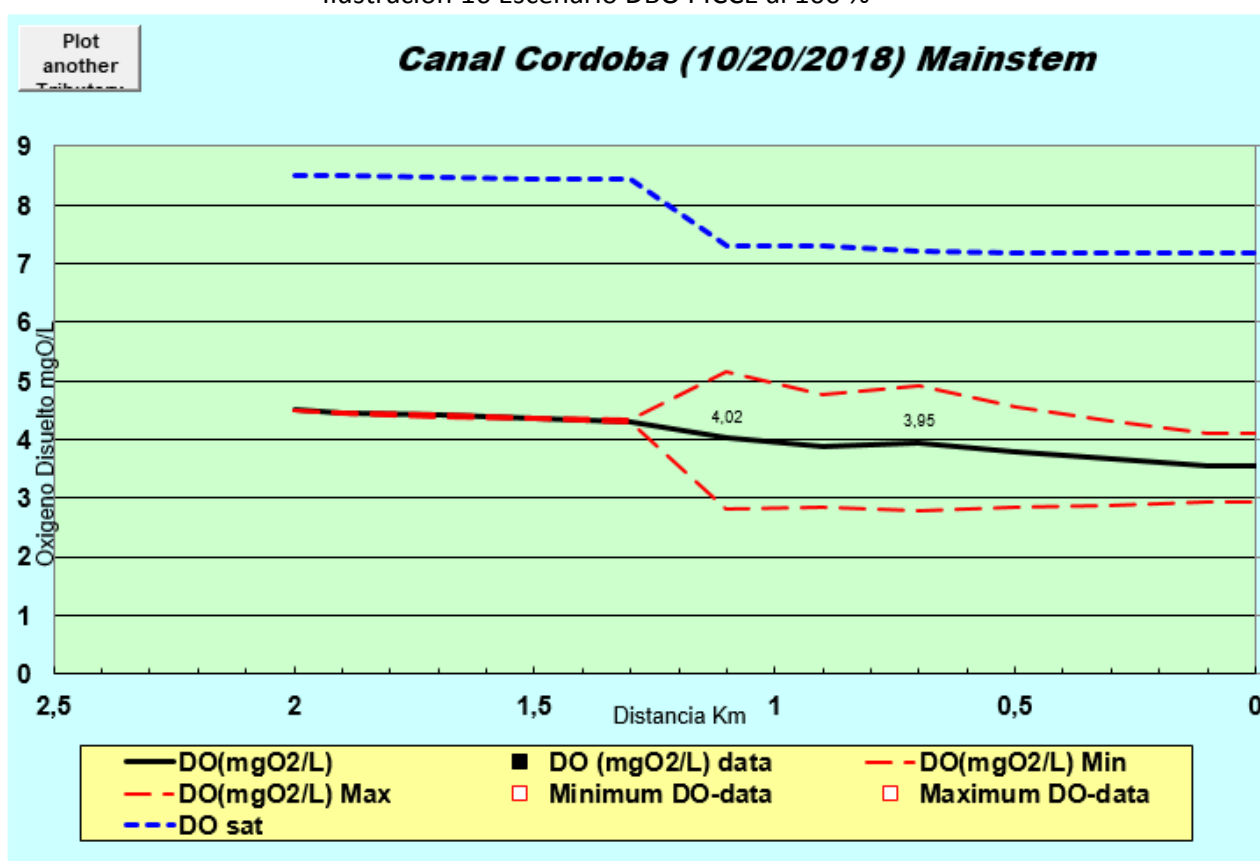
Una implementación del 60 % del PICCE beneficiaría en gran medida la recuperación de la calidad de agua del canal córdoba hacia aguas abajo y por lo tanto mejoraría la calidad de agua del Humedal Córdoba debido a la disminución de contaminantes que ingresarían al ecosistema en condiciones de desborde, por lo cual este escenario así no sea una implementación a totalidad del plan y no haga una recuperación total a lo largo del canal córdoba, logra una mejoría notable aguas debajo del vertimiento de estos dos canales al canal córdoba. Por lo tanto la ventaja a nivel de recuperación del ecosistema que presenta este escenario es muy alto teniendo en cuenta que el costo de operación es menor a una

implementación total, pero aun así sigue generando una recuperación satisfactoria del ecosistema

Sin embargo solo se presenta una recuperación hacia aguas debajo del vertimiento de los canales Callejas y Córdoba. Es decir, la calidad del agua hacia aguas arriba y a lo largo del canal Córdoba aun contaría con conexiones independientes de alcantarillado lo cual significaría para el ecosistema un ingreso de carga contaminante importante aún.

- Implementación PICCE al 100%

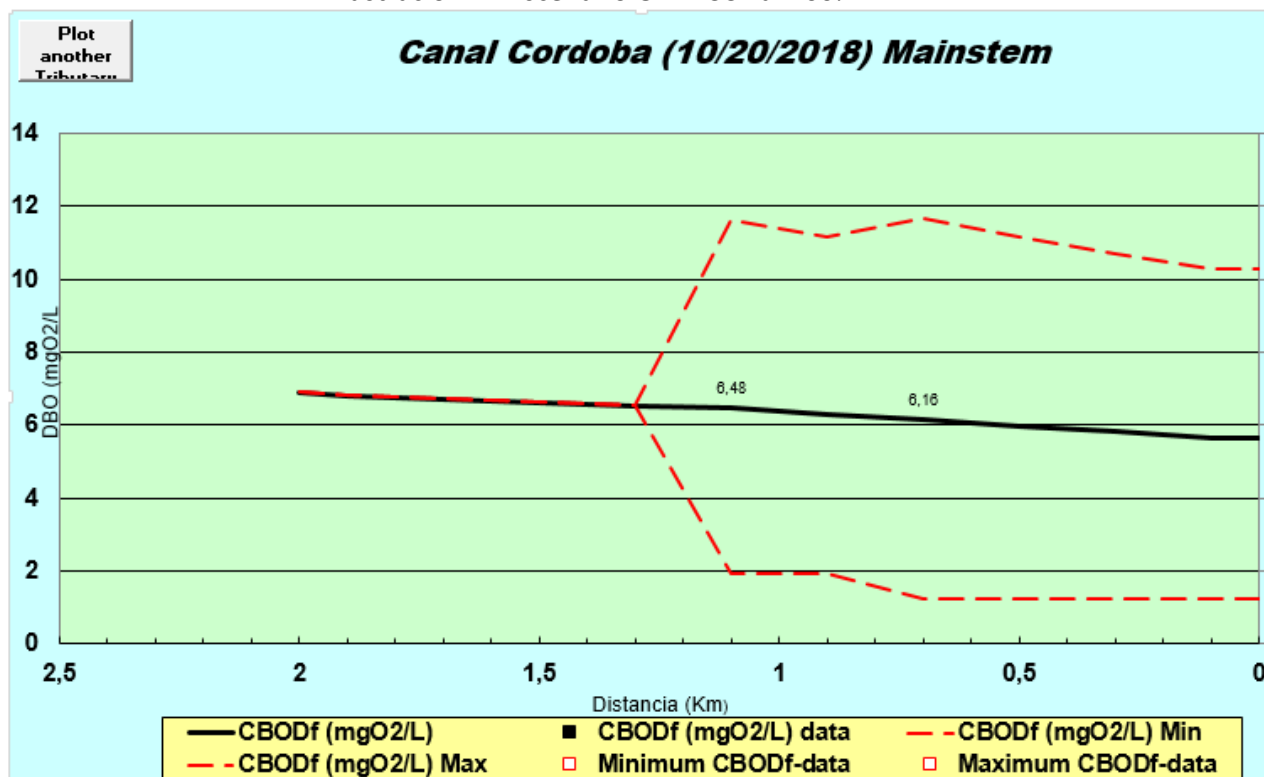
Ilustración 16 Escenario DBO PICCE al 100 %



Fuente. (Qual2K)

El escenario planteado para la implementación total del PICCE se contempló la misma concentración para los canales Callejas y Molinos 4,5 mg/L y para el Canal Córdoba una concentración de 4,1 mg/L, igualmente tomada del acuerdo 43 de 2006 y del decreto 3930 de 2010 para agua destinada a preservación de la fauna y flora concentración mayor a 4 mg/L. por lo tanto, como se puede observar en la ilustración 16 la concentración de OD se mantiene estable y en niveles aceptables con respecto a la norma, lo cual representa un escenario ideal de la implementación del PICCE y la concentración ideal a la que se debería llegar según la normativa y los acuerdos referenciados en el presente documento.

Ilustración 17 Escenario OD PICCE al 100%



Fuente. (Qual2K)

En este escenario se tomó como concentración de DBO lo contemplado en el acuerdo 43 del 2006 que contempla la meta de calidad de agua para el río Bogotá para el año 2020, basado en el CONPES 3320 de 2004, la cual hace referencia a una menor a 7 mg/L así que se tomó para los canales Molinos y Callejas de 6,5 y para el canal Córdoba una concentración de 6,9. Por otra parte se puede evidenciar en la ilustración 17 que la concentración de DBO se mantiene en Concentraciones ideales debido a que los aportes de los canales Callejas y Molinos se mantienen también en niveles aceptables según la normativa vigente y los acuerdos de mejora previamente descritos.

- Análisis del escenario

En esta fase se evidencia un escenario ideal para el saneamiento de los canales Córdoba, Molinos y Callejas, con respecto a las concentraciones de DBO y OD debido a que las concentraciones de estos dos parámetros se mantienen estables y en condiciones ideales para la preservación de la fauna y flora y la restauración del humedal Córdoba y sus canales aferentes que son un ecosistema de suma importancia para la ciudad de Bogotá.

Sin embargo esta fase se asume como una de muy elevado costo debido a los costos administrativos y de operación que representaría una implementación a totalidad del PICCE , debido a la extensa área que abarcaría un ejecutar un proyecto a gran escala como este ,por

lo que esta opción es un ideal y una meta a la que se debería llegar de manera progresiva para lograr la recuperación de estos tres canales y por ende mejorar la calidad del agua del humedal córdoba.

6. Conclusiones y recomendaciones

- Es necesario contar con datos más apropiados a nivel de calidad de agua como detritus fitoplancton, e-coli y patogenos para poder realizar un ejercicio de modelación más apropiado y completo del ecosistema por lo cual se recomienda a la EAAB-ESP hacer un monitoreo de los vertimiento continuo para poder tener datos de mayor complejidad, así como el monitoreo constante de los parámetros de calidad de agua de los canales y el humedal e con el fin de lograr mayor precisión en posteriores modelaciones.
- La implementación del PICCE se recomienda hacerse de manera progresiva con el objetivo de llegar inicialmente a unan implementación del 60 % ya que por lo presentado en el presente documento se evidencio que para la recuperación aguas abajo del canal y el humedal se hace necesaria la implementación del plan en primera instancia en los dos canales que tributan al canal córdoba (canal Molinos y Canal Callejas) y así pueda presentar un costo mayor a la implementación al 30 % es el más completo y el más cercano al ideal y a un presupuesto menor.
- El Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas es de suma importancia para la recuperación de este ecosistema tan importante ya que la calidad de agua presente en los canales está muy alejada de lo contemplado en el decreto 3930 del 2010 y en el acuerdo 43 de 2006 y por lo tanto de las condiciones básicas de calidad para la conservación de flora y fauna por lo que se recomienda una implementación pronta y a totalidad del mismo a razón de una eficiente y pronta recuperación el ecosistema.
- Las condiciones hidráulicas actuales de los canales así como las estructuras hidráulicas requieren un mantenimiento oportuno y a profundidad por lo cual se recomienda pronta intervención de las mismas con el objetivo de generar una mayor una velocidad y mejor re aireación en los 3 canales (córdoba, Molinos y Callejas), asi como el adelanto de obras hidráulicas como interceptores en estos tres canales con el fin de mejorar aún más la calidad de agua de este sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RAMSAR, «INTRODUCCIÓN A LA CONVENCIÓN SOBRE LOS HUMEDALES,» RAMSAR, Gland (Suiza), 2016.
- [2] Fundacion Humedales Bogota, «HumedalesBogota.com,» 16 08 2018. [En línea]. Available: <http://humedalesbogota.com/humedales-bogota/>.
- [3] Sogeocol, «Desctipcion General de los Humedales de Bogota, D.C,» Sogeocol, Bogota D.C, 2017.
- [4] IDEA, «Plan de manejo ambiental participativo humedal cordoba,» Universidad Nacional de Colombia, Bogota D.C, 2007.
- [5] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Guia nacional de modelacion del recurso hidrico para aguas superficiales continentales,» Bogota D.C, 2018.
- [6] H. V. Slon, «Calibracion del modelo matematico QUAL2K para el analisis de calidad del agua para el caso de un rio especifico en Costa Rica,» Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica, 2008.
- [7] CVC, «Caracterizacion y modelacion de la calidad de agua del rio Tulua,» CVC, Tulua, 2005.
- [8] Anonimo, «Los humedales en la conservacion , conocimiento y uso de la biodiversidad en la ciudad de Bogota y la región,» Bogota D.C, 2007.
- [9] A. S. Tobon, «El ayer y el hoy de los humedales de Bogota,» 12 septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://humedalesbogota.com/2013/11/12/el-ayer-y-el-hoy-de-los-humedales-de-bogota/>.
- [10] RAMSAR, «RAMSAR.org,» 17 09 2018. [En línea]. Available: <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convencion-de-ramsar-y-su-mision>.
- [11] H. B. C. R. P. T. C. V. Franklin Torres, «Validacion de un modelo hidrodinamico y calidad del agua para el Rio Magdalena, en el tramo adyacente a Barranquilla, Colombia,» *Scielo*, vol. 25, nº ISSN 0188-8897, p. 15, 26 Agosto 2014.
- [12] S. Chapra, G. Pelletier y H. Tao, «QUAL2K Documentation and users manual,» EPA, Medford, 2012.
- [13] J. Chin-Ju, L. Chien-Li , V. F. Yue-Teng y K. Chih-Ming, «Simulation of a long Narrow Type constructed wetland using the stream model QUAL2K,» *Sustain. Environ*, vol. 1, nº 1, p. 6, 2012.

- [14] P. Tzu-Yi, H. Jung-Te, W. Shun-Cheng , C. Dyi-Huey , H. Kai-Jung, L. Chao-Cheng, L. Shang-Ran, T. CHu-Hui, S. Pao-Jui y L. Horng-Guang, «EVALUATION OF ECOLOGICAL WATER PURIFICATION PROCESSES IN DALI RIVER USING QUAL2K,» *Sustain. Environ*, vol. 1, nº 1, p. 5, 2010.
- [15] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogota EAAB-ESP, «remision de solicitud para la discriminacion de lo ZMPA y ronda hidraulica del canal cordoba,» Bogota D.C, 2018.
- [16] A. M. P. Chinchilla, «Determinacion de errores y tratamiento de datos,» Universidad de almeria, Almeria.
- [17] C. A. S. Ramirez, CALDIAD DEL AGUA - evaluacion y diagnostico, Medellin: Edicines de la U, 2011, p. 460.
- [18] M. M. d. A. Sanchez, «Contribucion al estudio de la Demanda Bioquimica de Oxigeno,» Universidad Autonoma de Nuevo Leon, Mexico N.L, 1994.
- [19] Instituto de Hidrologia, Meteorologia y estudios ambientales IDEAM, «Demanda Bioquimica de Oxigeno " dias, Incubacion y electrometria,» IDEAM, Bogota D.C, 2007.
- [20] C. Oscar, «Los Humedales, espacios educativos,» Centro Nacional de Educacion Ambiental, Coruña, 2005.