

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE CALIDAD DEL AGUA EN DOS
DIMENSIONES DEL CUERPO HÍDRICO LÉNTICO ZONA SUR DEL HUMEDAL
CAPELLANIA, LOCALIDAD DE FONTIBON, BOGOTÁ D.C. COLOMBIA CON
EL SOFTWARE IBER**

MARIA ALEJANDRA GARCIA RODRIGUEZ

COD: 2135268

DAYANA VANESSA RUIZ GOMEZ

COD: 2135279

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2018**

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE CALIDAD DEL AGUA EN DOS
DIMENSIONES DEL CUERPO HÍDRICO LÉNTICO ZONA SUR DEL HUMEDAL
CAPELLANIA, LOCALIDAD DE FONTIBON, BOGOTÁ D.C. COLOMBIA CON
EL SOFTWARE IBER**

MARIA ALEJANDRA GARCIA RODRIGUEZ

COD: 2135268

DAYANA VANESSA RUIZ GOMEZ

COD: 2135279

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

DIRECTOR:

MIGUEL ANGEL CAÑON RAMOS

INGENIERO AMBIENTAL

MSC(C) EN HIDROSISTEMAS

CODIRECTOR:

DARWIN MENA RENTERIA

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

MAGISTER EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTA D.C., COLOMBIA

2018

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha de presentación

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo de grado principalmente a Dios, por permitirme llegar a esta etapa tan importante de mi vida y formación profesional, a mis padres por su apoyo, acompañamiento y cariño que me dieron fuerzas para sacar adelante mi carrera, a mi hermanita por motivarme a ser su ejemplo a seguir, a mi familia materna por su acompañamiento en cada momento de mi vida, a David por su constancia incondicional, apoyo y amor. Adicionalmente agradezco a todos mis docentes, quienes me brindaron las bases y el conocimiento a lo largo del pregrado, pero en especial al profesor Miguel Ángel Cañón Ramos por su acompañamiento, guía y porque sin él esta meta no podría haberse llevado a cabo.

María Alejandra García Rodríguez

A Dios, mi mamá, mi tía y Maffe por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo y amor en todo este trabajo que ha sido posible gracias a ellas , también agradezco a mi Director de Tesis Miguel Ángel Cañón por compartir su conocimiento y así mismo tenerme toda la paciencia del mundo, y por ultimo quiero agradecer a Manuel Blanco por ser mi compañero fiel, por darme motivación cada día y hacerme ver lo mejor de mí a pesar de cada obstáculo en el desarrollo de la tesis.

Dayana Vanessa Ruiz Gómez

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | MARCO CONTEXTUAL | 18 |
| 1.1 | Descripción del área de estudio | 18 |
| 1.2 | Planteamiento del problema..... | 19 |
| 2 | OBJETIVOS | 22 |
| 2.1 | Objetivo general | 22 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 22 |
| 3 | MARCO TEÓRICO | 23 |
| 3.1 | Cuerpo hídrico léntico | 27 |
| 3.2 | Ecuaciones de gobierno hidrodinámica | 27 |
| 3.3 | Ecuación de gobierno calidad de aguas | 28 |
| 3.4 | Iber | 29 |
| 3.4.1 | Modulo hidrodinámico | 30 |
| 3.5 | Topografía y batimetría | 31 |
| 3.6 | Temperatura | 31 |
| 3.6.1 | Temperatura en <i>Iber</i> | 32 |
| 3.7 | Oxígeno disuelto (<i>OD</i>) | 33 |
| 3.7.1 | Oxígeno disuelto (<i>OD</i>) en <i>Iber</i> | 34 |
| 3.8 | Demanda bioquímica de oxígeno (<i>DBO</i>) | 35 |
| 3.8.1 | Demanda bioquímica de oxígeno (<i>DBO</i>) en <i>Iber</i> | 35 |
| 3.9 | Coliformes (<i>E. Coli</i>)..... | 36 |
| 3.9.1 | Coliformes en <i>Iber</i> | 36 |
| 3.10 | Nitrógeno | 37 |
| 3.10.1 | Nitrógeno orgánico..... | 37 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.10.2 | Nitrógeno amoniacal (NH_3)..... | 38 |
| 3.10.3 | Nitratos (NO_3)..... | 39 |
| 4 | METODOLOGÍA..... | 41 |
| 4.1 | Fuentes de información..... | 42 |
| 4.2 | Recolección de información..... | 43 |
| 4.2.1 | Recolección de datos sobre calidad de agua para el humedal..... | 43 |
| 4.2.2 | Caracterización de las condiciones hidrodinámicas y de contorno del <i>Humedal Capellanía</i> | 44 |
| 4.2.3 | Salidas de campo..... | 44 |
| 4.3 | Desarrollo del modelo..... | 45 |
| 4.3.1 | Batimetría..... | 45 |
| 4.4 | Generación de resultados..... | 50 |
| 4.4.1 | Generación de escenarios del <i>Humedal Capellanía</i> respecto a la calidad del agua 50 | |
| 4.4.2 | Generación de soluciones para problemas del humedal encontrados en el modelo 51 | |
| 4.4.3 | Recomendaciones y conclusiones..... | 51 |
| 5 | RESULTADOS..... | 52 |
| 5.1 | Fuentes de información..... | 52 |
| 5.2 | Recolección de información..... | 54 |
| 5.2.1 | Recolección de datos sobre calidad de agua para el Humedal Capellanía..... | 54 |
| 5.2.2 | Caracterización de las condiciones hidrodinámicas y de contorno del Humedal Capellanía..... | 57 |
| 5.2.3 | Salidas de campo..... | 60 |
| 5.3 | Desarrollo del modelo..... | 62 |
| 6 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 68 |
| 6.1 | Generación y análisis de los modelos..... | 70 |
| 6.1.1 | Oxígeno disuelto (OD)..... | 70 |
| ➤ | Periodo de retorno 10 años..... | 71 |
| ➤ | Periodo de retorno 25 años..... | 72 |
| ➤ | Periodo de retorno 100 años..... | 73 |
| 6.1.2 | Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)..... | 75 |
| ➤ | Periodo de retorno 10 años..... | 75 |

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------|-----|
| ➤ | <i>Periodo de retorno 25 años</i> | 76 |
| ➤ | <i>Periodo de retorno 100 años</i> | 77 |
| 6.1.3 | Coliformes fecales (<i>E. Coli</i>) | 79 |
| ➤ | <i>Periodo de retorno 10 años</i> | 79 |
| ➤ | <i>Periodo de retorno 25 años</i> | 80 |
| ➤ | <i>Periodo de retorno 100 años</i> | 81 |
| 6.1.4 | Nitrógeno Orgánico | 82 |
| 6.1.5 | Nitrógeno amoniacal (NH₃) | 86 |
| 6.1.6 | Nitratos (NO₃) | 90 |
| 6.1.7 | Temperatura | 94 |
| 6.1.8 | Análisis de todo el modelo | 96 |
| | | |
| 7 | IMPACTO SOCIAL | 98 |
| | | |
| 8 | CONCLUSIONES | 99 |
| | | |
| 9 | RECOMENDACIONES | 101 |
| | | |
| 10 | REFERENCIAS | 103 |

INDICE DE CONTENIDO FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Delimitación del área para el Humedal Capellanía. | 18 |
| Figura 2. Ciclo del Nitrógeno. | 37 |
| Figura 3. Importación a Iber del shapefile del Humedal Capellanía. | 46 |
| Figura 4. Definición de la entrada y salida del Humedal Capellanía. | 47 |
| Figura 5. Puntos de muestreo para Calidad de Aguas tomados en el estudio de la EAAB. | 53 |
| Figura 6. Asignación de entrada y salida del Humedal Capellanía. | 58 |
| Figura 7. Asignación de uso del suelo Humedal Capellanía. | 60 |
| Figura 8. Salidas de campo al humedal. | 61 |
| Figura 9. Curvas de nivel y batimetría del Humedal Capellanía. | 63 |
| Figura 10. TIN del Humedal Capellanía. | 64 |
| Figura 11. Calibración del modelo computacional den Iber para el Humedal Capellanía. | 65 |
| Figura 12. Condiciones de contorno de calidad de aguas para el Humedal Capellanía. | 65 |
| Figura 13. Definición de la malla para el Humedal Capellanía. | 67 |
| Figura 14. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 71 |
| Figura 15. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 72 |
| Figura 16. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 73 |
| Figura 17. DBO para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 75 |
| Figura 18. DBO para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 76 |
| Figura 19. DBO para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 77 |
| Figura 20. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 79 |
| Figura 21. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 80 |
| Figura 22. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 81 |
| Figura 23. NOrg para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 83 |
| Figura 24. NOrg para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 84 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. NO_{org} para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 85 |
| Figura 26. NH₃ para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 87 |
| Figura 27. NH₃ para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 88 |
| Figura 28. NH₃ para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 89 |
| Figura 29. NO₃ para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía. | 91 |
| Figura 30. NO₃ para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía. | 92 |
| Figura 31. NO₃ para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. | 93 |
| Figura 32. Temperatura para el Humedal Capellanía. | 95 |

INDICE DE CONTENIDO ECUACIONES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación 1. Ecuación de conservación de movimiento I..... | 27 |
| Ecuación 2. Ecuación de conservación de movimiento II. | 27 |
| Ecuación 3. Ecuación de conservación de masa. | 28 |
| Ecuación 4. Ecuación de transporte. | 29 |
| Ecuación 5. Ecuación de St. Venant bidimensional. | 31 |
| Ecuación 6. Ecuación de St. Venant 2D en forma no conservativa. | 31 |
| Ecuación 7. Ecuación conservación del calor. | 32 |
| Ecuación 8. Flujos de energía. | 33 |
| Ecuación 9. Concentración de DBO_c | 36 |
| Ecuación 10. Modelo de desaparición bacteriana. | 36 |
| Ecuación 11. Determinación de tasa de decaimiento. | 37 |
| Ecuación 12. Conservación de masa del nitrógeno orgánico..... | 38 |
| Ecuación 13. Ecuación general de transporte en condiciones estacionarias. | 39 |
| Ecuación 14. Factor de corrección..... | 39 |
| Ecuación 15. Ecuación de transporte. | 40 |
| Ecuación 16. Factor de corrección para Ecuación 15..... | 40 |
| Ecuación 17. Demanda de Oxígeno..... | 48 |
| Ecuación 18. Modelo de Mancini para el cálculo del T_{90} | 49 |

INDICE DE CONTENIDO TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Clasificación de OD y consecuencias para la vida acuática. | 34 |
| Tabla 2. Clasificación de aguas según los valores de DBO. | 35 |
| Tabla 3. Calado del cuerpo de agua principal del Humedal Capellanía para periodos de retorno de 10, 25 y 100 años. | 47 |
| Tabla 4. Valores de SOD según el tipo de fondo. | 48 |
| Tabla 5. Puntos de muestreo tomados para el caso de estudio y sus coordenadas. | 53 |
| Tabla 6. Parámetros de calidad de agua y unidades estudiados por Iber. | 53 |
| Tabla 7. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 02. | 55 |
| Tabla 8. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 08. | 55 |
| Tabla 9. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 04. | 56 |
| Tabla 10. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 09. | 56 |
| Tabla 11. Ponderación de variables por punto de muestra. | 57 |
| Tabla 12. Caudales máximos por periodo de retorno. | 58 |
| Tabla 13. Coeficiente de rugosidad según uso del suelo en Iber. | 59 |
| Tabla 14. Identificación de puntos, coordenadas y diámetros en campo. | 60 |
| Tabla 15. Parámetros y técnica analítica utilizada por ANTEK S.A. para la EAAB. ... | 62 |
| Tabla 16. Normativa nacional vigente aplicada al caso de estudio de la calidad de agua del Humedal Capellanía. | 68 |

INDICE DE CONTENIDO DE DIAGRAMAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Diagrama 1. Fases de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía..... | 41 |
| Diagrama 2. Fase N° 1 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía..... | 42 |
| Diagrama 3. Fase N° 2 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía..... | 43 |
| Diagrama 4. Fase N° 3 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía..... | 45 |
| Diagrama 5. Fase N° 4 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía..... | 50 |

INDICE DE CONTENIDO DE GRÁFICAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Gráfica 1. Valores mínimos de OD registrados en el Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 74 |
| Gráfica 2. Valores máximos DBO Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 78 |
| Gráfica 3. Valores mínimos de coliformes Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 82 |
| Gráfica 4. Valores de NOrg Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 86 |
| Gráfica 5. Valores NH₃ Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 90 |
| Gráfica 6. Valores NO₃ Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 94 |
| Gráfica 7. Temperatura Humedal Capellanía vs. Normativa nacional..... | 96 |

RESUMEN

La información que se encuentra disponible acerca de la hidrodinámica en cuerpos hídricos lenticos como lo son los humedales, es insuficiente ya que la importancia que se le ha dado a estos mismos es muy poca a pesar de lo vitales que son dichos ecosistemas para la regulación del ciclo hidrológico, el servicio de hábitat que prestan a variedades de flora y fauna, su utilidad como filtros naturales y la capacidad de estos cuerpos de agua al recibir vertimientos ajenos a ellos, a través de su dinámica natural y así equilibrar calidad del agua.

En Colombia, es muy poco lo que se habla de este tema, a pesar de que se han declarado varias zonas de protección, se han realizado jornadas de limpieza y de conciencia ambiental, el tema no está claro y por lo tanto no se ha buscado una solución que pueda ayudar a velar por su protección, permanencia e importancia.

Para el caso específico de los humedales en Bogotá, los cuales han sufrido contaminación debido a la inadecuada disposición de residuos (sólidos y líquidos) y una intervención antrópica desmedida, se hace necesario plantear la importancia de estos dentro de la hidrodinámica y el equilibrio ecológico de la ciudad para incentivar su protección, recuperación y cuidado ya que ni las mismas administraciones locales tienen información completa y actualizada disponible de cada uno de los 15 humedales presentes en la ciudad.

Por tal motivo se emplea la modelación para la zona sur del *Humedal Capellanía* en dos dimensiones implementando el software de uso libre *Iber*, donde se busca representar procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan entre sí y la variación espaciotemporal de los mismos, para ampliar la información disponible y generar escenarios alternos para mejorar el estado de la calidad del agua.

Palabras claves: *Hidrodinámica, Iber, Humedales, Calidad del agua, Capellanía.*

ABSTRACT

The information that is available about hydrodynamics in lentic water bodies such as wetlands is insufficient, bearing on mind the importance of those which are for regulating ecosystems and hydrological cycle, the service of habitat that lend to varieties of flora and fauna, its usefulness as natural filters and the capacity of these bodies of water to receive unaware discharges to them through their natural dynamics and thus balance water quality.

In Colombia, there is hardly knowledge of this topic despite the fact that several zones have been declared for protection, cleaning and environmental awareness. The issue is not clear at all and therefore no research has been made that can help to ensure its protection, continuity and importance.

Pointing to the specifics of Bogota wetlands which have been suffered pollution due to the inadequate disposal of waste (solid and liquid) and an excessive anthropic intervention, it is necessary to raise the importance of these within the hydrodynamics and the ecological balance of the city to encourage its protection, recovery and care since not even the local administrations have completed and updated information available from more than 12 wetlands in the city.

For this reason, modelling is used for the southern area of the "*Humedal Capellanía*" in two dimensions implementing the software of free use Iber, which seeks to represent physical, chemical and biological processes that interact with each other and the spatio-temporal variation of them in order to expand the available information and generate alternative scenarios to improve the status of water quality.

Keywords: *Hydrodynamics, Iber, Wetlands, Water quality.*

INTRODUCCIÓN

La situación ambiental de los humedales y su dinámica son determinados en relación al comportamiento de los asentamientos urbanos que los rodean, es por ello que crecen y se mantienen a medida que las comunidades lo permitan. [1] Sin embargo sus funciones y atributos para el equilibrio del medio ambiente en aspectos climáticos, hídricos, bióticos y geológicos son altamente significativos, siendo por ello ecosistemas estratégicos y de vital importancia tanto así para que en pro de sus conservaciones y el uso racional de sus recursos se haya creado una convención que comprometa a las comunidades internacionales a velar por ellos. [2]

A pesar de que Colombia hace parte de dicha convención mundial sobre los humedales de importancia internacional (*Convención de Ramsar*) y que en la lista de esta convención (*Lista Ramsar*) se encuentren designados seis sitios del territorio nacional de protección y todos los humedales de Bogotá, en el ámbito local el aprovechamiento desmesurado de sus recursos provoca que se conviertan en ecosistemas altamente amenazados [3] y en su gran parte los entes encargados del manejo, conservación y restauración no garantizan la estabilidad del ecosistema.

Puntualmente en la ciudad de Bogotá D.C., la cual cuenta con más de 15 humedales en toda su área urbana y rural, estos sufren intervención antrópica debido a la incorrecta disposición de los residuos sólidos y escombros, así como de vertimientos de tipo doméstico e industrial que una gran urbe como la ciudad capital genera, con altas cargas contaminantes y que afectan el equilibrio del sistema natural.

La propia población circundante a dichos sistemas naturales desconoce la importancia ecológica y los beneficios que estos generan como por ejemplo la regulación del ciclo hidrológico, mejoramiento en la calidad del aire, el hábitat de especies de flora y fauna, la biodiversidad; lo que hace necesario que se haga un diagnóstico de la situación actual de los mismos y se promueva a su preservación y conservación, con el fin de encontrar soluciones y se ejerzan controles sobre los aspectos que generan impactos y alteraciones.

Para el desarrollo de la modelación en *Iber*, se eligió como zona de estudio el *Humedal Capellanía*, específicamente su parte sur. Este humedal pertenece a la cuenca del Río Fucha, se ubica en la localidad de Fontibón y se encuentra dividido en dos sectores por la presencia de la Avenida Calle 24 o Avenida la Esperanza.

La parte norte del humedal es pequeña, se encuentra degradada y en varios sectores aún son predios de carácter privado, mientras que la parte sur, que es más extensa, se encuentra el espejo de agua principal y es la zona conocida como "Parque Ecológico Distrital Humedal Capellanía" la cual se encuentra encerrada ocupando un área total de 27,03 hectáreas. [4]

Al realizar una revisión bibliográfica y acudir a las entidades competentes como las administraciones locales o la *Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)* para encontrar datos del estado actual en relación con la calidad de agua del humedal se encuentra que la información es insuficiente, desactualizada y que los resultados al recolectar la información no han sido consignados ni analizados para la caracterización adecuada del ecosistema.

La única información que se encontró disponible fue el *Plan de Manejo Ambiental (PMA)* del humedal que data del año 2008 y que en el componente de calidad del agua consigna unos muestreos que son poco detallados presentando un bajo número de estudios sobre la calidad física y química del agua.

Puntualmente se desea que el siguiente trabajo de grado con la implementación del software *Iber*, que realiza modelación bidimensional, aporte a hacer un seguimiento y diagnóstico de la calidad de agua del humedal que permita ver el estado actual y compararlo con consignado en la normativa nacional. A su vez se planea hacer uso de variedad de factores espacio temporales, datos obtenidos de estaciones hidrometeorológicas y de visitas de campo, así como del propio *PMA* del humedal.

Adicionalmente se desea promover el uso del software *Iber* para la modelación del recurso hídrico y aplicarlo al ámbito nacional desde el ejercicio académico y así comprobar la pertinencia para modelar un humedal respecto a la calidad del agua.

La formación del humedal tuvo sus orígenes en lo que antes se conocía como Laguna del Tintal, perteneciente a la cuenca hidrográfica del Río Fucha; sin embargo, actualmente se encuentra desconectado de esta corriente de agua por los procesos acelerados de urbanización que se han dado en la zona. Las corrientes superficiales que originalmente lo alimentaban han desaparecido, ya que han sido rellenadas, se ha desviado y ocupado su cauce completamente por lo que se supone que su actual suministro de agua proviene del subsuelo y la precipitación directa registrada en la estación hidrometeorológica más cercana. [5]

Las principales corrientes que drenan al humedal son el Canal Oriental de Fontibón y el colector de la Av. La Esperanza. El Canal Oriental de Fontibón es el más importante, ya que drena el 55% de la cuenca aferente (que traslada o lleva el agua) al humedal. Sin embargo, este canal se encuentra aislado hídricamente del humedal. Además de las anteriores, existen también algunas descargas de alcantarillados locales de los barrios ubicados en el costado occidental del humedal. [4]

Por lo tanto el *Capellanía* es uno de los humedales más pequeños de la ciudad y con ello uno de los ecosistemas que presenta mayor riesgo de desaparición debido a su reducida cuenca aferente y al aislamiento hídrico en que se encuentra. Este humedal se encuentra en medio de una zona urbana e industrial, que presenta un alto grado de intervención y deterioro, causado por diversos factores y presiones, donde se aprecia el proceso de potrerización del ecosistema y donde se aprecia la afluencia de basuras, escombros y sedimentos. Sin embargo, aún conserva una serie de atributos ambientales (hidrológicos, ecológicos y sociales) de reconocida importancia por lo que se está trabajando por parte de la alcaldía y la *Secretaría Distrital de Ambiente* en su recuperación.

1.2 Planteamiento del problema

Es fundamental conocer la dinámica de los cuerpos hídricos y aún más de aquellos que se encuentran dentro del perímetro urbano de una ciudad como Bogotá, no solo por su importancia ecológica y los servicios ambientales que estos ofrecen, sino para también conocer la relación entre las presiones que ejerce la actividad de la ciudad y el estado de la calidad del agua del humedal y así determinar los factores más influyentes en las problemáticas que presenta el medio.

Adicionalmente a ello el humedal es de gran importancia para la comunidad circundante ya que tienen cualidades como el almacenamiento de agua, la asimilación de contaminantes, control de la erosión, recarga y descarga de acuíferos, regulación del ciclo hidrológico, entre otros y a su vez dicha comunidad interfiere en el equilibrio del ecosistema ya que las actividades antropogénicas generan impactos negativos con altas cargas contaminantes que el mismo medio no es capaz de asimilar. Pese a que en el país varias entidades y autoridades ambientales han ejercido acciones de control y vigilancia ante las intervenciones

del hombre, es primordial que la propia población en general reconozca el papel de los humedales e identifique las intervenciones que dan lugar a alteraciones, modificaciones y degradación del ecosistema y todos sus componentes (fauna y flora) para que se cree conciencia y se haga un aprovechamiento responsable de los recursos y servicios del mismo.

Para el *Humedal Capellanía*, se encontró que el *PMA* en la sección de calidad del agua, específicamente en parámetros físico químicos, tiene muchas falencias y vacíos, ya que allí mismo se menciona que los métodos de muestreo no fueron pertinentes ni constantes para la toma de datos y posterior análisis de resultados, se infiere que al ser así, la información disponible no es fiable ya que muchos factores incidentes en el diagnóstico de la calidad del agua del ecosistema no fueron ni siquiera tomados en cuenta y los que sí, se apreciaron de forma superficial.

Entonces con este diagnóstico de calidad de agua que se realizó por parte de las entidades locales con el fin de determinar el estado actual de este medio, el cual se encuentra incompleto, no se pueden identificar los parámetros más críticos ni con ellos sus posibles causas o factores que intervienen y posteriormente tomar acciones o controles ante las alteraciones y poder estabilizar y garantizar la calidad de agua de todo el ecosistema.

Sin embargo se acudió a las instalaciones de la *EAAB*, donde se accedió a información que no está disponible al público en general, y que reposa en las bases de datos de la entidad. Puntualmente se encontró información de un muestreo de calidad de agua llevado a cabo en el ecosistema y posteriormente analizado por un laboratorio que cuenta con acreditación del *IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)*.

Se pretende que la modelación propuesta determine los lineamientos del estado actual del humedal, generando escenarios acordes a la información recolectada ya sea en la bibliografía o en vistas de campo a la zona de estudio, debido al que el software a implementar requiere variedad de datos para poder generar el modelo. Posterior a ello, las entidades locales y la misma comunidad ubicada en torno al ecosistema podrán basarse en los resultados del siguiente proyecto de grado para la contextualización del estado del medio, actualizado y pertinente, y así tomar decisiones y conocer la dinámica del mismo.

Con este fin, el siguiente trabajo se hace con la ayuda de un software como *Iber*, buscando incentivar su aplicación en el estudio de la hidrodinámica en cuerpos de agua lenticos, ya que es relativamente nuevo, es de alcance público y se encuentran muchos documentos guía para su uso y estudio no solo en el módulo de calidad de aguas si no aplicaciones en general.

Además, *Iber* maneja dos dimensiones y para el objeto de estudio se requiere más precisión en factores como la morfología y las velocidades que determinan con

certeza y proximidad el estado del medio creando casos hipotéticos para la calidad del agua y así mismo poder generar escenarios de solución, mitigación o corrección ideales ante las principales problemáticas a las que se expone el humedal. También se pretende incursionar y dar a conocer el software debido a que, en casos como el estudiado, sería más preciso que los convencionalmente manejados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Aplicar un modelo hidrodinámico y de calidad del agua en dos dimensiones para la zona sur del *Humedal Capellanía*.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones actuales del ecosistema estudiado, contrastándolas con la situación ideal de la calidad de agua.
- Realizar un diagnóstico hidrodinámico del ecosistema.
- Generar escenarios alternos a la situación actual del ecosistema.

3 MARCO TEÓRICO

Colombia se destaca por su alta disponibilidad de fuentes hídricas, gracias a que su ubicación geográfica facilita la presencia de ecosistemas que producen, regulan y mantienen el recurso. Dentro de estos ecosistemas se encuentran los humedales, que son primordiales para la regulación del ciclo hidrológico y además la conservación de la biodiversidad. [6]

Con el fin de asegurar la permanencia de estos ecosistemas estratégicos en 1971 se crea uno de los más antiguos acuerdos intergubernamentales sobre el medio ambiente, la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional” o *Convención de Ramsar* que define los humedales como “extensiones de marisma, pantanos, turberas, cuerpos de agua de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas, corrientes, dulces, salobres y saladas incluyendo las áreas de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros” [7] y cuya principal misión es “conservar y asegurar el uso racional de los humedales mediante acciones locales, nacionales e internacionales, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”. [8]

A este acuerdo, se acoge Colombia, donde la convención y todos sus estatutos entran en vigor en el año 1998. La presencia de 31.702 humedales en el territorio nacional (arrecifes, estuarios, manglares, marismas, ciénagas, meandros, lagunas, chucuas y pantanos) ubicados en zonas de costa y también en zonas montañosas y donde se calcula que cerca del 87% de la población colombiana habita [9] hace pertinente la inclusión del país en el tratado internacional.

Como plan de acción a la protección de estos ecosistemas, el país oficializa su participación en la *Convención Ramsar* por medio de la *Ley 357 de 1997* [10], define y aplica una Política Nacional de Humedales y ha declarado en diferentes años 7 sitios a nivel nacional con un área total de 824,535 hectáreas (ha) como humedales de importancia internacional dentro de los que se encuentran:

- Sistema Delta Estuarino del Rio Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta (1998).
- Laguna de la Cocha (2001).
- Delta del Rio Baudó (2004).
- Complejo de Humedales Laguna del Otún (2008).
- Sistema Lacustre de Chingaza (2008).
- Complejo de Humedales de la Estrella Fluvial Inírida (2014).
- Complejo de Humedales Laguna de Tarapoto (2017).

A su vez la capital del país, Bogotá, cuenta con la presencia de estas áreas de especial importancia ecológica gracias principalmente a su condición biogeográfica, predeterminada por la zona montañosa y enmarcada por cuencas y subcuencas hidrográficas (Sumapaz, Teusacá, Tunjuelo, Fucha, Salitre, Torca,

Tintal y Jaboque). [11] En la ciudad hay actualmente identificados 15 Humedales que se relacionan a continuación y se especifica su área para un total de 727,06 ha.

- Humedal Tibanica (28,8 ha).
- Humedal La Vaca (7,98 ha).
- Humedal El Burro (18,84 ha).
- Humedal Techo (11,67 ha).
- Humedal Capellanía (27,03 ha).
- Humedal Meandro del Say (27,4 ha).
- Humedal Santa María del Lago (10,86 ha).
- Humedal Córdoba (40,51 ha).
- Humedal Jaboque (148 ha).
- Humedal Juan Amarillo (222,76 ha).
- Humedal La Conejera (58,89 ha).
- Humedal Torca-Guaymaral (79,93 ha).
- Humedal El Salitre (3,42 ha).
- Humedal Tunjo (33,2 ha).
- Humedal La Isla (7,77 ha).

Hasta el final del mes de Julio del 2018, ninguno de ellos estaba cobijado por la *Convención Ramsar*, sin embargo, en Agosto del mismo año se declaró al complejo de humedales urbanos de la capital como sitios *Ramsar* mediante *Decreto 1468 del 2018*. [12] [13]

Pese a ello, en su mayoría los humedales de Bogotá están sujetos a variedad de presiones naturales y antrópicas lo que causa que las condiciones biológicas, ecológicas y de calidad de agua estén lejos de encontrarse en equilibrio, acorde a la normativa nacional pertinente. El manejo de los humedales y su manutención en el distrito capital se encuentran a cargo de entidades como la *Secretaría de Ambiente (SDA)* y la *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)*. Sin embargo la información disponible sobre la calidad del agua y el estado de los ecosistemas se encuentra desactualizada y en muchos casos no existe.

El comportamiento y dinámica de los cuerpos hídricos son objeto importante de estudio alrededor del mundo, debido a que estos son complejos se opta por la aplicación de modelos y simulaciones que permitan determinar las variables que tienen lugar.

Específicamente, los modelos ambientales buscan estudiar los componentes (suelo, agua y aire) en todos sus aspectos, para así simular la dinámica de los sistemas naturales lo más aproximado a la realidad. Todo ello con el fin de tomar decisiones, considerar y prever todos los escenarios posibles.

La modelación ambiental ha tenido una notable evolución debido a las afectaciones que los diferentes sistemas ambientales (Aire, Agua y Suelo) han

sufrido, estos modelos están fundamentados en diferentes métodos numéricos que buscan la mayor aproximación a la realidad, para así poder pronosticar diferentes escenarios, tomar decisiones y evitar posibles impactos negativos a los sistemas ambientales. [14]

Puntualmente, la modelación hidrodinámica se ha implementado en aguas superficiales principalmente para evaluar los problemas resultantes de la afectación ambiental por contaminación que en estas influyen. Tomando en cuenta datos de entradas y salidas, hidrodinámicos, meteorológicos e inclusive geológicos, las simulaciones que se obtienen son útiles para determinar la dinámica del medio y así establecer planes de gestión y control para garantizar la calidad del agua bien sea conservándola o restableciéndola. [15]

Estos modelos se encuentran disponibles unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales y se han desarrollado a su vez junto a la modelación numérica. Debido a que en algunos fenómenos estudiados se encontró que la aplicación unidimensional no basta y se aleja demasiado de ciertas realidades y situaciones, se hace necesaria así la consideración de las dimensiones horizontales y verticales simultáneamente, dando origen entonces a la aplicación y toma en cuenta de una o dos dimensiones más. [16]

En estos modelos se resuelven todas las características hidráulicas del cuerpo de agua estudiado, tales como profundidades, nivel de la superficie libre, rugosidad del fondo, dirección y velocidad del agua, cabe recalcar la importancia de la hidrodinámica al momento de modelar la calidad del agua, debido a que es aquí en donde se desarrollan las ecuaciones de movimiento que están en función de diferentes parámetros físicos. [17]

Dichos modelos desarrollados requieren licencias comerciales que cuentan con el desarrollo y soporte de algunas entidades internacionales, en el caso específico de *Iber*, que será el implementado en este caso de estudio, es actualizado periódicamente y con ello se ofrecen cursos o tutoriales de capacitación para su uso, manejo y conocer las actualizaciones que se realizan constantemente. A grandes rasgos, *Iber* es un software libre con tutoriales gratuitos y algunos cursos que tienen un costo, este se desarrolla con un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujo en ríos y estuarios. [18]

Este tema ha tomado gran relevancia a nivel mundial y para este caso de estudio se han traído a colación varios ejemplos de aplicación a nivel mundial, regional y local donde se ha implementado para diferentes fines.

Uno de los análisis desarrollados con el software a implementar se titula “Uso del modelo *Iber* en un problema de flujo bidimensional”, análisis que buscaba cuantificar las alteraciones en el flujo de un arroyo en el entorno urbano y representar de manera real el comportamiento del agua por las vías de la ciudad de Azul, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, en Argentina. Todo

ello para dar sustentos técnicos y así evitar la construcción de edificaciones en zonas no aptas para eventos de crecidas y desbordes, para lo que se crearon dos escenarios (con y sin la construcciones) usando datos de rugosidad superficial de distintos materiales (vegetación, pavimentos) y condiciones de contorno ya conocidas para eventos extremos. Los resultados permitieron proponer modificaciones y medidas de mitigación en la ronda del arroyo para evitar efectos adversos. [19]

Abarcando más los temas de manejo del software se realizó un Desarrollo de una herramienta para simular obstrucciones en flujos con *Iber*, dando a conocer que este permite simular obstrucciones al flujo considerando el porcentaje de obstrucción que suponen respecto a la sección completa, demostrando que el software da excelentes resultados dado a que se ha testeado con casos teóricos y reales. [20]

Exactamente, en Colombia donde se han realizado pocas investigaciones y desarrollos de modelos con el software de estudio, se encontró que en la Guajira, al norte del país, se realizó una modelación por inundaciones denominada Influencia de las Crecida del Rio Ranchería Sobre las Inundaciones en la Ciudad de Riohacha, La Guajira-Colombia donde se observaba frecuentemente la afectación por inundaciones debido a las precipitaciones en su cuenca urbana, la cual era bordeada por el delta del Rio Ranchería, debido a que el rio tiene el potencial para influir sobre ese fenómeno actuando como barrera al desagüe, o inclusive aportando volúmenes, por lo tanto se investigó en una situación en particular de la “ola invernal 2010-2011” debido a esto se realizaron simulaciones con *Iber* dando a conocer cómo se generaron las influencias de las crecidas del rio y que el mismo se desbordaba solamente en el tramo final del detal, por lo tanto no influyo sobre las inundaciones en el área urbana de la ciudad de Riohacha, igualmente se pudieron realizar simulaciones con un muro para que este logre evitar las inundaciones en el área urbana de la ciudad. [21]

Por otra parte, en la revisión bibliográfica se halló la comparación de dos modelos hidráulicos (*Iber* y *Hec-RAS*), presentando así las ventajas y desventajas de cada uno según los parámetros implementados, los cálculos, el tiempo que demanda cada modelación y la pertinencia de sus resultados. Todo ello aplicado a Villapinzón, un municipio cercano a la ciudad capital del país, el cual por encontrarse atravesado por el rio Bogotá presenta riesgos para la zona urbana en cada una de las inminentes crecientes del cauce. [22]

En términos generales, se encontró que la modelación hidrodinámica ha sido implementada a nivel global tanto en casos del ámbito científico y de investigación como aplicado a situaciones cotidianas para la gestión del recurso hídrico.

3.1 Cuerpo hídrico léntico

Dentro de las aguas continentales se encuentran los ecosistemas lénticos, que hacen referencia simplemente a cuerpos de agua cerrados “tranquilos”, es decir que permanecen en un mismo lugar sin flujo de corriente, como por ejemplo lagunas, lagos, pantanos y humedales. [23]

Para estos cuerpos de agua se conoce la zonificación en tres partes: [24]

- Zona litoral, o comúnmente las orillas, aguas poco profundas, presenta buena penetración de luz solar. Es en esta zona donde crecen plantas con raíces, material flotante y hay gran contenido de depósitos orgánicos.
- La zona limnética comprende las aguas abiertas y parte del fondo, siempre y cuando se presente el nivel de compensación (la fotosíntesis logra equilibrar la respiración).
- La zona profunda, donde la productividad del medio es escasa debido a que la luz solar no llega. En esta zona se encuentran los minerales, el fango y restos orgánicos.

3.2 Ecuaciones de gobierno hidrodinámica

Estos cálculos parten a su vez de las ecuaciones tridimensionales de cantidad de movimiento y continuidad para los fluidos Newtonianos, sin embargo se deben considerar las siguientes suposiciones. [25]

- Las velocidades horizontales son mayores a las verticales.
- Las fuerzas viscosas son menores a las fuerzas inerciales.
- La distribución de presiones es hidrostática.
- El fluido debe ser homogéneo.

Las ecuaciones de aguas someras parten de los principios de continuidad de masa y conservación de cantidad de movimiento donde:

Conservación de movimiento

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial n}{\partial x} + S_x$$

Ecuación 1. Ecuación de conservación de movimiento I.

Fuente: [25]

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial y} = -g \frac{\partial n}{\partial y} + S_y$$

Ecuación 2. Ecuación de conservación de movimiento II.

Fuente: [25]

Conservación de la masa

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial((H+n)v)}{\partial x} + \frac{\partial((H+n)w)}{\partial y} = 0$$

Ecuación 3. Ecuación de conservación de masa.

Fuente: [25]

Dónde:

- H** Profundidad media del flujo (m).
- v** Velocidad del flujo en dirección x (m/s).
- w** Velocidad del flujo en dirección y (m/s).
- S_x** Pendiente en la dirección y (m/m).
- S_y** Pendiente en la dirección x (m/m).
- n** Variación de la superficie libre del agua (m).

3.3 Ecuación de gobierno calidad de aguas

A partir de la implementación de modelos matemáticos para la estimación del estado de un cuerpo de agua en términos de calidad de agua, permite representar el comportamiento de un contaminante en el tiempo y predecir con cierto grado de certeza de calidad del agua en diferentes sectores a lo largo de un tramo de un río o estuario. [26] El módulo de calidad de aguas se caracteriza por tres procesos físicos:

- Advección: velocidad del fluido (transporte de un fluido).
- Difusión: movimiento aleatorio de partículas dentro de un fluido.
- Reacción: proceso que transforman las sustancias.

La ecuación de transporte se basa en el principio de la conservación de la masa y se deben asumir las siguientes suposiciones.

- Se deben despreciar las dispersiones que se pueden presentar por el oleaje.
- La viscosidad molecular siempre prevalecerá sobre la viscosidad turbulenta (el comportamiento del fluido del humedal es laminar, por lo cual no hay modelo de turbulencia).

El modelamiento hidrodinámico permite estimar características y parámetros hidráulicos, mediante los cuales se puede realizar la modelación de la calidad del agua. Lo mencionado anteriormente se debe a que la calidad siempre dependerá de la hidrodinámica y por esto la ecuación de transporte de materia está asociada a las ecuaciones de hidrodinámica. La ecuación de transporte se representara de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(h C)}{\partial t} + \frac{\partial(h v C)}{\partial x} + v \frac{\partial(h w C)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2(h C)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2(h C)}{\partial y^2} + S_c h$$

Ecuación 4. Ecuación de transporte.

Fuente: [26]

Dónde:

- h** Altura de la lámina de agua (m).
- C** Concentración de cada uno de las sustancias (mg/l).
- v** Velocidad del flujo en dirección x (m/s).
- w** Velocidad del flujo en dirección y (m/s).
- S_c** Reacción que genera o degrada cada sustancia (kg/m³. s).
- D** Difusión molecular en cada uno de las direcciones (m²/s).

3.4 Iber

El software Iber es un modelo matemático de dos dimensiones que permite simular el flujo de ríos y estuarios intentando conocer los valores que toman las variables hidráulicas como el calado, caudales, velocidad y otros, haciendo uso de la resolución por medio de métodos numéricos de determinadas ecuaciones asignadas según el caso de estudio que se requiera.

Además, Iber permite resolver problemas de ingeniería y dinámica fluvial, permitiendo desde la delimitación de zonas inundables, el diseño de obras de protección y encauzamiento, restauración de cuerpos de agua, planes de emergencia y contingencia en caso de rotura de presas hasta la optimización del funcionamiento de obras hidráulicas. [27]

El modelo maneja básicamente los siguientes 3 módulos de cálculo distintos pero en todos los casos se emplean mallas estructuradas de volúmenes finitos.

- **Módulo hidrodinámico:** Se considera la base del software, donde son resueltas las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant 2D.
- **Módulo de turbulencia:** Permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, para lo cual se pueden utilizar diferentes modelos de turbulencia para aguas según el grado de complejidad.
- **Módulo de transporte de sedimentos:** Resuelve ecuaciones de transporte (fondo y turbulento en suspensión), calculado a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.

La herramienta fue diseñada y promovida por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en colaboración a grupos de estudio de Ingeniería y Medio Ambiente

de la Universidad de Coruña, Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad de Barcelona de España.

En síntesis, el modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. En su primera versión se incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión. En sucesivas versiones del modelo se irán complementando y ampliando estos módulos y se desarrollarán otros nuevos. Entre las líneas prioritarias de desarrollo de Iber a corto plazo se encuentran los modelos de transporte de mezclas de sedimento, los modelos de hábitat fluvial y los modelos de calidad de aguas. [18]

3.4.1 Modulo hidrodinámico

Este módulo de *Iber* hace uso de las ecuaciones de aguas someras o poco profundas conocidas como *2D Shallow Water Equations* o simplemente ecuaciones de *Saint Venant* y las resuelve. [28]

Dentro de estas ecuaciones bidimensionales están incluidos efectos como:

- Presión hidrostática y pendiente del fondo, fricción de fondo.
- Rozamiento superficial por viento.
- Tensiones efectivas.
- Aportes de caudal.
- Condiciones de contorno hidrodinámicas.
- Contornos cerrados.
- Contornos abiertos.
- Condiciones de contorno internas.
- Infiltración.
- Abstracción inicial.
- Zona de flujo preferente y zonas inundables.

3.4.1.1 Ecuaciones de Saint Venant 2D

Son las ecuaciones que describen el régimen gradualmente variable y rápidamente variable en lámina libre. Estas ecuaciones no pueden ser resueltas para geometrías reales con métodos netamente analíticos. [29]

Estas son deducidas partiendo de las ecuaciones de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de los fluidos, puntualmente para el agua, se obtienen las ecuaciones de *Navier-Stokes* para el movimiento instantáneo, y de ellas a su vez se deducen las ecuaciones de *Reynolds*. [30]

Para toda modelación donde se quiera resolver la propagación de avenidas en ríos deben ser resueltas las ecuaciones de *St. Venant*, y en la mayoría de los

casos el flujo de agua en cauces naturales debido a sus características permiten partir de ecuaciones complejas, simplificarlas y obtener resultados precisos. Por ejemplo, de las ecuaciones de *Reynolds*, y añadiendo la profundidad se obtienen simplificadas las *St. Venant 2D*, que son pertinentes para casos de estudio donde el flujo a representar tiene velocidades verticales pequeñas, pendientes de fondo suaves y que las dimensiones horizontales predominen sobre las verticales. [30]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Ecuación 5. Ecuación de St. Venant bidimensional.

Fuente: [30]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(s_{0y} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(s_{0y} - S_{fy})$$

Ecuación 6. Ecuación de St. Venant 2D en forma no conservativa.

Fuente: [30]

3.5 Topografía y batimetría

Un levantamiento topográfico consiste en llevar a cabo la descripción de un terreno a partir de una representación matemática, esto a través de puntos, líneas, polígonos y diferentes tipos de elementos, esto con el fin de llevarlo a un plano donde se puedan visualizar los elementos y características que se encuentran en el terreno. [31] Es de vital importancia que cuando se esté realizando este procedimiento el topógrafo tenga en cuenta las características morfológicas de la superficie como lo son ríos, lagos, reservorios caminos, o formaciones rocosas, de igual forma todas las estructuras construidas por el hombre como por ejemplo tanques, canales, vías, cercas, entre otros. Los planos obtenidos con este trabajo deben presentar las características mencionadas anteriormente y también los cambios de relieve que se presenten en el terreno a describir.

3.6 Temperatura

Es un parámetro determinante en el análisis de la calidad del recurso hídrico, ya que tiene una influencia directa en las demás propiedades fisicoquímicas, principalmente en la cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua. A su vez la temperatura determina diferentes propiedades y procesos, como lo son la viscosidad, la solubilidad de gases y de sales, entre otros, también se efectúan procesos fisiológicos de los organismos que provocan variaciones en su metabolismo. [32]

También, a partir de la radiación solar se puede determinar la calidad y cantidad de luz que afecta la temperatura del agua y esta a su vez genera un impacto en las reacciones químicas y velocidades de reacción, dependiendo de la zona de estudio se presentan cambios de temperatura y así mismos los organismos que están enfrentados a estos cambios se acoplan para poder sobrevivir. [32]

La temperatura también afecta una característica como lo es la solubilidad del oxígeno en el agua, a mayor temperatura menor solubilidad y viceversa, un ejemplo de lo anteriormente mencionado es que un cuerpo de agua puede aumentar la solubilidad alrededor de un 40% si se presenta una disminución de temperatura de 25°C a 0°C, la explicación de este efecto es que las moléculas de agua se unen más por lo tanto retienen mayor cantidad de oxígeno. [33]

3.6.1 Temperatura en *Iber*

Este parámetro es estudiado en *Iber* debido a que tiene gran influencia a la hora de calcular la mayoría de los componentes y el comportamiento de las variables necesarias en la modelación, pero es a su vez una variable que no depende de ninguna otra para su estimación. No solo se debe al uso del modelo en zonas templadas o tropicales, si no la incidencia de la temperatura de descargas o factores externos que alteren la estabilidad del parámetro.

El balance de temperatura o calor está dado por la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de los sedimentos, el agua, la atmósfera, las entradas y salidas externas al sistema. [34]

De acuerdo a las entradas y salidas que existan en el sistema, es notable que el flujo de calor superficial, específicamente la relación entre el aire y el agua está en función de la interrelación de cinco procesos los cuales son.

- Radiación solar de onda corta.
- Radiación atmosférica de onda larga.
- Radiación del agua de onda larga.
- Conducción y convección.
- Evaporación y condensación.

Puesto que las reacciones bioquímicas afectan a la concentración de los componentes que serán modelados dependen de la temperatura, se estableció el término incluido en la ecuación de la conservación del calor promediada en profundidad.

$$S_t = \frac{Q}{\rho C_{pw}}$$

Ecuación 7. Ecuación conservación del calor.

Fuente: [35]

Dónde

- C_{pw} : es la temperatura específica del agua.
- ρ : es la densidad del agua.
- Q : es el flujo neto de calor en el aire y el agua.
- S_t : es la transferencia de calor a través de la interfase agua aire.

El intercambio de temperatura puede darse por diferentes circunstancias las cuales son radiación, evaporación y conducción, siendo Q la suma algebraica de diversos flujos de energía.

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

Ecuación 8. Flujos de energía.

Fuente: [35]

Dónde:

- Q_{rad} : es la radiación neta incidente (W/m^2).
- Q_{br} : es la radiación de onda larga emitida por el agua.
- Q_{cond} : es el calor transferido por conducción entre el aire y el agua.
- Q_{evap} : es la transferencia de energía por evaporación/condensación del agua.

Se debe tener en cuenta que el término Q_{rad} está comprendido por la radiación solar de onda corta y la radiación atmosférica de onda larga.

3.7 Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es usado para medir la cantidad de oxígeno que está presente en el agua y del que se dispondrá para la actividad química y biológica que en el medio se realizan para tareas como la degradación de materia orgánica. [33]

El agua absorbe oxígeno mediante la difusión de aire en el entorno, el movimiento del agua y la presencia de plantas acuáticas, incluyendo las algas, mediante la fotosíntesis, en este proceso se eliminan el dióxido de carbono y lo reemplazan por oxígeno. [36]

Entre las fuentes antrópicas que afectan este parámetro, están las cargas contaminantes efectuadas por vertimientos puntuales asociados a actividades industriales, como por ejemplo actividades agrícolas, en donde los fertilizantes son transportados a los cuerpos de agua debido a procesos de erosión o escorrentía superficial. [37]

En relación a la temperatura el OD disminuye a medida que se presentan incrementos de temperatura, esto también se ve relacionado en cuanto a la profundidad donde se realicen los análisis. Las concentraciones de oxígeno

disuelto en aguas naturales dependen de las características fisicoquímicas y la actividad bioquímica de los organismos que se encuentran en el cuerpo de agua. A continuación se presentan los niveles de OD y las consecuencias que generan para la vida acuática.

| <i>OD (mg/L)</i> | <i>CONDICIÓN</i> | <i>CONSECUENCIAS</i> |
|------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 | Anoxia | Muerte masiva de organismos aerobios |
| 0-5,0 | Hipoxia | Desaparición de organismos y especies sensibles |
| 5,0-8,0 | Aceptable | OD adecuado para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos |
| 8,0-12,0 | Buena | |
| > 12,0 | Sobresaturada | Sistemas en plena producción fotosintética |

Tabla 1. Clasificación de OD y consecuencias para la vida acuática.
Fuente: [33]

3.7.1 Oxígeno disuelto (OD) en Iber

Muchos de los procesos metabólicos que realizan los organismos en el cuerpo de agua dependen del oxígeno disuelto, de igual forma para procesos como obtención de energía y realizar su reproducción. Este parámetro es el principal indicador del estado en términos de contaminación de una masa de agua, debido a que la materia orgánica contenida en ella tiene como efecto directo el consumo del oxígeno disuelto. Uno de los factores que producen desequilibrios en el ecosistema acuático es la baja concentración de oxígeno disuelto, esto dicho en otras palabras es el aumento de la mortalidad de los peces y aparición de olores, deterioro entre otros. [27]

A la hora de realizar una modelación de oxígeno disuelto se deben tener en cuenta las fuentes y las pérdidas de oxígeno estas serán generadas por diferentes procesos presentes en el transporte del agua; las fuentes de oxígeno serán:

- Oxígeno disuelto en vertimientos.
- Agua de escorrentía superficial.
- Fotosíntesis de plantas acuáticas y algas.
- Re aireación desde la atmosfera.

Entre las pérdidas de oxígeno se encuentran:

- Oxidación de residuos que contienen nitrógeno.
- Demanda de oxígeno de los sedimentos (DOS).
- Oxidación de residuos carbonáceos.

Mediante la ley de cinética de primer orden se puede realizar la representación del fenómeno de entrada de OD a la masa de agua. El aporte de oxígeno por unidad de tiempo es proporcional al déficit de oxígeno respecto al valor de saturación. [38]

3.8 Demanda bioquímica de oxígeno (*DBO*)

Es la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para poder degradar la materia orgánica presente en el agua, de igual forma se usa para determinar la contaminación de la misma debido a que el alto contenido orgánico favorece el crecimiento de bacterias y hongos, la cantidad de oxígeno consumida es afectada por variables como el pH, la temperatura, y el tipo de material ya sea orgánico o inorgánico. [39]

En condiciones normales de laboratorio este parámetro se determina a una temperatura de 20°C en un tiempo de 5 días, este valor será expresado en mg/L y es conocido como *DBO₅*, este procedimiento fue adoptado por la asociación americana de salud pública. [40]

Otras aplicaciones para la *DBO* son la medición de la calidad en las aguas superficiales y aguas residuales, evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales, diseño de unidades de tratamientos biológicos.

Como se mencionó anteriormente, las concentraciones de *DBO* valor indican el grado de contaminación en el medio, a continuación se presentan algunos rangos de valores *DBO* dependiendo del tipo de agua.

| <i>Tipo de Agua</i> | <i>Valores</i> |
|----------------------------------------|------------------|
| <i>Agua pura</i> | 0-20 mg/L |
| <i>Agua levemente contaminada</i> | 20-100 mg/L |
| <i>Agua medianamente contaminada</i> | 100-500 mg/L |
| <i>Agua muy contaminada</i> | 500- 3000 mg/L |
| <i>Agua extremadamente contaminada</i> | 3000 – 15000mg/L |

Tabla 2. Clasificación de aguas según los valores de *DBO*.

Fuente: [40]

3.8.1 Demanda bioquímica de oxígeno (*DBO*) en Iber

Mediante el depósito de materia orgánica a masas y corrientes de agua se presenta la *DBO*, la cual se define como el alimento de las bacterias que se reproducirán rápidamente, estas en condiciones aeróbicas consumirán oxígeno que producen una disminución de *OD* y un aumento de la *DBO*. [41]

La Demanda Biológica de Oxígeno Carbonácea (*DBO_c*) conforma la parte principal de las aguas residuales, por ello se tiene en cuenta para la modelación, a su vez la *DBO_c* es uno de los principales consumos del oxígeno disuelto en una masa de agua. En síntesis, la *DBO_c* se define como la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica carbonosa en el agua. [38]

Para definir la concentración de DBO_c , simbolizada como L en la **Ecuación 9**, se procede a considerar su forma suelta y la particulada como se muestra a continuación. [38]

$$L = L_p + L_d$$

Ecuación 9. Concentración de DBO_c .

Fuente: [38]

Dónde:

- L : concentración de DBO_c en mg/L.
- L_p : concentración de DBO_c presente en forma particulada.
- L_d : concentración de DBO_c presente en forma suelta.

3.9 Coliformes (*E. Coli*)

El énfasis primario en la calidad del agua se ha centrado en el grupo de las bacterias coliformes, entre éstas la *E. Coli*. Esto se debe a que el grupo coliformes cumple con muchos requisitos para ser indicadores de calidad, ya que son utilizados como señal de contaminación potencial por patógenos y son fácilmente detectables por análisis. Generalmente no se presenta en aguas potables y el número de bacterias existentes tiende a ser correlacionado con la extensión de la contaminación del agua. [42]

La presencia de *E. coli* en el agua indica contaminación de aguas residuales o contaminación de residuos de animales, la evolución de estas poblaciones bacterianas depende factores físicos, ecológicos y biológicos. [43]

3.9.1 Coliformes en Iber

La modelación se realiza mediante la utilización de un modelo de decaimiento de la población de coliformes de primer orden como se muestra a continuación

$$S_c = -k_{dec} \cdot C$$

Ecuación 10. Modelo de desaparición bacteriana.

Fuente: [38]

Dónde:

- S_c : modelo de desaparición bacteriana.
- k_{dec} : tasa de desaparición bacteriana.
- C : concentración de *E. Coli*.

Para poder establecer la tasa de decaimiento se debe utilizar la siguiente ecuación

$$\frac{dX(t)}{dt} = -k_{dec} \cdot X(t)$$

Ecuación 11. Determinación de tasa de decaimiento.

Fuente: [38]

Se debe aclarar que el termino k_{dec} está en función de la salinidad, la luz, la temperatura y las perdidas por sedimentación. [38]

3.10 Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para la vida, es un componente fundamental para el crecimiento de plantas y animales. Hace parte de proteínas, vitaminas, aminoácidos e interviene en proceso intracelulares de producción de energía. La atmosfera es el mayor reservorio de Nitrógeno, mientras que en el suelo y agua sus valores varían. [44]

El ciclo del nitrógeno afecta directamente el nivel del oxígeno en el agua. Este elemento puede ser un contaminante directo en el agua en sus formas de nitritos y por toxicidad del amonio, además puede causar problemas como la eutrofización de cuerpos de agua. [41]

En el ciclo del nitrógeno se consideran tres compuestos, el nitrógeno orgánico ($NOrg$), el nitrógeno amoniacal (NH_3) y nitratos/nitritos (NO_3). Dentro del nitrógeno amoniacal se incluye el nitrógeno en forma de amoniaco (NH_3) y de ion amonio (NH_4). [34] Los nitritos y nitratos se consideran en forma conjunta debido a la rapidez con la que generalmente los primeros se oxidan a nitratos.

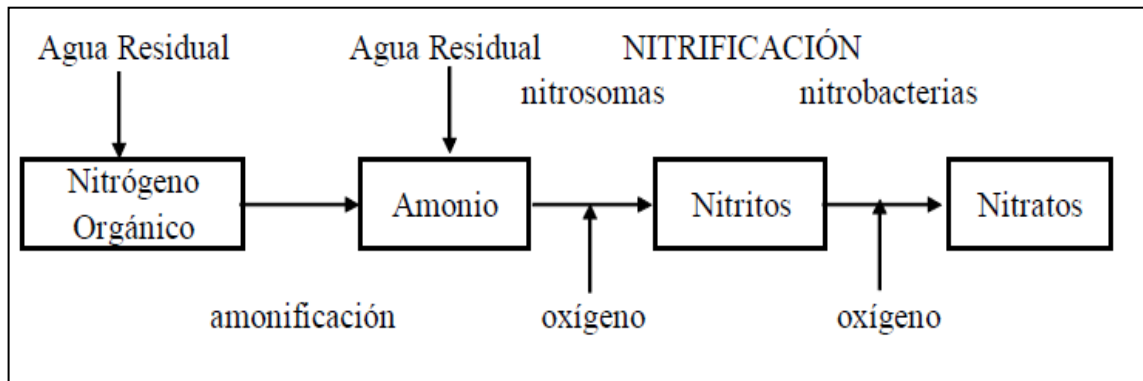


Figura 2. Ciclo del Nitrógeno.

Fuente: [38]

3.10.1 Nitrógeno orgánico

El contenido de nitrógeno orgánico en un agua incluye el nitrógeno de aminoácidos, aminas, polipéptidos, proteínas y otros compuestos orgánicos del nitrógeno. De acuerdo con el ciclo del nitrógeno, una concentración alta de

Nitrógeno orgánico es característica de una contaminación fresca o reciente y por consiguiente un peligro potencial. [41]

3.10.1.1 Nitrógeno orgánico (*N_{Org}*) en *Iber*

Dentro de la ecuación de conservación de masa del nitrógeno orgánico, el término fuente y sumidero están representados por la expresión *S_{Norg}*, que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{Norg} = -k_{hn} \cdot \theta_4^{(T-20)} \cdot N_{org} - \frac{V_{sN}}{h} \cdot N_{org}$$

Ecuación 12. Conservación de masa del nitrógeno orgánico.

Fuente: [38]

Dónde:

- k_{hn} : constante de hidrolisis del nitrógeno orgánico en amonio a 20 °C.
- T: temperatura del agua en ° C.
- N_{org} : la concentración de nitrógeno orgánico.
- V_{sN} : velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico.

3.10.2 Nitrógeno amoniacal (*NH₃*)

Entre las formas de nitrógeno, una de las de mayor interés en las aguas es el amoniacal. Este compuesto es uno de los componentes transitorios en el agua, ya que es parte del ciclo del nitrógeno y se influido por la actividad biológica. [41]

Es un producto natural de la descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados. Por lo general las aguas superficiales no deben contener amoniaco, la presencia de amoniaco libre o ion amonio se considera como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa. [41]

La concentración del ion amonio en el agua toma valores desde 10 mg/L en aguas naturales superficiales y subterráneas, hasta más de 30 mg/L en aguas residuales industriales. [45]

Entre los métodos de determinación de nitrógeno amoniacal se deben establecer diferentes factores como lo son la concentración y la presencia de interferencias, mencionado lo anterior existes dos métodos que aplican técnicas colorimétricas entre las que están la nesslerizacion y el método de la sal de fenol, las cuales se pueden aplicar con o sin destilación previa. El método de electrodo selectivo de amonio, análisis por inyección de flujo con fenatos y el método del electrodo selectivo de amonio usando adición conocida con o sin destilación previa. [45]

3.10.2.1 Nitrógeno amoniacal (NH_3) en Iber

Dependiendo de la temperatura y el pH que presente el agua se puede encontrar el nitrógeno amoniacal en dos formas, como el ion de amonio (NH_4^+) y como amoniaco (NH_3). [41]

A la hora de realizar la modelación del nitrógeno amoniacal, se debe utilizar la ecuación general de transporte en condiciones estacionarias como se muestra a continuación.

$$S_{NH_4} = -k_{hn} \cdot \theta_4^{(T-20)} \cdot N_{org} - k_{nit} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH_4$$

Ecuación 13. Ecuación general de transporte en condiciones estacionarias.

Fuente: [38]

Dónde:

- k_{nit} : constante de nitrificación a 20°C.
- NH_4 : concentración de nitrógeno en forma amoniacal.
- F_n : factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno.
- θ_3, θ_4 : coeficientes de corrección por temperatura.

Se debe emplear un factor de corrección debido a que la velocidad de nitrificación depende del OD disponible, y se hace de la siguiente forma.

$$F_n = \frac{OD}{K_{n1/2} + OD}$$

Ecuación 14. Factor de corrección.

Fuente: [38]

Dónde:

- $K_{n1/2}$: constante de semisaturación para la corrección de K_{nit} .

Esto se debe realizar por concentraciones bajas de OD. Para esta constante se toma el valor de 0,5mg/L. [46]

3.10.3 Nitratos (NO_3)

En aguas superficiales y subterráneas su presencia se debe a la consecuencia del ciclo del nitrógeno y su concentración normal tiende a un rango entre 5 y 10 mg/L, así mismo se debe tener en cuenta que el uso excesivo de abonos y con ayuda de las aguas lluvias para su arrastre, aumenta en grandes proporciones este compuesto. Los residuos industriales conforman una gran fuente de nitratos, entre los más contaminantes están los mataderos, destilerías, azucareras, textiles y fertilizantes. [44]

La descomposición natural de proteínas de plantas o animales por medio de microorganismos da lugar al catión amonio el cual se oxida a nitrito y estos a nitratos. [47]

3.10.3.1 Nitratos (NO_3) en Iber

Por medio de la ecuación de transporte se realiza la modelación de nitratos de la siguiente forma.

$$S_{NO_3} = k_{nit} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot F_n \cdot NH_3 - k_{denit} \cdot \theta_5^{(T-20)} \cdot F_{dn} \cdot NO_3$$

Ecuación 15. Ecuación de transporte.

Fuente: [38]

Dónde:

- K_{denit} : constante de desnitrificación a 20°C.
- NO_3 : concentración de nitrógeno en forma de nitratos.
- θ_3, θ_5 : coeficientes de corrección por temperatura.
- F_{dn} : factor de corrección.

El factor de corrección F_{dn} se halla con la siguiente fórmula.

$$F_{dn} = \frac{K_{dn1/2}}{K_{dn1/2} + OD}$$

Ecuación 16. Factor de corrección para Ecuación 15.

Fuente: [38]

Dónde:

- $K_{n1/2}$: constante de semisaturación para la corrección de K_{desnit}

Esto se debe realizar para concentraciones altas de OD , para esta constante se toma el valor de 0,1mg/L. [38]

4 METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo del trabajo de grado se llevó a cabo por medio de 4 fases que son desglosadas a continuación.

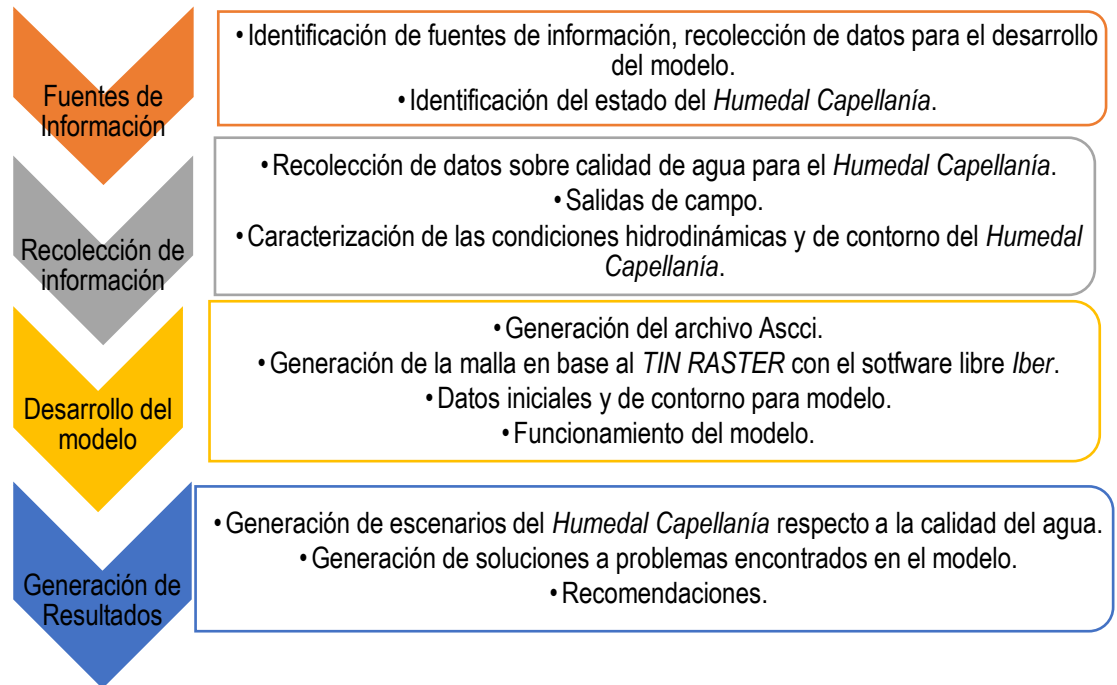


Diagrama 1. Fases de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía.

Fuente: Autores.

- *Primera fase*, es aquí donde se realizaron las actividades preliminares relacionadas con la búsqueda de fuentes de información y donde se establecen los parámetros de calidad de agua para los modelos.
- La *segunda fase* comprende la compilación de los datos de calidad de agua obtenidos del humedal, la cual abarca parte importante del modelo computacional, de igual manera se consignan las condiciones hidrodinámicas que requería el software como el caudal, rugosidad entre otros para generar un modelo hidrodinámico. Durante esta fase también se realizaron salidas de campo para reconocer la zona de estudio del humedal y determinar las entradas y salidas al ecosistema.
- En la *tercera fase* fueron necesarios los datos de calidad de agua, hidrodinámicos y de contorno para así, todo en conjunto, lograr realizar el modelo y con ello una geometría que está comprendida por un *TIN-RASTER* que se obtiene por medio de las curvas de nivel del *Humedal Capellanía*, para poder correr el modelo y obtener resultados para la última fase.

- La generación de resultados fue la *última* fase de la metodología, donde se hizo la modelación de la calidad del agua para cada uno de los periodos de retorno (10, 25 y 100 años).

4.1 Fuentes de información

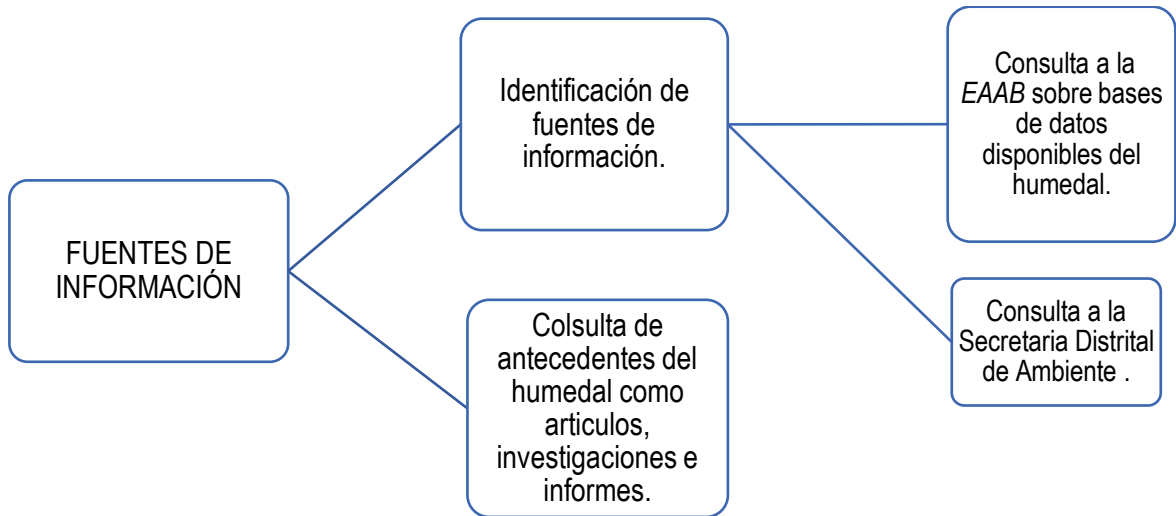


Diagrama 2. Fase N° 1 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Como se indicó previamente, la primera fase del proyecto se basó en la búsqueda de fuentes de información del *Humedal Capellanía* que lograran dar una noción de los datos disponibles relacionados con la hidrología, hidrodinámica y calidad de agua del humedal.

Para ello, se hizo una primera búsqueda en fuentes virtuales y posteriormente se realizó una consulta a las entidades relacionadas con el manejo del humedal, para verificar si previamente se había realizado algún análisis de calidad de agua, o que estudios ambientales se habían llevado a cabo en el humedal debido a que hasta esta fase se presentaba poca disponibilidad de información en las bases de datos investigadas, que brindarían soportes para desarrollar el caso de estudio. Las entidades consultadas fueron la *Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)*, la cual facilitó el *Plan de Manejo Ambiental (PMA)*, y también se acudió a la *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)* donde se compartieron documentos relativos al análisis de las entradas del humedal, sus caudales y la calidad del agua y un estudio de banco de semillas del mismo.

Además como se requería información geográfica para ser introducida a *ArcGIS* y posteriormente a *Iber* se solicitaron al *Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)* los recursos digitales del humedal.

En caso de identificar datos faltantes para el desarrollo del modelo serán necesarias visitas de campo a la zona de estudio, se hará la planificación y las diligencias pertinentes para tener autorización de las entidades competentes.

4.2 Recolección de información

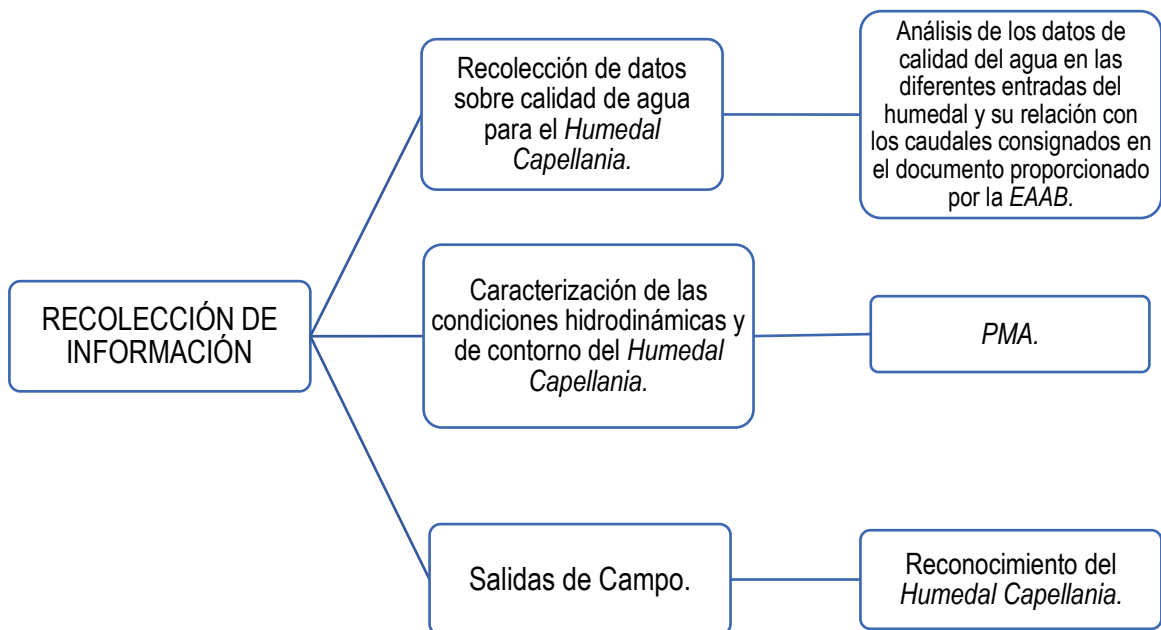


Diagrama 3. Fase N° 2 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellania.
Fuente: Autores.

4.2.1 Recolección de datos sobre calidad de agua para el humedal

Como en el *PMA*, los datos de calidad de agua eran insuficientes y poco fiables, se hizo uso como datos de entrada para la modelación lo consignado en el documento que fue proporcionado por la *EAAB* ya que aquí si se logró acceder a los registros completos obtenidos de un muestreo realizado en varios puntos del humedal donde se midieron una variedad de parámetros de calidad de agua y entre ellos todos los necesarios para este caso de estudio, así mismo fue posible acceder a la batimetría que sería útil para el modelo hidrodinámico.

El muestreo de la calidad de agua realizado por el acueducto, fue tomado de cuatro (4) colectores de entrada que fueron identificados dentro del informe cada uno como *HUCAP (Humedal Capellanía)* con un número que varía.

En el punto denominado *HUCAP 09 (Colector de la esperanza)*, considerado la entrada principal debido a que aporta el mayor caudal al *Humedal Capellanía*, el muestreo se realizó en tiempo real de dos (2) eventos de lluvia por colector en tiempo húmedo. Se tomaron al menos cuatro muestras de agua distribuidas uniformemente durante cada evento de lluvia y se midió también el caudal de entrada o salida en el momento de cada toma de muestra.

Los muestreos tomados fueron analizados y se hizo estudios de los siguientes parámetros: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sedimentables (SSS) y Volátiles (SSV), *Escherichia Coli (E. Coli)*, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Nitratos, Nitrógeno amoniacal, Fósforo total, Fósforo soluble, pH , Temperatura, Conductividad, grasas y aceites y tensos activos. En el numeral **5.2.3. Salidas de campo** del documento se especifican los resultados y los métodos de medición para los parámetros.

4.2.2 Caracterización de las condiciones hidrodinámicas y de contorno del *Humedal Capellanía*

Dentro de las condiciones hidrodinámicas del humedal se contemplan los caudales máximos de entrada al espejo de agua principal del humedal, y la salida de este para los periodos de retorno estudiados (10, 25 y 100 años), debido a que este cuerpo de agua es lentic de flujo cerrado no tiene una salida que se pueda considerar como vertedero o colector, también se le asigna la rugosidad que tiene cada zona del humedal predeterminada por el uso del suelo de toda la superficie, el calado del cuerpo de agua, para determinar la condición inicial del medio y el aporte de la precipitación también en diferentes instantes de tiempo.

4.2.3 Salidas de campo

Se realizarían tres salidas de campo para reconocer la zona de estudio, identificar los aportes de las entradas y salidas del humedal y recolectar la mayor información necesaria y útil para el desarrollo del modelo, dichas visitas se programaron con el personal de la *SDA* que estaba a cargo del cuidado y vigilancia del ecosistema.

Como materiales en las salidas de campo se implementaron:

- Mira
- GPS (Aplicación móvil)
- Cámara fotográfica
- Metro
- Libreta de apuntes

4.3 Desarrollo del modelo

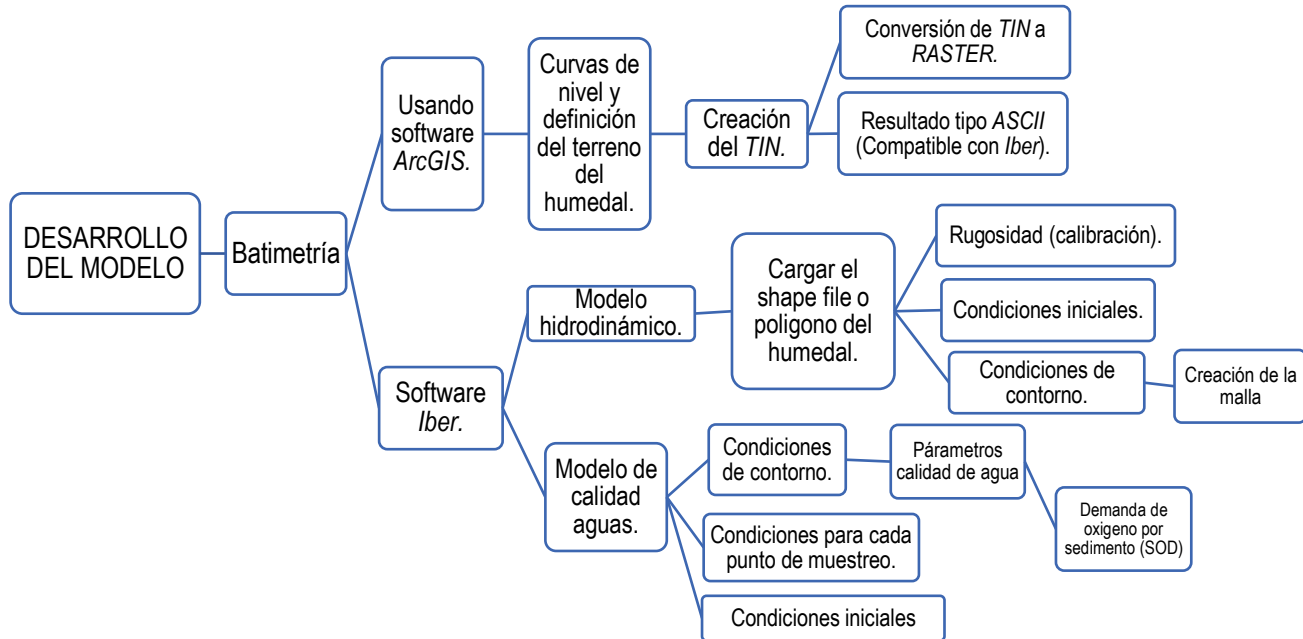


Diagrama 4. Fase N° 3 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

4.3.1 Batimetría

4.3.1.1 Software ArcGIS

- Curvas de nivel y delimitación del terreno de estudio del *Humedal Capellanía*

A partir de la información geográfica de la *EAAB* que proporciono las curvas de nivel con los datos de batimetría y que a su vez fueron extraídas de un modelo de elevación digital (*DEM*), se hizo la corrección de las curvas de nivel que no representaban ningún dato relevante dentro del humedal según el criterio de la altura (debido a que este tiene un rango entre los 2538 m.s.n.m a los 2570 m.s.n.m), y de esto a su vez se infiere que la corriente de agua presenta una dirección de norte a sur como se observó en campo.

- Creación del *TIN*

Para la creación del *TIN*, en el software ArcGIS, se hizo uso de las herramientas *Arctoolbox\3D Analyst\ 3D Analyst Tools\ TIN Management\ Create TIN*, sucesivamente, utilizando las curvas de nivel del paso anterior, dando como resultado los datos geográficos digitales del *Humedal Capellanía* basados en vectores que se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices

conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Consecuente a esto, se obtuvo un archivo *ASCII* este tipo de archivo *RASTER* de intercambio consta de información de encabezamiento que contiene un conjunto de palabras clave, seguida de los valores de las celdas en un orden mayor de filas, de esta manera se creó un *ASCII* con la extensión *txt*.

- Conversión *TO RASTER* y a archivo tipo *ASCII*

Debido a que *ArcGIS* no es capaz de leer los archivos *ASCII* directamente se realizó la conversión de *ASCII* a un formato *RASTER* por medio de *ArcToolbox/Conversion Tools/To Raster/ASCII To Raster*.

- Resultado tipo *ASCII*

Este archivo tipo texto se utilizará en el siguiente paso en el software *Iber*, ya partiendo de un *DEM* se generó una malla basada en una red de triángulos rectángulos irregulares donde todo se ajusta de la mejor manera a la realidad del *Humedal Capellanía*.

4.3.1.2 Software *Iber*

Como primera instancia se realizó la importación del *shapefile* del *Humedal Capellanía*, es decir los polígonos que se obtuvieron de la delimitación de la zona de estudio para que de esta manera se genere una geometría que sería más o menos la representación idealizada del problema que se desea estudiar.

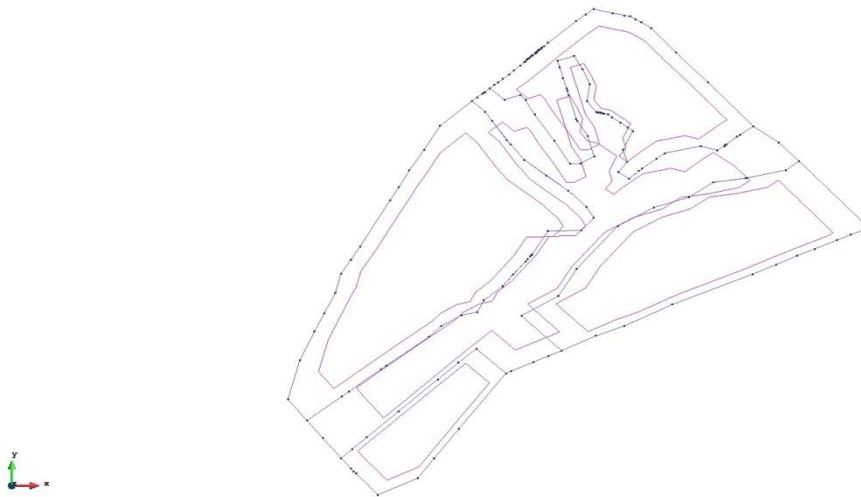


Figura 3. Importación a *Iber* del shapefile del Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Para continuar con el desarrollo del modelo en el software, se insertan los datos en primera instancia para el *módulo hidrodinámico* que es un requerimiento indispensable para posteriormente poder correr el *módulo de calidad de aguas*.

Siendo así, *Iber* solicita condiciones de contorno e iniciales, dentro de las cuales se contemplan la determinación de entradas y salidas que tiene el humedal y con ello los caudales máximos correspondientes a cada escenario de los diferentes periodos de retorno a estudiar (10, 25 y 100 años). A continuación se muestran definidas la entrada y la salida del *Humedal Capellanía* en el software.

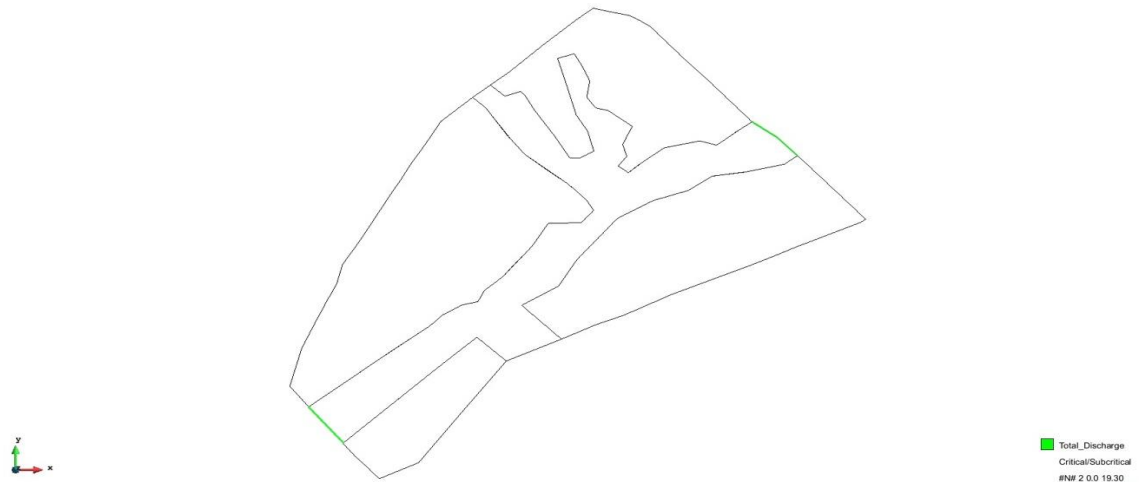


Figura 4. Definición de la entrada y salida del Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Luego de insertar las condiciones de contorno se predeterminan las condiciones iniciales, donde *Iber* solo permite asignar valores y datos a superficies, es decir deja seleccionar un polígono que representa las diferentes áreas del ecosistema, dentro de las que se contempló el al calado que presenta el cuerpo de agua del humedal.

En el *PMA* del humedal se encontraron los datos de la elevación máxima del reservorio en diferentes periodos de retorno, y entre ellos los de este caso de estudio, con base a ellos se hizo la correspondiente conversión de centímetros a metros que son los que *Iber* solicita y se presentan en la **Tabla 3**.

| Periodo De Retorno | Calado (cm) | Calado (m) |
|--------------------|-------------|------------|
| 10 | 42,70 | 0,4270 |
| 25 | 42,76 | 0,4276 |
| 100 | 42,88 | 0,4288 |

Tabla 3. Calado del cuerpo de agua principal del Humedal Capellanía para periodos de retorno de 10, 25 y 100 años.
Fuente: Autores con base al PMA. [4]

Posteriormente, *Iber* solicita especificar los datos de uso de suelo por superficies o polígonos, y con ello el mismo programa podrá determinar la rugosidad, debido a que al introducirlos *Iber* automáticamente asigna los valores que ya vienen predeterminados para contemplar el *Coefficiente de Manning*. Hasta este punto y con los datos consignados *Iber* podría solucionar así el modelo hidrodinámico.

Para el módulo de calidad de agua, el programa también exige condiciones de contorno e iniciales para todos los parámetros a analizar. Para introducir las condiciones de contorno se seleccionaron los mismos puntos de muestreos y solo algunos de los parámetros analizados en el informe de la *EAAB*, y para las condiciones iniciales se hizo uso de los registros consignados en el *PMA* y el estudio en el espejo de agua principal.

A su vez en este módulo, *Iber* exige que se ingrese el valor de *Demanda de Oxígeno por el Sedimento (SOD)*, ya que tiene relación directa sobre los valores de *Oxígeno Disuelto* disponibles en el medio. En uno de los manuales de referencia del programa, se consignan los valores de la demanda de oxígeno por el sedimento según el tipo de fondo presentados en la **Tabla 4**.

| Tipo de Fondo | k_{dos} ($gO^2/m^2/dia$) | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------|
| | Rango | Media |
| Fangos de origen urbano (recientes) | 2,0-10,0 | 4,0 |
| Fangos de origen urbano (antiguos) | 1,0-2,0 | 1,5 |
| Fangos en estuarios | 1,0-2,0 | 1,5 |
| Suelos arenosos | 0,2-1,0 | 0,5 |
| Suelos minerales | 0,05-0,1 | 0,07 |

Tabla 4. Valores de SOD según el tipo de fondo.
Fuente: Autores con base a Thomann 1972. [34]

Adicionalmente la demanda de oxígeno por el sedimento puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$SOD = \frac{k_{dos}}{h}$$

Ecuación 17. Demanda de Oxígeno.
Fuente: [34]

Siendo k_{dos} el valor obtenido en la clasificación de la **Tabla 4**. y h es el calado.

Luego de introducir las condiciones hidrodinámicas y de calidad de agua se insertan los datos del problema para que *Iber* pueda realizar la modelación, es aquí donde se introduce el tiempo que se desea dure la modelación y la frecuencia para que se den los resultados y se realicen los cálculos.

En este paso, también se seleccionaron cuales parámetros de calidad de agua serían desactivados y de cuales se leerían los registros, a su vez dentro de los datos del problema se solicita especificar el *coeficiente de difusión* de cada parámetro en el medio, en este caso, el agua.

Puntualmente para el estudio a totalidad del parámetro *Escherichia Coli* y su proceso de desaparición bacteriana *Iber* solicita ingresar el dato T_{90} , que indica el tiempo necesario para que se produzca una reducción del 90% en el número de bacterias. En el *Manual de referencia del módulo de calidad de aguas* usado como guía durante toda la modelación de este caso de estudio se sugieren dos alternativas para el cálculo del T_{90} , el modelo de Mancini y el modelo de Canteras.

El seleccionado fue el de Mancini debido a que en la mayoría de casos de estudios similares de modelación de cuerpos de agua en zonas tropicales consultados a lo largo de este caso de estudio fue el elegido, por otra parte el modelo de Canteras está basado en la desaparición bacteriana del Mar Cantábrico (zona templada). [48]

El modelo de Mancini se encuentra regido por la siguiente ecuación: [49]

$$T_{90} = (0.8 + 0.02 S)1.07^{(T-20)} + 0.086 \frac{I_0}{k_e H_c} (1 - e^{(-k_e H_c)})$$

Ecuación 18. Modelo de Mancini para el cálculo del T_{90} .

Fuente: [34]

Siento T la temperatura del agua en °C, S es la salinidad en unidades de kg/m^3 , I_0 es la radiación solar en la superficie (W/m^2), k_e es el coeficiente de extinción de la luz en m^{-1} y H_c es la profundidad de la capa vertical en la que se extienden los coliformes en m. Se elige este método debido a que es el ideal para desarrollar en aguas someras (poco profundas).

Ya , como parte final y como requisito para poder poner en marcha el modelo, se solicita la generación de una malla la cual busca la discretización del modelo generado a partir de la geometría, esta se construye con un tamaño de 5 metros de distancia entre cada uno de los triángulos que conformarían la malla y la cual se asemejara lo mayormente posible a la realidad del humedal, posteriormente y para finalizar con el mallado, *Iber* tiene una herramienta la cual facilita la asignación de elevación al modelo desde un archivo externo y es aquí donde se carga el archivo *ASCII* que se obtuvo preliminarmente.

Finalmente, después de ingresar en *Iber* los datos hidrodinámicos, de calidad de agua y datos del problema, se selecciona la herramienta calcular y se daría la generación de los resultados.

4.4 Generación de resultados

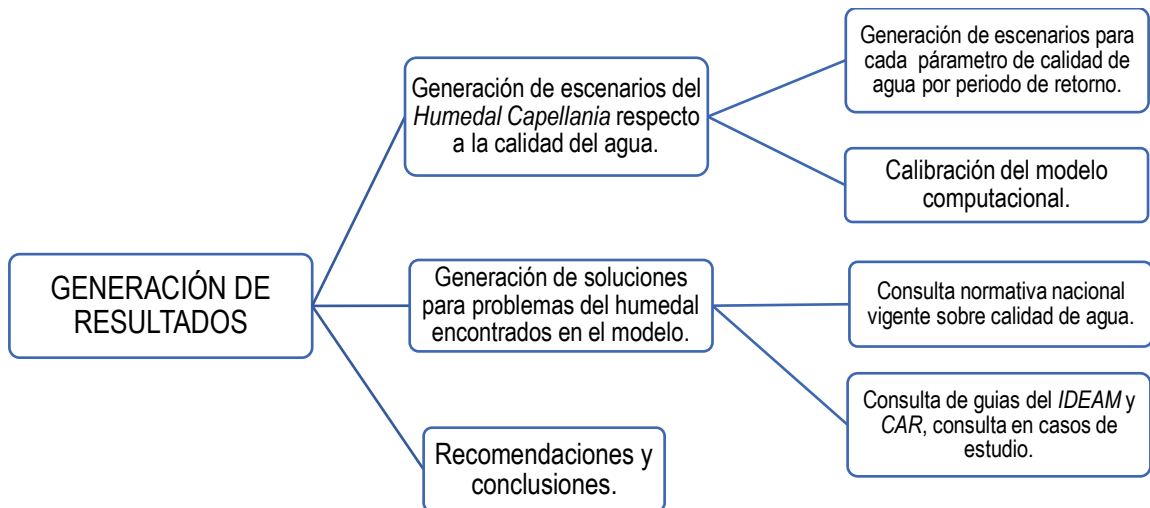


Diagrama 5. Fase N° 4 de la metodología para el desarrollo del modelo en el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

4.4.1 Generación de escenarios del *Humedal Capellanía* respecto a la calidad del agua

Al correr el modelo y obtener los escenarios generados para los siete (*Temperatura, DBO, OD, E. Coli, Nitrógeno orgánico, Nitrato y NH₃*) parámetros estudiados en los tres diferentes periodos de tiempo (10, 25 y 100 años), se procede a analizar el estado general en cuanto a calidad de agua del medio.

Por otra parte se realiza un estudio detallado por parámetro, para identificar el comportamiento de cada uno y determinar correlaciones entre los mismos.

Esto conllevará a estimar cual parámetro es más determinante en los escenarios modelados y a su vez permite tomar acciones que encaminen a mejorar la calidad del agua en el humedal y prestar especial atención al o los parámetros que resulten significativos.

4.4.2 Generación de soluciones para problemas del humedal encontrados en el modelo

Con base en el análisis realizado previamente y la revisión bibliográfica de la normativa ambiental nacional vigente, casos de estudio similares, guías de calidad de agua de entidades (*IDEAM, CAR, SDA*), entre otros, se procede a la identificación de problemas que afecten la calidad del recurso hídrico en el humedal ya sean de tipo hidrodinámico o bien sea por factores fisicoquímicos y biológicos.

Dependiendo de ello, se buscaron soluciones que fueran viables para el contexto (geográfico, ecológico, económico) del medio y así garantizar la recuperación o mantenimiento del ecosistema según el caso.

4.4.3 Recomendaciones y conclusiones

Teniendo como soporte los análisis del estado actual del medio, y su contraste con el estado ideal del mismo, se procederá a estimar medidas de corrección, manejo, control y recomendaciones que puedan ser llevadas a cabo por la *EAAB* quien tiene a cargo el humedal.

A lo largo del desarrollo de las fases en las que se llevó a cabo la metodología y todo el trabajo de grado, surgieron diferentes deducciones de la dinámica en general del humedal, estas serán expuestas y servirán como punto de partida para futuras investigaciones o casos de estudio relacionadas con la modelación hidrodinámica de humedales, *Iber* y el mismo *Humedal Capellanía*.

5 RESULTADOS

5.1 Fuentes de información

Como se mencionó en el desarrollo de la metodología, al acudir a los distintos entes (*SDA, EAAB, IGAC*) se logró conseguir una variedad de estudios previos, análisis e información desarrollados entorno al *Humedal Capellanía*.

Principalmente como base de partida informativa se usó el *PMA*, del que se obtuvo total acceso a sus capítulos donde se realizó caracterización espacial, climatológica, geológica, hidrológica, ecológica y social. Sin embargo se denoto una gran ausencia de estudio en cuanto a la calidad de agua del medio, ya que aunque se menciona, no se tienen bases teóricas ni experimentales que determinen el estado del recurso en el medio.

Por lo que posteriormente al recurrir a la *EAAB*, quien actualmente está encargado del manejo de los humedales, facilito con fines académicos toda la información disponible no solo sobre el propio humedal sino también sobre los afluentes y efluentes relacionados con el mismo. Dentro de estos datos se encontró información hidrodinámica como caudales, calado, diámetros de tuberías de entrada y salida, batimetrías y otros que serían útiles para el diseño del modelo. Además estaba disponible un trabajo de campo donde se realizó muestreo de agua en los diferentes puntos de entrada y salida del humedal, y los cuales serían posteriormente analizados por un laboratorio que determino diversos parámetros fisicoquímicos y biológicos dentro de los que se contemplaban los de este caso de estudio. A continuación se relacionan los cuatro puntos de toma de muestras mostrados en el informe y que posteriormente serían utilizados para la modelación.

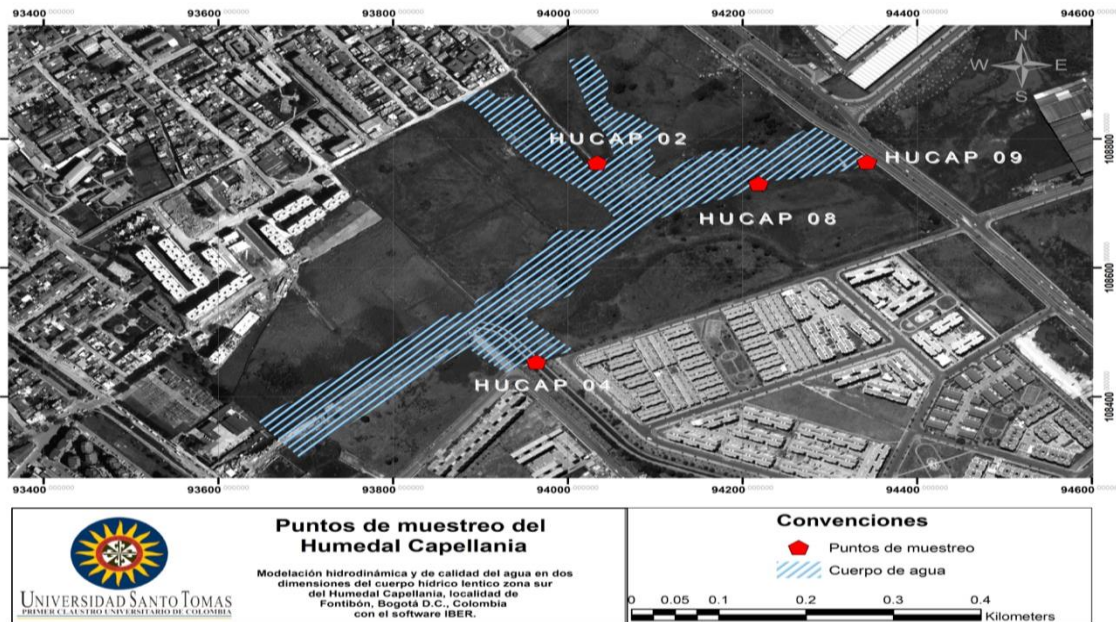


Figura 5. Puntos de muestreo para Calidad de Aguas tomados en el estudio de la EAAB.

Fuente: Autores.

Así mismo, se presentan las coordenadas de cada uno de los puntos.

| Id | Nombre (Entrada o salida) | Coordenadas | |
|----------|---------------------------|-------------|----------|
| | | N | E |
| HUCAP 02 | Colector 2 | 108882,90 | 93949,46 |
| HUCAP 04 | Canal de Fontibón | 108435,20 | 93986,14 |
| HUCAP 08 | Colector Calle 26 | 108671,57 | 94402,92 |
| HUCAP 09 | Colector de la Esperanza | 108866,09 | 94234,54 |

Tabla 5. Puntos de muestreo tomados para el caso de estudio y sus coordenadas.

Fuente: Autores.

Para el desarrollo del modelo se seleccionaron sólo algunos de los parámetros de calidad analizados en el humedal por la EAAB, debido a que aunque para la modelación en *Iber* se requieren datos relativos a la dinámica física, biológica y química del medio y la interacción entre estos, en cuanto a calidad de agua solo se estudian las siguientes variables y se solicita que se ingresen en las unidades estipuladas a continuación.

| Variable | Unidad |
|----------------------------------------|-------------------|
| Oxígeno disuelto (OD) | kg/m ³ |
| Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) | kg/m ³ |
| Nitrógeno Orgánico (Norg) | kg/m ³ |
| Nitrógeno Amoniacal (NH ₃) | kg/m ³ |
| Nitritos y nitratos (NO ₃) | kg/m ³ |
| Escherichia Coli (E. Coli) | ufc/100 mL |
| Temperatura | °C |

Tabla 6. Parámetros de calidad de agua y unidades estudiados por Iber.

Fuente: Autores.

Iber estudia solo estos parámetros debido a que el modelo resuelve una ecuación de transporte 2D promediada en profundidad para cada especie, incluyendo las transformaciones bioquímicas para modelar su interacción e interdependencia, y son estos siete parámetros los que más interrelación manejan para la disponibilidad de oxígeno en el medio. [48]

El forzamiento por oleaje y la dispersión de sustancias solubles por efecto o ausencia del oleaje, que puede ser relevante en aguas de transición y costeras y determinante en cuerpos hídricos lenticos, se puede incluir en el cálculo por medio de un campo de oleaje o caudales introducidos por el usuario.

Debido a su carácter 2D promediado en profundidad, el módulo de calidad de aguas de *Iber* no puede representar procesos de estratificación y por lo tanto sólo es aplicable a la simulación del campo lejano de vertidos de aguas residuales. [18]

Como ya se disponía de la información de calidad de agua que *Iber* exige como datos de entrada, ahora se necesitaba la información geográfica relacionada con la zona de estudio. Por lo tanto, se recurrió al *IGAC* quien brindo una orto foto que sería la base para el desarrollo de los polígonos y la delimitación de la zona de estudio.

5.2 Recolección de información

5.2.1 Recolección de datos sobre calidad de agua para el Humedal Capellanía

Para los datos de muestreo obtenidos de la *EAAB*, se hizo una revisión de los valores registrados y más específicamente de los parámetros útiles para el modelo. A continuación se relacionan los datos registrados por cada parámetro en los diferentes puntos de muestreo.

Cabe resaltar que a los datos que brindo el acueducto, se le realizó la conversión de unidades, ya que los valores de Oxígeno Disuelto, *DBO*, Nitrógeno Orgánico, *NH₃* y *NO₃* se reportan en mg/L e *Iber* los solicita en kg/m³.

Por otra parte el *Iber* utiliza datos de coliformes generados con un método de siembra en superficie por lo que las unidades de entrada solicitadas son *Unidades Formadoras de Colonia* (ufc/100mL); en los cuerpos de agua naturales normalmente se usa un método que tolere valores altos y bajos de abundancia el *Numero Más Probable*. Es por eso que en este caso estudio los datos de coliformes que brindo el acueducto se reportaron en NMP/100mL, a pesar de que provienen de métodos distintos se usaron como equivalentes teniendo en cuenta las implicaciones en la interpretación de los resultados.

| HUCAP 02 | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Parámetro | Unidades | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Promedio | Unidades lber | Conversión |
| Temperatura | °C | 21,9 | 21,9 | 21,9 | 21,9 | 21,9 | °C | 21,9 |
| OD | mg/L | 0,1 | 0,36 | 0 | 2,6 | 0,765 | kg/m ³ | 0,000765 |
| DBO | mg/L | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | kg/m ³ | 0,005 |
| E. Coli | NMP/100mL | 2130000 | 1300000 | 2720000 | 12900000 | 4762500 | ufc/100mL | 4762500 |
| Nitrógeno Orgánico | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |
| NO₃ | mg/L | 0,202 | 0,064 | 0,183 | 0,289 | 0,1845 | kg/m ³ | 0,0001845 |
| NH₃ | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |

Tabla 7. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 02.
Fuente: Autores. [50]

Este punto de muestreo, denominado en el informe del acueducto como *HUCAP 02* es un colector de aguas lluvias que está localizado en el costado occidental del humedal parte baja.

| HUCAP 08 | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Parámetro | Unidades | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Promedio | Unidades lber | Conversión |
| Temperatura | °C | 22,5 | 22,5 | 22,5 | 22,5 | 22,5 | °C | 22,5 |
| OD | mg/L | 1,13 | 1,53 | 1,03 | 0,96 | 1,1625 | kg/m ³ | 0,0011625 |
| DBO | mg/L | 14 | 9 | 9 | 10 | 10,5 | kg/m ³ | 0,0105 |
| E. Coli | NMP/100mL | 200000 | 387000 | 211000 | 649000 | 836500 | ufc/100mL | 836500 |
| Nitrógeno Orgánico | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |
| NO₃ | mg/L | 0,447 | 0,427 | 0,416 | 0,408 | 0,4245 | kg/m ³ | 0,0004245 |
| NH₃ | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |

Tabla 8. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 08.
Fuente: Autores. [50]

El punto de monitoreo *HUCAP 08* está localizado en el costado nororiental del humedal en cercanías de la avenida la Esperanza, donde descarga una tubería que proviene de la calle 26, esta tubería aunque es relativamente nueva, ya sirve las aguas residuales y además representa un gran aporte de entrada al medio.

| HUCAP 04 | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Parámetro | Unidades | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Promedio | Unidades Iber | Conversión |
| Temperatura | °C | 21,4 | 21,3 | 21,3 | 21,2 | 21,3 | °C | 21,3 |
| OD | mg/L | 5,73 | 3,56 | 7,73 | 3,9 | 5,23 | kg/m ³ | 0,00523 |
| DBO | mg/L | 27 | 16 | 10 | 8 | 15,25 | kg/m ³ | 0,01515 |
| E. Coli | NMP/100mL | 310000 | 9700 | 242000 | 194000 | 188925 | ufc/100mL | 188925 |
| Nitrógeno Orgánico | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |
| NO₃ | mg/L | 1,25 | 1,24 | 1,29 | 1,37 | 1,2875 | kg/m ³ | 0,0012875 |
| NH₃ | mg/L | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | kg/m ³ | 0,0006 |

Tabla 9. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 04.
Fuente: Autores. [50]

| HUCAP 09 | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| Parámetro | Unidades | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Promedio | Unidades Iber | Conversión |
| Temperatura | °C | 21,3 | 21,4 | 21,4 | 21,3 | 21,35 | °C | 21,35 |
| OD | mg/L | 3,93 | 1,76 | 1,1 | 1,16 | 1,9875 | kg/m ³ | 0,00189 |
| DBO | mg/L | 284 | 58 | 68 | 38 | 112 | kg/m ³ | 0,112 |
| E. Coli | NMP/100mL | 21800 | 124000 | 173000 | 387000 | 176450 | ufc/100mL | 176450 |
| Nitrógeno Orgánico | mg/L | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | kg/m ³ | 0,001 |
| NO₃ | mg/L | 0,398 | 0,788 | 0,39 | 0,386 | 0,4905 | kg/m ³ | 0,0004905 |
| NH₃ | mg/L | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | kg/m ³ | 0,001 |

Tabla 10. Datos calidad de agua punto de muestreo HUCAP 09.
Fuente: Autores. [50]

El punto denominado *HUCAP 09* está localizado en la avenida la Esperanza costado Occidente Oriente en el lado occidental del humedal. En este punto se observa un canal el cual, de acuerdo a información suministrada por la *EAAB* recibe las aguas provenientes del colector la Esperanza.

Posterior a la recopilación de los datos y como *Iber* solo recibe un dato de calidad por cada entrada o salida que tenga el cuerpo de agua se optó por realizar un promedio de cada una de las variables para cada punto de muestreo que se resume en la siguiente tabla.

| Parámetro | Unidades | HUCAP 02 | HUCAP 04 | HUCAP 08 | HUCAP 09 |
|---------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura | °C | 21,9 | 21,3 | 22,5 | 21,35 |
| OD | kg/m ³ | 0,000765 | 0,00523 | 0,0011625 | 0,00189 |
| DBO | kg/m ³ | 0,005 | 0,01515 | 0,0105 | 0,112 |
| E. Coli | ufc/100mL | 4762500 | 188925 | 836500 | 176450 |
| Nitrógeno Orgánico | kg/m ³ | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 | 0,001 |
| NO₃ | kg/m ³ | 0,0001845 | 0,0012875 | 0,0004245 | 0,0004905 |
| NH₃ | kg/m ³ | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 | 0,001 |

Tabla 11. Ponderación de variables por punto de muestra.
Fuente: Autores.

5.2.2 Caracterización de las condiciones hidrodinámicas y de contorno del Humedal Capellanía.

A lo largo del análisis de la información disponible se da a conocer que la entrada principal (la que mayor caudal aporta y el cual es constante) del *Humedal Capellanía* es el Colector de la Avenida de la Esperanza, ya que pese a que el humedal presenta dos entradas más las cuales se conocen como Colector de lluvias y el Colector de la Calle 26 estas no representan un aporte de caudal constante o relevante para el modelo hidrodinámico porque en los tiempos de muestreo de calidad de agua realizados por el acueducto ninguno de estos registro caudal.

A su vez, se identifica como única salida del humedal el Canal de San Antonio que no tiene contacto directo alguno con el cuerpo de agua principal, pero que recibe las aguas servidas del mismo por medio de una tubería. Cabe resaltar que el cuerpo del humedal es lentico por lo tanto no tiene un flujo de agua constante dirigido a dicho canal. A continuación se presenta un mapa donde se delimita la entrada y salida del *Humedal Capellanía*.

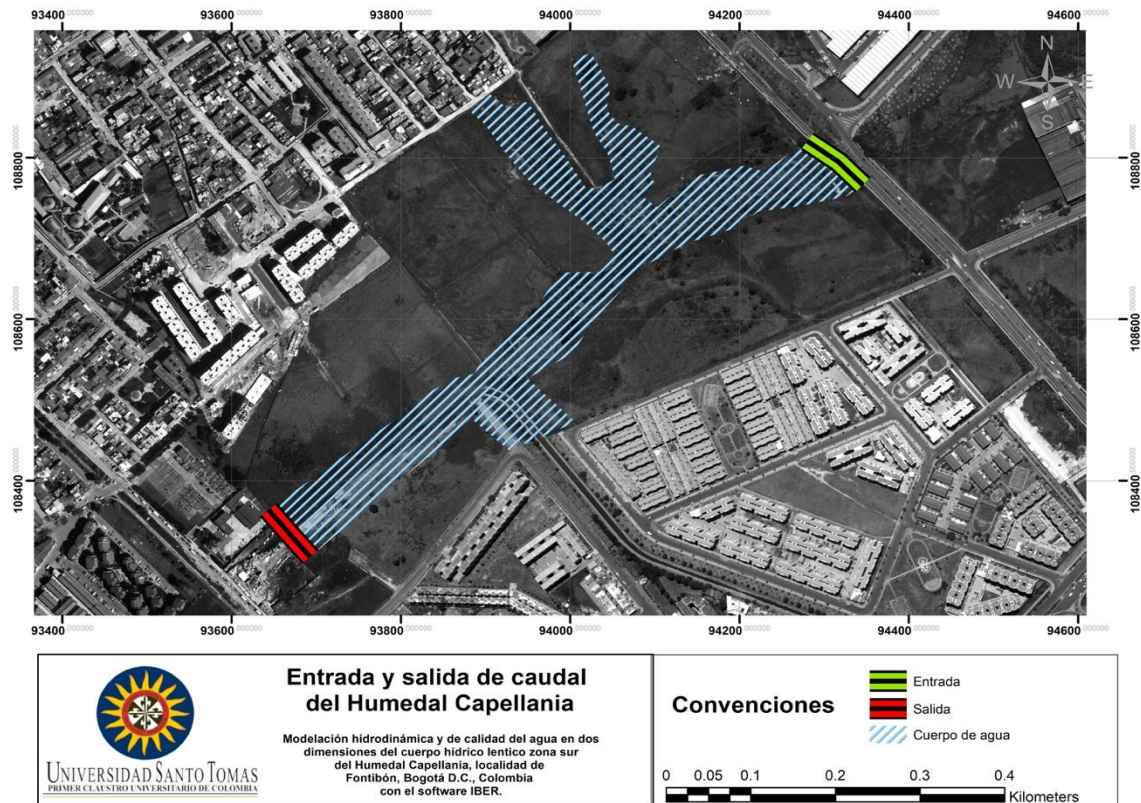


Figura 6. Asignación de entrada y salida del Humedal Capellania.
Fuente: Autores.

A su vez, se utilizaron los caudales máximos asignados a cada periodo de retorno (10, 25 y 100 años) en el estudio del acueducto, esto se implementó debido a que para el caso de estudio se plantearían tres escenarios y así se realizó una comparación de calidad de agua temporal.

| <i>Periodo De Retorno (años)</i> | <i>Caudal Entrada (m³/s)</i> |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| 10 | 19,30 |
| 25 | 23,12 |
| 100 | 28,00 |

Tabla 12. Caudales máximos por periodo de retorno.
Fuente: Autores con base en [4]

Para la rugosidad, el PMA da un concepto de cada uso del suelo que se tiene en el ecosistema y adicionalmente se tiene en cuenta que los terrenos del humedal

actualmente no son utilizados para nada que afecte el ecosistema, debido a que hace menos de una década este fue encerrado y prohibido el acceso al público.

Con base en esto se asignó una clasificación a cada zona del humedal, donde en la parte superior del ecosistema se identifica un amplia área de vegetación densa es decir con presencia desde pequeños arbustos hasta árboles en su estado natural; también se identificó vegetación dispersa en la cual se encuentran partes áridas y arbustos y cerca al espejo de agua que tiene el humedal se encuentra una zona de solo arbustos los cuales rodean el cuerpo de agua. En relación a esto, los valores para la n de Manning que solicita *Iber* están predeterminados por el mismo software que se relacionan enseguida.

| Uso Del Suelo | Rugosidad (n Manning) |
|----------------------|-----------------------------|
| Vegetación Dispersa | 0,08 |
| Vegetación Densa | 0,18 |
| Arbustos | 0,05 |
| Rio (Cuerpo De Agua) | 0,025 |

Tabla 13. Coeficiente de rugosidad según uso del suelo en Iber.
Fuente: Autores con base en [4]

Siendo así, se pueden observar en la **Figura 7.** concretamente los usos del suelo asignados en base a la información disponible en el *PMA* del humedal.

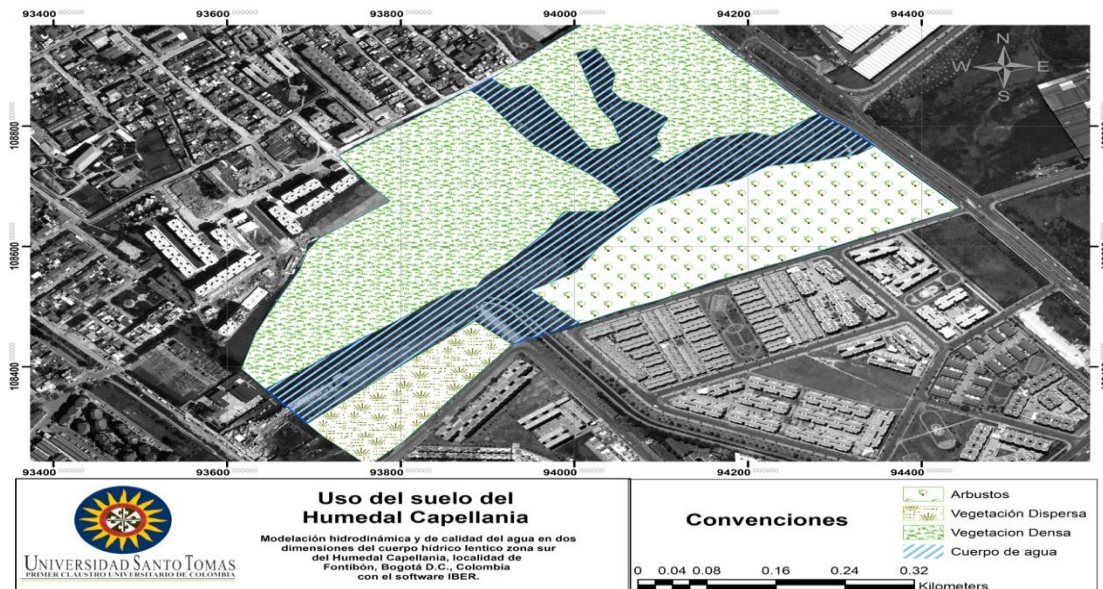


Figura 7. Asignación de uso del suelo Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

5.2.3 Salidas de campo

Con autorización de la SDA y en compañía de los funcionarios encargados del humedal se realizaron dos visitas al ecosistema.

En la primera visita realizada el *miércoles 01 de Noviembre del 2017* sobre el medio día, se hizo un recorrido por toda la extensión del humedal con el fin de tener un reconocimiento del área de estudio, en su zona sur y donde se encuentra el espejo de agua principal, debido a que la zona norte del mismo es correspondiente a predios privados y a muchos de ellos no se tiene acceso. El fraccionamiento del ecosistema esta denotado por la Avenida la Esperanza, lo que impide que el ecosistema en sus dos partes se conecte. Se hizo una guía por parte del personal de la SDA donde se explicó la dinámica natural del sistema y su ecología. En esta visita no se recolectaron datos porque se realizó una caminata ecológica donde se abordaron temas como las especies de flora y fauna permanente y migratoria que para este caso no son objeto de estudio, sin embargo se estableció vínculo con el personal de la secretaría para las posteriores visitas que fueran necesarias y la información que pudieran facilitar.

En la segunda salida llevada a cabo el día *lunes 27 de Noviembre del 2017*, ya se tenía una noción de la información faltante por lo que en campo se ejecutaron mediciones de diámetro y lámina de agua en los colectores con ayuda de la mira y se logró la identificación de puntos de entrada y salida de recurso hídrico al ecosistema por medio de la georreferenciación (aplicación móvil *GPS*). Los datos registrados en esta visita se registran a continuación.

| Entradas y Salidas | Coordenadas (GMS) | | Diámetro tubería (m) |
|-------------------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------|
| | N | O | |
| Entrada Canal de Fontibón | 4°40'33,924" | 74°7'55,283" | 1,25 |
| Colector Calle 26 | 4°40'30,613" | 74°7'50,918" | 0,9 |
| Colector la Esperanza | 4°40'32,102" | 74°7'43,456" | 1,0 |
| Salida humedal a Canal San Antonio | 4°40'23,633" | 74°7'56,318" | 1,5 |

Tabla 14. Identificación de puntos, coordenadas y diámetros en campo.
Fuente: Autores.

A continuación, se presentan fotografías tomadas en las salidas de campo como evidencia de la realización de las mismas.



Figura 8. Salidas de campo al humedal.
Fuente: Autores.

La tercera visita de campo se planeaba llevar a cabo para tomar muestras de agua, analizarlas posteriormente en el laboratorio y así determinar los parámetros fisicoquímicos y biológicos necesarios para el modelo, sin embargo antes de eso se logró establecer el vínculo con la *EAAB* quien facilito dentro de sus informes un estudio detallado donde se realizaba muestreo y análisis de laboratorio de los parámetros requeridos, por lo que la visita al ecosistema no se llevó a cabo.

Como se indicó en la metodología, la *EAAB* analizo la calidad de agua de cuatro colectores de entrada o salida, en función del caudal, mediante muestreo en tiempo real de dos eventos de lluvia por colector en tiempo húmedo. Se tomaron al menos cuatro muestras de agua distribuidas uniformemente durante cada evento

de lluvia. Se midió el caudal de entrada o salida en el momento de cada toma de muestra.

Los análisis de laboratorio fueron realizados por ANTEK S.A. (Laboratorio de Análisis Ambiental y Geoquímica) que cuenta con acreditación del IDEAM, todos los parámetros analizados, la técnica analítica utilizada y las unidades reportadas se relacionan a continuación.

| PÁRAMETRO | UNIDADES | TECNICA ANALITICA |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| TEMPERATURA MUESTRA | °C | Termométrico |
| pH | Unidades de pH | Electrométrico |
| CONDUCTIVIDAD | µS/cm | Conductímetro |
| FÓSFORO TOTAL | mg/L P | Digestión - Colorimétrico |
| FÓSFORO SOLUBLE | mg/L P | Digestión - Colorimétrico |
| NITRATOS | mg/L N-NO ₃ | Espectométrico UV |
| NITROGENO AMONIACAL | mg/L N-NH ₃ | Destilación - Titulométrico |
| NITROGENO TOTAL | mg/L N | Kjeldahl - Titulométrico |
| SÓLIDOS SEDIMENTABLES | mL/L-h | Cono Imhoff |
| SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | mg/L | Secado a 103-105 °C – Gravimétrico |
| SÓLIDOS TOTALES VOLATILES | mg/L | Calcinación a 550 °C – Gravimétrico |
| OXÍGENO DISUELTO | mg/L O ₂ | Yodométrico modificación de azida |
| DBO | mg/L O ₂ | Incubación 5 días |
| DQO | mg/L O ₂ | Reflujo cerrado |
| TENSOACTIVOS | mg/L LAS | Colorimétrico |
| GRASAS Y ACEITES | mg/L | Partición/infrarrojo |
| E. COLI | NMP/ 100 mL | NMP-Tubos múltiples |

Tabla 15. Parámetros y técnica analítica utilizada por ANTEK S.A. para la EAAB.
Fuente: Autores con base en [50]

Como para este caso de estudio solo se hace uso de siete de los parámetros registrados en la bibliografía, los valores reportados por el laboratorio para la EAAB se encuentran consignados en las **Tablas 7, 8, 9 y 10**.

5.3 Desarrollo del modelo

Posterior a la recolección de datos teóricos y experimentales en cuanto a calidad de agua, se inició la construcción de los datos geográficos que requería como entrada *Iber*. Para ello se hizo uso de las capas de información geográfica suministradas por el docente director de tesis, por la EAAB y por el IGAC y del software *ArcGIS* y del mismo *Iber*.

Principalmente se acudió a la *orto foto* y se introdujo en *ArcGIS*, donde se realizó la delimitación de la zona de estudio a través de la digitalización y la creación de polígonos, esta capa resultante sería la base para el resto de procesos.

Después, acorde a la información geográfica suministrada por la *EAAB* se procedió a la asignación de la batimetría y la corrección de las curvas de nivel basada exclusivamente en la zona del humedal por medio de *ArcGIS*, dando como resultado lo que se evidencia a continuación.

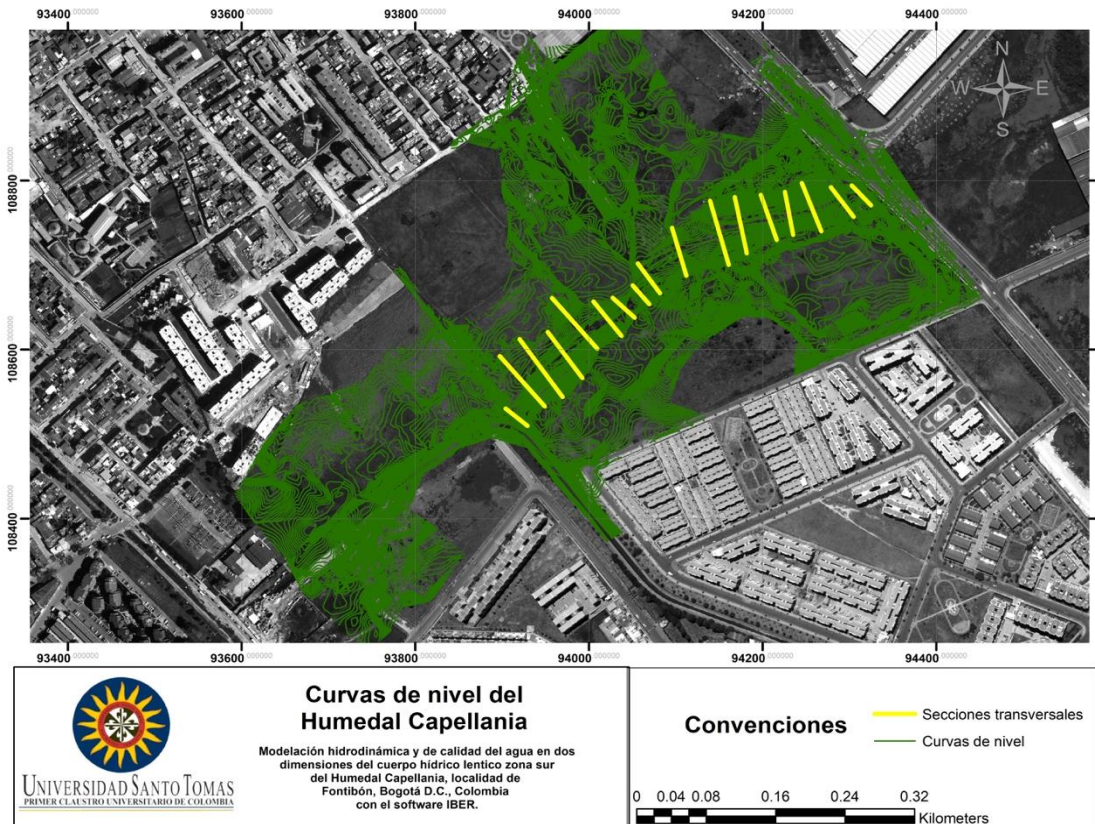


Figura 9. Curvas de nivel y batimetría del Humedal Capellania.
Fuente: Autores.

Paso seguido, en *ArcGIS* también y con el uso del *DEM* de la ciudad de Bogotá, se desarrolló un *TIN* y así se obtendría un archivo tipo *ASCII* el cual es la elevación que se utilizara en el modelo computacional *Iber*, como se representa continuación.

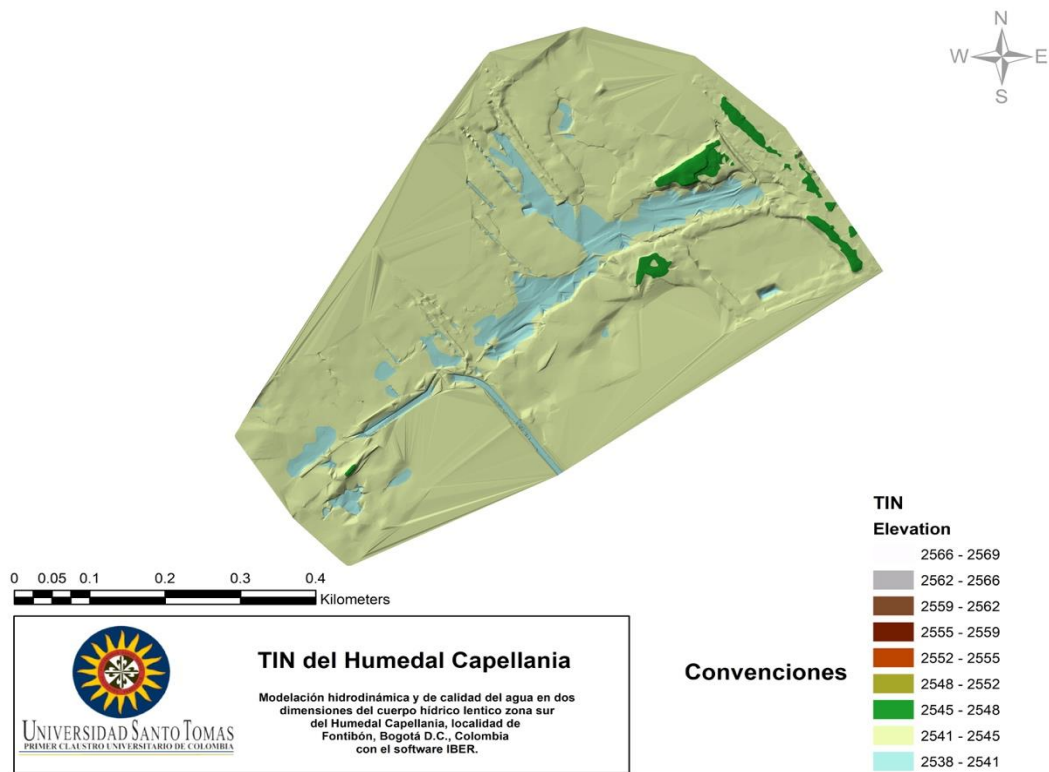


Figura 10. TIN del Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Después de realizar todo este proceso en *ArcGIS* y tener definida la geometría y la elevación de la zona de estudio se procedió a llevar la capa o *shapfile* a *Iber*, ya que se necesitaba tener la geometría de la zona definida como base del modelo.

Para desarrollar la modelación además del *shapfile*, se incluyen los datos de contorno e iniciales y de importancia los datos de rugosidad, con cuales se realiza la calibración del modelo y con los cuales el modelo computacional será más cercano a la realidad. A continuación, se presentarán la clasificación de rugosidad sujeto al uso del suelo para el *Humedal Capellanía* predeterminado por *Iber*.

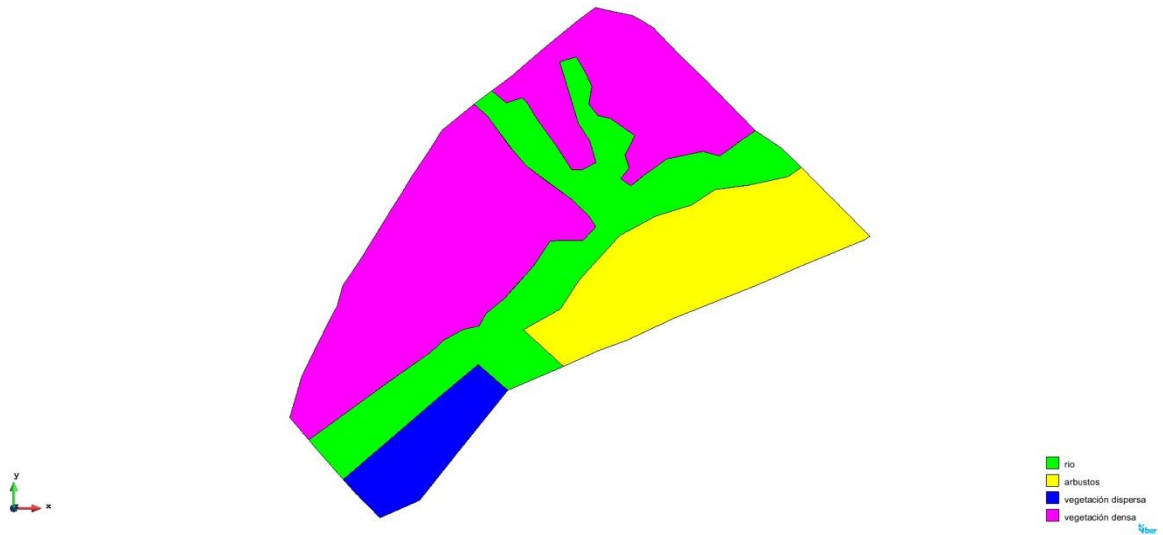


Figura 11. Calibración del modelo computacional en Iber para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Determinado el uso del suelo y su clasificación para el humedal, se incorporaron los datos de calidad de agua por contorno en los puntos seleccionados del muestreo del acueducto como se muestra a continuación, esto, partiendo de la recolección de datos obtenidos en la fase dos y consignados en la **Tabla 11**.

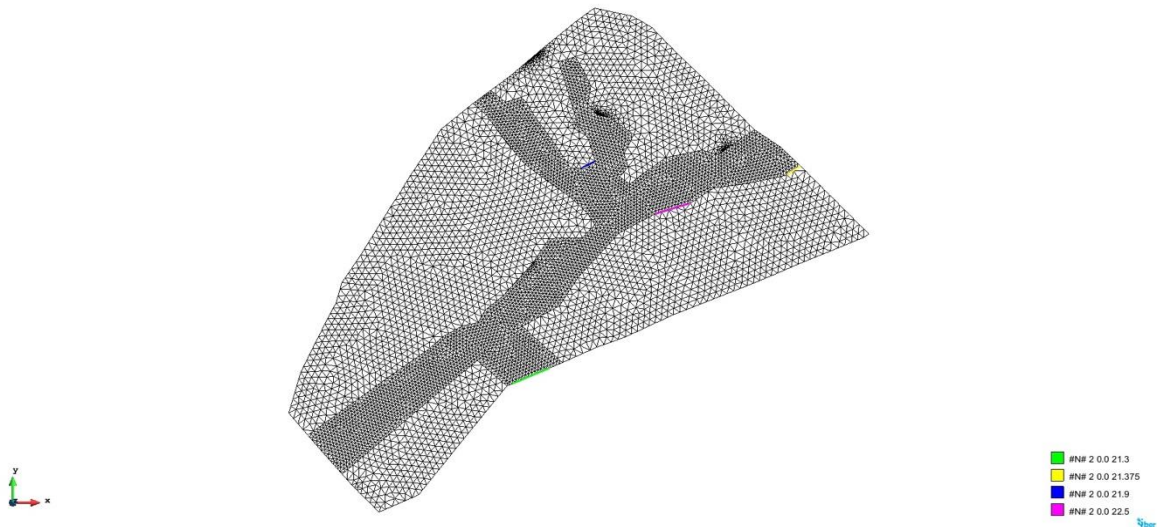


Figura 12. Condiciones de contorno de calidad de aguas para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Finalmente y como último parámetro de entrada, *Iber* solicitaba el valor asignado a la *demanda de oxígeno por sedimento (SOD)*, que fue hallado resolviendo la ecuación para el caso de estudio, donde se selecciona, según la **Tabla 4**, el k_{dos} correspondiente a *fangos de origen urbano*, con los calados correspondientes a cada periodo de retorno y posterior conversión de gramos a kilogramos ya que *Iber* así lo solicita, se obtiene el valor de *SOD* a ingresar en cada periodo respectivamente:

➤ PERIODO DE RETORNO 10

$$SOD = \frac{k_{dos}}{h} = \frac{1.5}{0.4270} = \frac{3.5128805}{1000} = 0.0035128 \text{ kg } O^2/m^2/dia$$

➤ PERIODO DE RETORNO 25

$$SOD = \frac{k_{dos}}{h} = \frac{1.5}{0.4276} = \frac{3.5128805}{1000} = 0.0035079514 \text{ kg } O^2/m^2/dia$$

➤ PERIODO DE RETORNO 100:

$$SOD = \frac{k_{dos}}{h} = \frac{1.5}{0.4288} = \frac{3.5128805}{1000} = 0.0035063114 \text{ kg } O^2/m^2/dia$$

Ingresado el valor de *SOD* para cada escenario, se puede proceder a elegir los datos del problema como se especifica en el numeral **4.3.1.2**, de la metodología.

En datos del problema principalmente se debe asignar el tiempo que se desea dure la simulación de los escenarios, y como valor medio en los tres periodos de retorno se seleccionó un tiempo de 4200 segundos que es lo que se demora el caudal máximo de entrada en salir del humedal.

Aquí *Iber* también solicita otros datos como especificaciones técnicas del computador donde se hará la modelación, como el número de procesadores. Se solicita además activar y desactivar los resultados, donde se dejan encendidos todos los relacionados con la hidrodinámica y calidad de agua del humedal.

Como se mencionó antes, *Iber* solicita para el estudio a totalidad del parámetro *Escherichia Coli* y su proceso de desaparición bacteriana ingresar el dato T_{90} , que da como resultado del desarrollo de la **Ecuación 18**.

$$T_{90} = (0.8 + 0.02 (9.6))1.07^{(21.9-20)} + 0.086 \frac{2}{0.0255 * 0.4270} (1 - e^{(-0.0255*0.4270)}) = 1.29914$$

Este valor se entiende como aproximadamente *1,3 horas/día*, se ingresa en la sección de coliformes del programa y se salvan los cambios generados, los demás coeficientes ya vienen predeterminados por el programa y no se modifican.

Para poder poner en marcha el cálculo del modelo, es necesaria la creación de la malla según lo desarrollado en la metodología, lo que dio como resultado la imagen que a continuación se muestra.

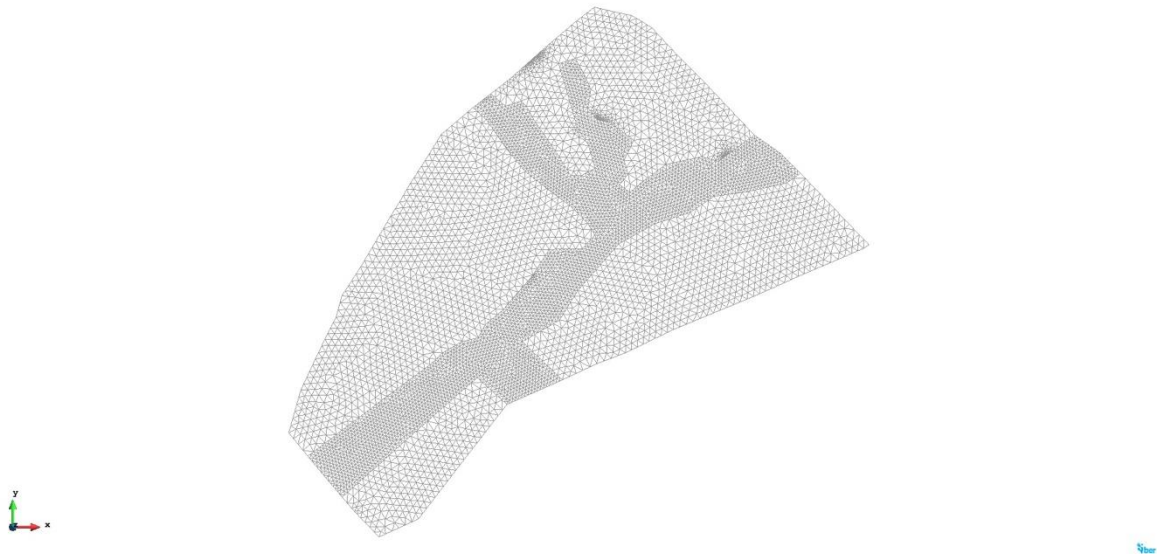


Figura 13. Definición de la malla para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Finalmente, después de ingresar en *Iber* los datos hidrodinámicos, de calidad de agua y datos del problema, se selecciona la herramienta calcular y aquel, después de realizar la modelación en el tiempo estipulado y desde que haya sido llevado con éxito y no falte ningún dato de entrada que impida correr, arroja en la sección de *post proceso* resultados para cada parámetro hidrodinámico y de calidad de agua, este proceso se recreó tres veces debido a que lo que se pretende es observar la calidad de agua para cada periodo de retorno, es decir con un caudal máximo y calado diferente por escenario simulado.

Los modelos desarrollados y sus resultados son clasificados a continuación por parámetro y se presentan a su vez los tres escenarios modelados para cada periodo de retorno.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados obtenidos en la modelación y estimar el estado actual del humedal, se tomó como referente los diferentes valores establecidos para cada uno de los parámetros de calidad de agua en la normativa nacional vigente consignados en la **Tabla 16**.

| PARAMETRO | UNIDAD | VALOR PERMISIBLE | NORMATIVA | ESPECIFICACION |
|----------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperatura | °C | ≤ 40 | Resolución 631/2015 (Art. 5) | Vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial |
| | | ≤ 40 | Decreto 703/2018 | Vertimientos al agua y exigencias mínimas |
| Oxígeno Disuelto (OD) | mg/L | ≥ 5,0 | Decreto 703/2018 | Preservación de flora y fauna (agua fría dulce) |
| | | ≥ 4,0 | Acuerdo 43/2006 CAR | Valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá |
| | | | RAS 2000 | Calidad de agua de la fuente a tratar (Aceptable) |
| | | | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Regular) |
| | | | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Deficiente) |
| < 4,0 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Muy deficiente) | | |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | mg/L | ≤ 90 | Resolución 631/2015 (Art. 8) | Vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial |
| | | ≤ 20 | Acuerdo 43/2006 CAR | Valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá |
| | | 1,0-3,0 | RAS 2000 | Calidad de agua de la fuente a tratar (Aceptable) |
| | | 3,0-4,0 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Regular) |
| | | 4,0-6,0 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Deficiente) |
| | | > 6,0 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Muy deficiente) |
| Coliformes | NMP/100 mL | ≤ 2000 | Decreto 1076/2015 | Destinación del recurso para consumo humano y doméstico (tratamiento convencional) |
| | | ≤ 1000 | | Destinación del recurso para consumo humano y doméstico (desinfección) |
| | | ≤ 200 | | Uso del recurso para riego |
| | | ≤ 5000 | Acuerdo 43/2006 CAR | Valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá |
| | | 0-50 | RAS 2000 | Calidad de agua de la fuente a tratar (Aceptable) |
| | | 50-500 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Regular) |
| | | 500-5000 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Deficiente) |
| | | > 5000 | | Calidad de agua de la fuente a tratar (Muy deficiente) |
| Nitrógeno | mg/L | ≤ 2 | Resolución 2115/2007 | Características fisicoquímicas de la calidad del agua para consumo humano |
| Nitrógeno Amoniacal (NH ₃) | mg/L | ≤ 0,3 | Acuerdo 43/2006 CAR | Valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá |
| | | ≤ 1 | Decreto 703/2018 | Destinación del recurso para consumo humano y doméstico (tratamiento convencional y desinfección) |
| Nitratos (NO ₃) | mg/L | ≤ 10 | Resolución 2115/2007 Decreto 1076/2015 | Características fisicoquímicas de la calidad del agua para consumo humano Destinación del recurso para consumo humano y doméstico |
| | | ≤ 1 | Acuerdo 43/2006 CAR | Valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá. |

Tabla 16. Normativa nacional vigente aplicada al caso de estudio de la calidad de agua del Humedal Capellanía.

Fuente: Autores.

Principalmente, el *Acuerdo No. 43 del 2006* establecido por la *CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca)* [51] con el fin de establecer los objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020 fue un lineamiento clave para la determinación del estado del recurso hídrico en el caso de estudio. En su *Artículo primero* además de realizar una clasificación de usos del agua para la cuenca del río Bogotá, especifica los valores de los parámetros de calidad a aplicar por clase, dentro de las que se consigna la *clase III* que hace referencia a los valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lenticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá.

Sin embargo, este recurso no consignaba valores para todos los parámetros estudiados en la modelación, por lo que se acudió a otras normativas como la *Resolución 631 del 2015* [52], por la cual se establecen los 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 y la *Resolución 2115 del 2007* [53] donde se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

El *Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)* [54] en su versión 2000, que aún se implementa debido a que aunque se está realizando la actualización aún no se ha publicado, también contiene algunos valores para ciertos parámetros con los que clasifica la fuente de agua como aceptable, regular, deficiente o muy deficiente y posteriormente estipula los tratamientos requeridos para consumo humano.

También el *Decreto 1076 del 2015* [55], que incluye los valores límites para los parámetros especificados en el *Decreto 1594 de 1984* que actualmente se encuentra derogado y que especificaba los usos del agua y residuos líquidos, sirvió como guía para evaluar la calidad del agua en el *Humedal Capellanía*. El *Decreto 1076 del 2015* fue modificado su vez por el *Decreto 703 del 2018* [56] y los valores aquí consignados se tomaron en cuenta.

En general, la normativa consultada no especificaba el estado óptimo en el que todas las variables de calidad de agua de este caso de estudio debían encontrarse para ecosistemas como los humedales propiamente, en su lugar, la legislación hacia énfasis en la destinación del recurso hídrico y asegurar su calidad para el consumo humano, sus riesgos para la salud y asignar el tipo de tratamiento requerido según la calidad de la fuente, igualmente esta información fue imprescindible para dar un análisis y una noción de la situación actual del ecosistema.

Por otra parte en la revisión del marco legal se encontró la *Resolución 5731 del 2008* [57], donde se adoptan nuevos objetivos de calidad para los Ríos Salitre, Tunjuelo, Fucha y el Canal Torca en el Distrito Capital para periodos de tiempo de

cuatro (2012) y diez años (2018) pero no fue aplicable a este caso de estudio ya que en esta se estipula textualmente que *“En la revisión bibliográfica realizada y a partir de discusiones con expertos en humedales de la ciudad, se concluye que por ahora no se puede establecer cuáles son los criterios de calidad para poder preservar la flora y la fauna en los humedales. No se tiene un modelo de calidad en los humedales que prediga cómo una mejora en la calidad del agua afecta los ecosistemas que habitan en los humedales. Por lo tanto se propone NO establecer los objetivos de calidad a los humedales de la ciudad, porque no conoce claramente el funcionamiento fenomenológico de los humedales de la ciudad. Por ahora lo único a proponer es la aplicación de parámetros asociados a uso estético, hasta que se puede conocer más en detalle”*.

6.1 Generación y análisis de los modelos

Con la información que *Iber* dio para cada uno de los periodos de retorno se decidió realizar un análisis de comportamiento para los parámetros por separado, y así identificar las fluctuaciones y las incidencias de la hidrodinámica en el comportamiento de la calidad de agua en general.

6.1.1 Oxígeno disuelto (OD)

Este parámetro es uno de los factores que está ligado a la permanencia de la vida acuática debido a que la falta del recurso es indicador de polución y ciertas especies acuáticas son sensibles a la falta de oxígeno. Además gracias a que incide en la mayoría de procesos químicos y biológicos, es decir las condiciones aerobias son las que respaldan la diversidad de especies como peces a pesar de que estos puedan vivir con concentraciones de *OD* superiores a los 4 mg/L.

En la mayoría de casos el oxígeno disuelto puede usarse como indicador de contaminación orgánica e indica la tasa de degradación de sustancias orgánicas e inorgánicas que pueden ser oxidadas. Se considera que los vertimientos con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, conducen al descenso de la concentración de oxígeno debido al incremento de la demanda para su degradación. Por lo tanto, las zonas más profundas de un cauce presentan condiciones anaerobias debido a reducción de los niveles de oxígeno.

En el caso colombiano, el oxígeno disuelto se interpreta de acuerdo a las normas establecidas para este caso de estudio como se muestra en la **Tabla 16**.

➤ *Periodo de retorno 10 años*

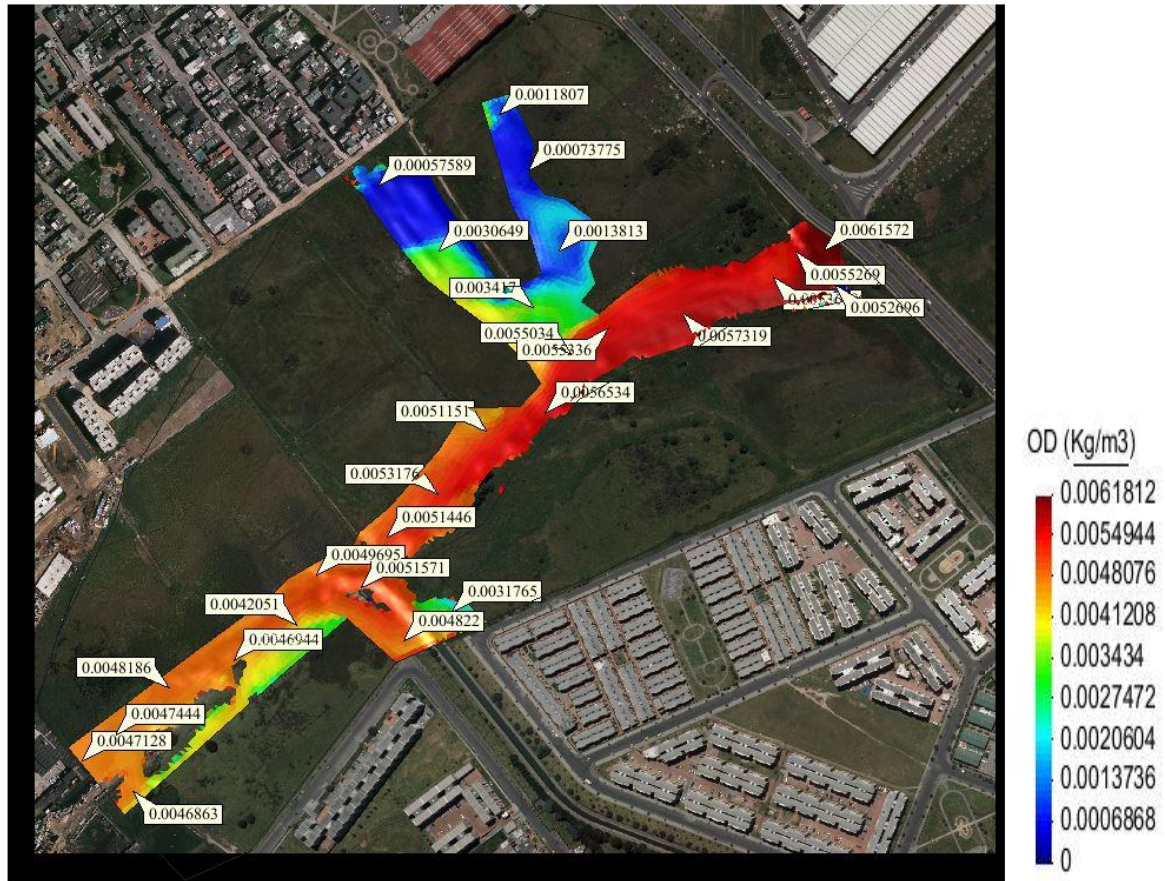


Figura 14. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

En este escenario de la modelación para el periodo de 10 años se observa que el oxígeno disuelto presenta sus concentraciones más altas entre los $0,00573 \text{ kg/m}^3$ a $0,00615 \text{ kg/m}^3$ en la entrada principal del humedal, esto se debe a que el espejo de agua que se encuentra localizado en esa zona puede ser la causante de ese aumento en la disponibilidad del recurso, debido a que los procesos de fotosíntesis que allí tienen lugar generan gran cantidad de OD.

A pesar de que se registren concentraciones altas en ciertos puntos del humedal como se evidencia en las áreas coloreadas verdes y azules, hay valores mínimos $0,0005758 \text{ kg/m}^3$ y $0,0007377 \text{ kg/m}^3$ que son representativas de vertimientos domésticos y alcantarillado debido a que esas zonas del *Humedal Capellanía* son aledañas a los edificios de vivienda, y que estos desechan basura en esa parte del humedal generando un aumento de materia orgánica y disminución de la OD.

En cuanto a la normativa nacional y distrital las concentraciones de oxígeno disuelto en este escenario cumplen con lo estipulado donde el *OD* debe registrar valores $\geq 4,0$ mg/L, pero no quiere decir que este sea fuera de lo común, este valor de oxígeno disuelto brinda estabilidad para las especies acuáticas.

➤ *Periodo de retorno 25 años*

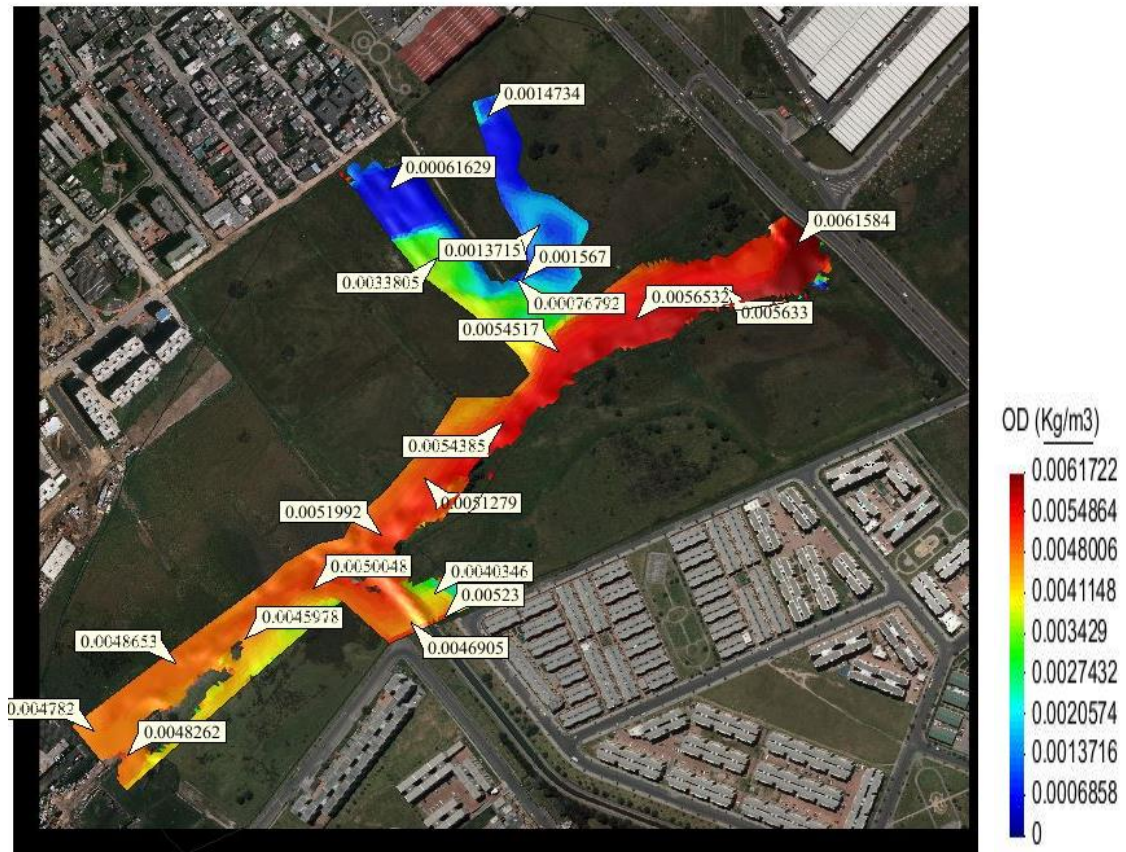


Figura 15. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Para este escenario los valores máximos no sobrepasan los $0,0062 \text{ kg/m}^3$ es decir que si se compara esta concentración con los valores máximos permisibles el humedal se encuentra en condiciones de tener especies acuáticas como peces, plantas y demás, cabe aclarar que el modelo arroja algunos valores muy bajos en algunas zonas del humedal donde no se espera ver vida acuática debido a la falta de oxígeno, así mismo se observa que ese valor máximo registrado está ubicado en el caudal entrada del humedal (*HUCAP 09*), esto gracias a que a mayor presión de caudal mayor aireación y mejor oxígeno en el cuerpo de agua, por eso el mayor aporte de *OD* es la entrada del caudal principal.

Por otra parte, se registran los valores mínimos en el modelo computacional con colores azules oscuros y claros, lo cuales presentan concentraciones de $0,00076 \text{ kg/m}^3$ y $0,0006162 \text{ kg/m}^3$ en las cuales no se podría encontrar algún tipo de vida aerobio.

➤ *Periodo de retorno 100 años*



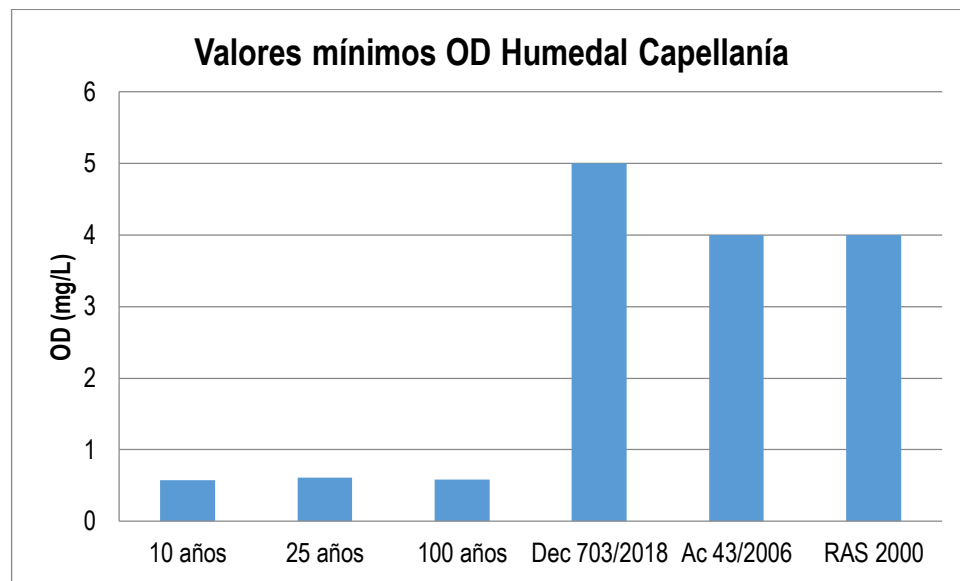
Figura 16. Oxígeno disuelto para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

En este escenario se encuentran valores mínimos que en realidad son preocupantes para la reproducción y estabilidad de la vida acuática, incluso se registran valores de $0,0 \text{ kg/m}^3$ en las áreas azul oscuro. Es claro que los más afectados son los peces que se encuentran en el humedal, esto debido a que los procesos de purificación naturales requieren de niveles de oxígeno puntuales para sustentar las formas de vida aeróbicas por lo tanto estos bajos niveles como $0,00058552 \text{ kg/m}^3$ y $0,000861 \text{ kg/m}^3$ ($0,582$ y $0,861 \text{ mg/L}$) reflejan que la vida acuática está bajo tensión, que puede resultar en agonías para los peces, plantas y bacterias aerobias, estos datos arrojados por el modelo computacional se deben a que la zona donde se localizan los bajos niveles presenta falta de profundidades en el cauce para que el oxígeno disuelto de manera natural se mueva o genere

corrientes y se dé lugar así a la aireación, esto también se debe a que se estima que para este periodo de retorno los vertimientos realizados al humedal presenten un aumento de desechos animales y humanos los cuales disminuyen de manera directa el oxígeno disuelto en el agua.

A pesar de que en algunos puntos del modelo computacional se reflejan valores estables de *OD* ($0,0048019 \text{ kg/m}^3$ y $0,0056 \text{ kg/m}^3$) estos disminuirán continuamente debido a que se espera que un periodo de retorno de 100 años ya se vean mejoras en cuanto al cuidado de flora y un proyecto de banco de semillas que se desea implementar en el humedal por parte de la *EAAB*. [50]

A continuación se presenta un consolidado de los valores más bajos de *OD* registrados en la modelación por periodo de tiempo y su contraste con lo estipulado en la normativa nacional.



Gráfica 1. Valores mínimos de OD registrados en el Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.

Fuente: Autores.

Siendo así, las áreas coloreadas en tonos azules, verdes e inclusive algunas amarillas en la modelación de los tres escenarios los puntos más críticos de disponibilidad de oxígeno que están causando niveles extremos de oxidación y por lo tanto no hay disponibilidad del recurso para las especies acuáticas provocando la muerte o sofocación e incluso eutrofización, por ello es aquí donde se deberán tomar medidas y especial atención.

Cabe resaltar que el contraste se hizo en relación a los valores mínimos de *OD* modelados gracias a que la ausencia de oxígeno en el medio es la que más

repercusiones tiene para la vida acuática y donde se generan problemas de calidad como eutrofización.

6.1.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se puede establecer que la descarga de material orgánico contaminante en el cuerpo de agua representa una purificación a través del proceso de oxidación bioquímica, este proceso es microbiano que utiliza sustancias contaminantes como fuentes de carbón y de esta manera hace un consumo de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua para la respiración. [58]

Es decir, la *DBO* mide la cantidad de oxígeno necesaria o consumida para la descomposición microbiana de la materia orgánica en el agua.

Para el análisis de este parámetro se recurrió a la **Tabla 16**, donde se le asignan los valores tolerables de *DBO*.

➤ *Periodo de retorno 10 años*

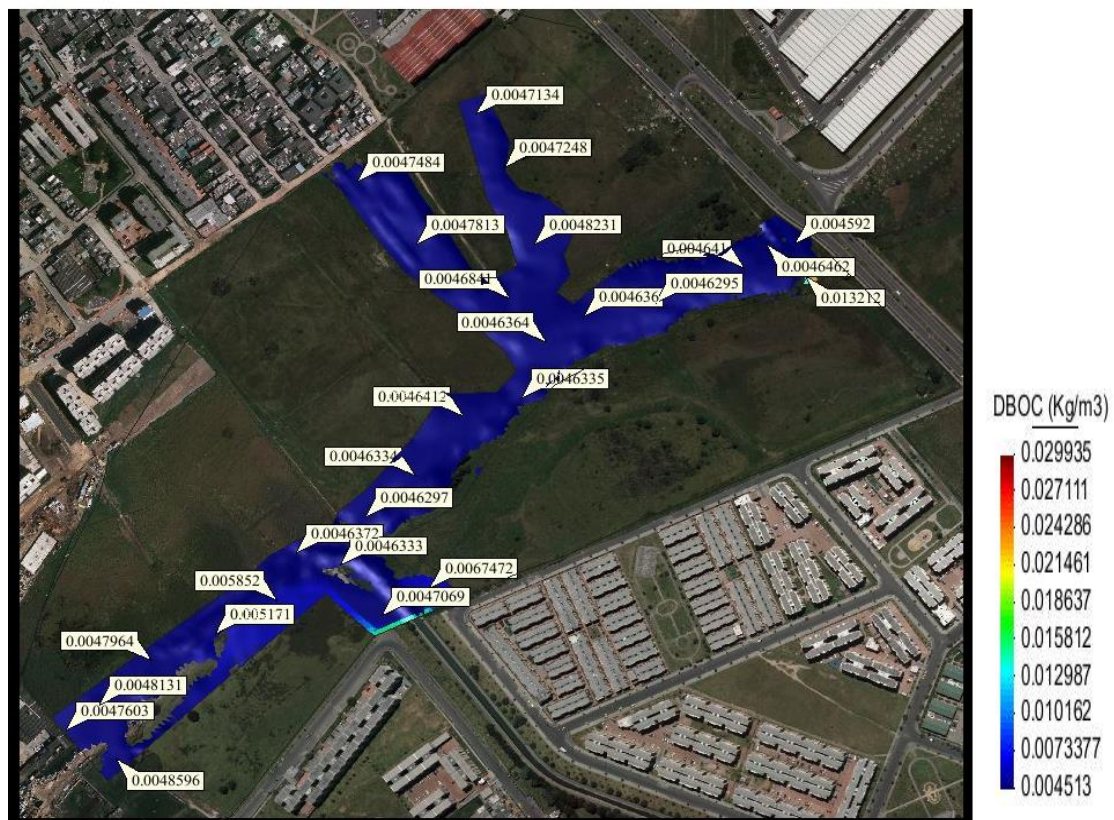


Figura 17. DBO para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.

Fuente: Autores.

Para este escenario de *DBO*, se concluye que a pesar de que en las entradas al humedal se presentan concentraciones altas de hasta $0,029 \text{ kg/m}^3$ (29 mg/L), a lo largo del comportamiento del parámetro en el medio este se estabiliza y reduce sus niveles a valores que van desde los $0,012 \text{ kg/m}^3$ hasta los $0,004513 \text{ kg/m}^3$ (12 y $4,513 \text{ mg/L}$) que se representa como las áreas coloreadas azules.

De este escenario se infiere que aunque los valores de las entradas son significativas y los microorganismos causan el consumo de oxígeno y con ello aumento en la *DBO*, el medio logra realizar la descomposición de la materia orgánica entrante y mantener concentraciones de *DBO* favorables y logrando que este parámetro de calidad este dentro de los objetivos de calidad de la *CAR* establecidos para la conservación del ecosistema.

➤ *Periodo de retorno 25 años*



Figura 18. DBO para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía.

Fuente: Autores.

En calidad de valores máximos permisibles los datos arrojados por el modelo computacional $0,004946 \text{ kg/m}^3$ y $0,0068547 \text{ kg/m}^3$ cumplen con la normatividad

colombiana. Se puede observar que los valores son realmente bajos para la demanda de coliformes fecales que existen el cuerpo de agua, esto se debe a que la fermentación de las bacterias necesarias para oxidar la materia orgánica no están alcanzando la temperatura necesaria de 35 °C que es lo que se requiere, esto puede deberse a que la temperatura del humedal ronda entre 20 °C y 23 °C.

La *DBO* en este escenario denota una leve tendencia a aumentar sus concentraciones en las áreas coloreadas verdes justo después de la descarga del punto *HUCAP 04*, sin embargo estos valores siguen estando en el umbral permisible.

➤ *Periodo de retorno 100 años*



Figura 19. DBO para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía. Fuente: Autores.

Para este periodo de tiempo la *DBO* vuelve a mostrar un comportamiento homogéneo de áreas coloreadas azules y valores entre los 0,0047 kg/m³ y los 0,0248 kg/m³ y una pequeña área de *DBO* altas (hasta 0,112 kg/m³) en las áreas

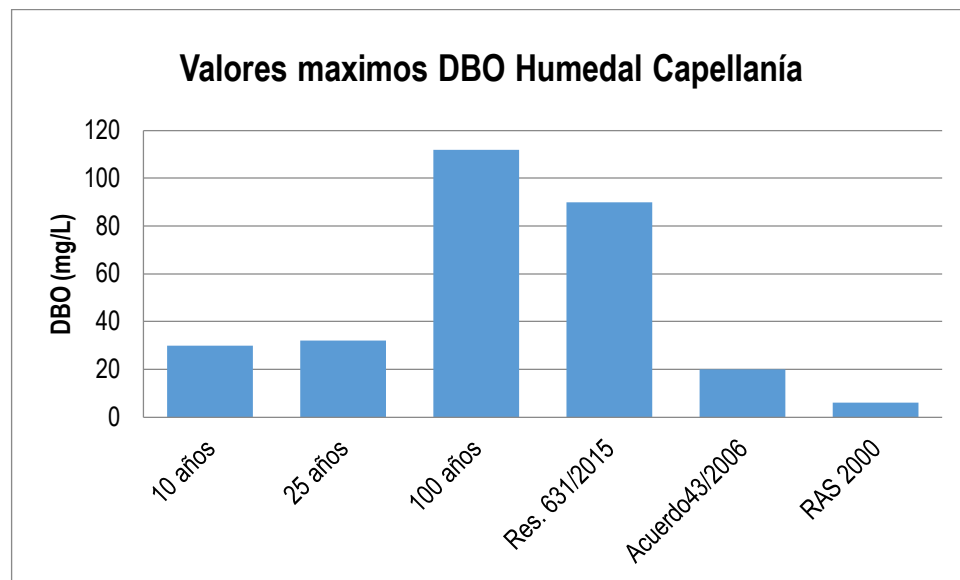
de color rojo, indicando que en esta zona la entrada *HUCAP 09* está generando una alta demanda de oxígeno.

Esto concuerda al contrastar el mismo escenario de 100 años para *OD*, ya que en esta misma zona (*HUCAP 09*) se registra disminución en la presencia de oxígeno.

A continuación se toman los valores máximos registrados en los tres escenarios de la modelación y se comparan con la normativa nacional.

En los tres escenarios se registraron concentraciones de *DBO* elevadas inmediatamente en seguida de las descargas al humedal (*HUCAP*), que son las que se reportan en la anterior gráfica. Aunque estas concentraciones no se mantienen a lo largo del cuerpo de agua y son disminuidas, si son valores significativos que en contraste con normas como el objetivo de calidad de la *CAR* o el *RAS 2000* ni siquiera se cumple porque al ser mayor que 6,0 mg/L se considera como fuente de agua muy deficiente. Sin embargo, los periodos de tiempo de 10 y 25 años dan cumplimiento al nivel máximo permisible (90 mg/L) expuesto en la *Resolución 631 del 2015*.

Se analizan los valores máximos de *DBO* registrados durante la modelación debido a que son los puntos donde especial atención se debe tener y no permitir que las descargas al humedal ocasionen agotamiento de oxígeno en el medio.



Gráfica 2. Valores máximos DBO Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.
Fuente: Autores.

6.1.3 Coliformes fecales (*E. Coli*)

Se tiene claro que la presencia de *Escherichia Coli* indica contaminación fecal en agua, este microorganismo genera una alerta a cualquier cuerpo de agua o algún suministro de agua potable debido a que tiene efectos en la salud humana como la muerte. En casos de estudio anteriores se ha encontrado que los factores que más inciden en la longevidad de las bacterias en el agua son la humedad y la temperatura. [59]

La contaminación que existe se debe a los desechos domésticos e industriales que están en la zona aledaña al *Humedal Capellanía*, debido a que agotan la cantidad de oxígeno en el agua, ya que como se ha especificado la materia orgánica requiere de este parámetro (oxígeno) para su descomposición, resaltando que un exceso de materia orgánica agota el oxígeno en el agua y por lo tanto el agua tendría características como color turbio y grisáceo con olores bastante fuertes y como efecto adverso una baja diversidad de organismos acuáticos, plantas y bacterias aerobias. [60]

➤ *Periodo de retorno 10 años*

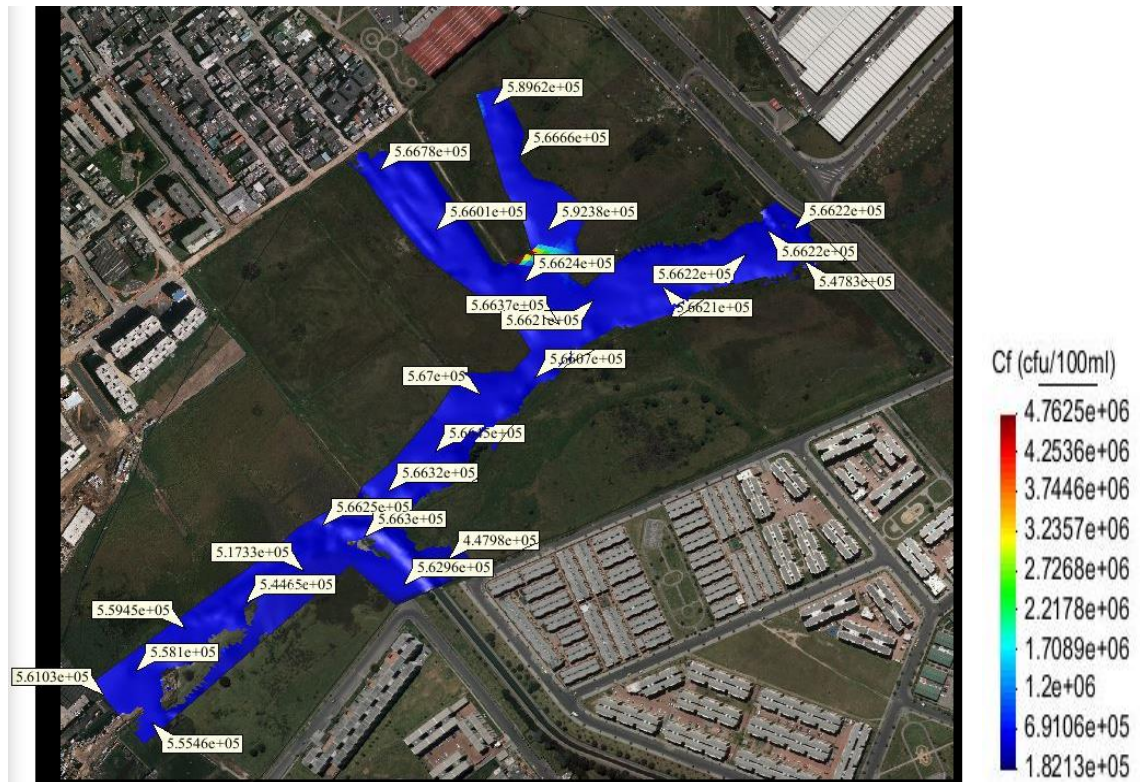


Figura 20. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Para este escenario de 10 años la presencia de *E. coli* y su concentración se ve determinada por las áreas coloreadas azules, donde persisten los valores entre los 500000 y 600000 ufc/100 mL (NMP/100 mL) lo que representa según la clasificación *RAS 2000* aguas muy deficientes (por encima de los 5000 NMP/100 mL).

➤ *Periodo de retorno 25 años*



Figura 21. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Hay una alta concentración de coliformes, superiores al valor máximo admisible al igual que en el escenario de 10 años, estos valores de 597600 NMP/100 mL y 638670 NMP/100 mL son los que predominan y se extienden a lo largo del ecosistema.

➤ *Periodo de retorno 100 años*

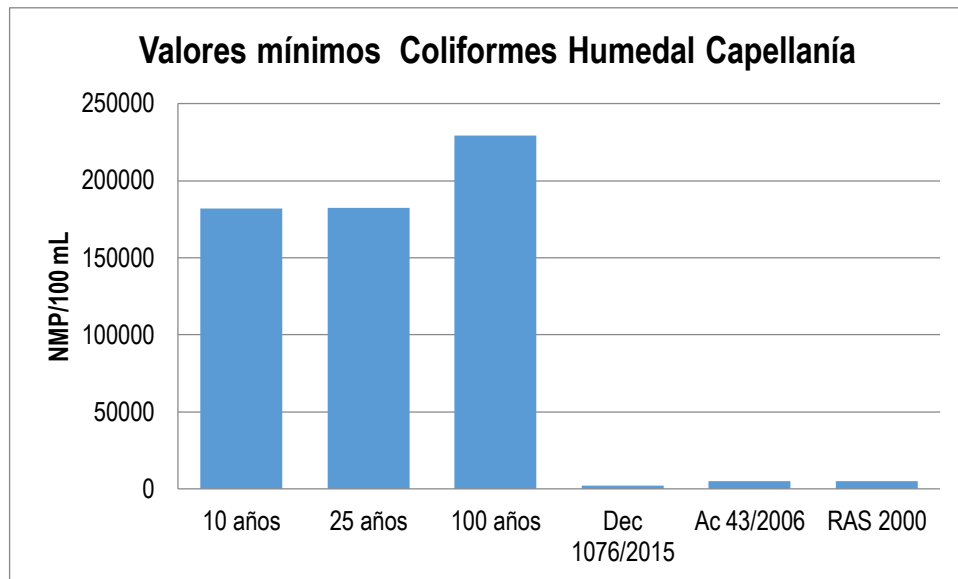


Figura 22. Coliformes para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Para este escenario las concentraciones más altas de coliformes se registran inmediatamente después de la descarga del punto *HUCAP 02* (áreas coloreadas rojas y naranjas), aunque después los niveles de coliformes empiezan a disminuir, siguen siendo valores muy altos para el parámetro.

Se observa que los coliformes fecales para el periodo de 100 años tienen un aumento de casi el doble de las concentraciones que generan los anteriores modelos para los periodos de retorno de 10 y 25 años, realmente es preocupante debido a que a mayor concentración de coliformes fecales menos concentración de oxígeno disuelto y por lo tanto se pueden generar hasta condiciones de anoxia con consecuencias de muerte masivas de organismos aerobios e hipoxia que desencadenaría en la desaparición de organismos y especies sensibles.

Concluyendo que, como ha sucedido con los demás escenarios de este parámetro, los coliformes no cumplirían con ningún valor máximo permisible de la normativa como se evidencia a continuación.



Gráfica 3. Valores mínimos de coliformes Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.

Fuente: Autores.

Para realizar el contraste con la normativa, se graficaron solo los valores mínimos encontrados en el modelo de coliformes (áreas coloreadas azules) y aun así se denota el grave incumplimiento del parámetro para todos los lineamientos usados en el caso de estudio. Es aquí cuando se requiere especial atención sobre este parámetro, revisando puntualmente que controles se deben aplicar al ingreso de vertimientos de aguas residuales al ecosistema y la recuperación del espejo de agua.

6.1.4 Nitrógeno Orgánico

Iber considera todos los parámetros del nitrógeno en un solo paso (nitrificación) es por ello que el nitrógeno orgánico, el NH_3 y NO_3 están relacionados. A su vez el oxígeno también depende de la nitrificación debido a que el ciclo del nitrógeno afecta directamente su disponibilidad en el agua. [61] La presencia o ausencia de las diferentes formas de nitrógeno ($NOrg$, NO_3 y NH_3) servirán para determinar el tiempo de la contaminación en el agua. [33]

El nitrógeno orgánico es aportado en su mayoría a los cuerpos de agua a través de excretas humanas (urea) [62], por lo que su presencia indica que los vertimientos al humedal no solo son industriales, sino además de tipo doméstico, que a su vez se deduce en conexiones erradas de alcantarillado.

Para la vida acuática el nitrógeno es imprescindible para nutrir los organismos y así mismo la necesidad de las bacterias de oxidar el nitrógeno se relaciona a su

vez con el aumento en la *DBO* y el consumo del oxígeno disponible en el medio. [33]

➤ *Periodo de retorno 10 años*



Figura 23. NOrg para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Para este periodo de retorno, el recurso hídrico del humedal presenta en toda su área valores de *NOrg* que fluctúan entre los 0,00057 kg/m³ hasta los 0,00063 kg/m³. Sin embargo, se denotan zonas en amarillo y rojo que parecen dispersarse justamente en la zona norte del ecosistema (entrada colector de la Esperanza o *HUCAP 09*) debido a la descarga ocasionada en este punto, los valores se mantienen y el máximo registro se da cerca a los 0,00075 kg/m³ que es equivalente a los 0,75 mg/L.

➤ *Periodo de retorno 25 años*



Figura 244. N_{org} para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellania.
Fuente: Autores.

Para este escenario, los valores se mantienen en el orden del escenario anterior (10 años), predominando en todo el medio las áreas coloreadas naranjas y con valores promedio de 0,00059 kg/m³, así mismo es la descarga del HUCAP 09 la que aporta valores más altos del parámetro al medio.

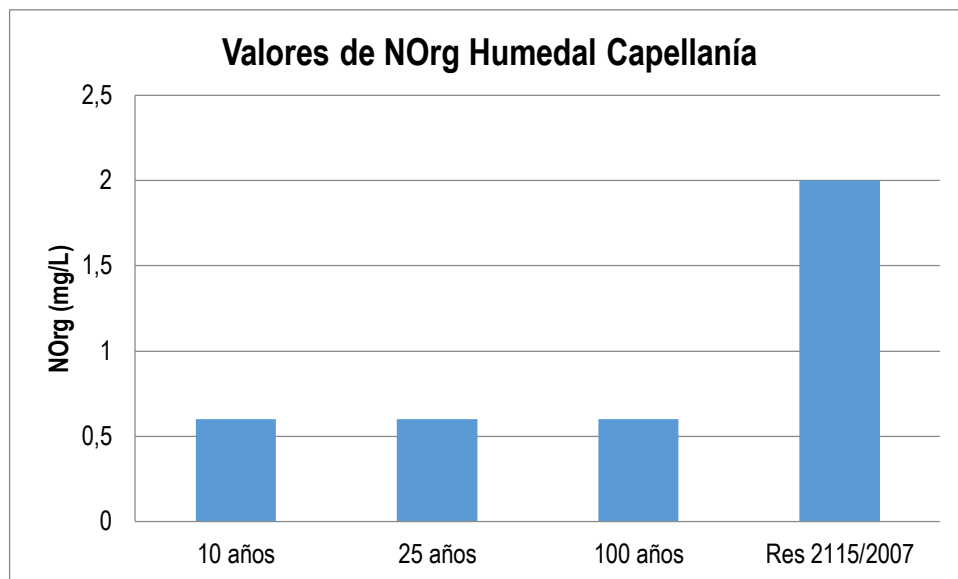
- *Periodo de retorno 100 años*



**Figura 255. N_{Org} para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.**

Aquí aunque las concentraciones se mantienen en el orden de los 0,00059 kg/m³, el punto HUCAP 09 aporta concentraciones mucho más bajas (0,0003 kg/m³) las cuales posteriormente ascienden al valor que se mantiene en todo el medio representado por las áreas amarillas.

Para el contraste de este parámetro con la normativa se tomaron como referencia las concentraciones promedio (0,59 mg/L) que se presentan en los tres escenarios, sin embargo en la revisión bibliográfica solo se encontró un referente normativo para este parámetro que se relaciona a continuación.



Gráfica 4. Valores de NOrg Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.
Fuente: Autores.

Este parámetro no infringe en ningún escenario modelado la normativa, sin embargo este nutriente presenta concentraciones que son aptas para el crecimiento de microorganismos y que podrán cumplir con el proceso de degradación de materia orgánica.

Además aunque la presencia de NOrg en el humedal indica que hay una contaminación proveniente probablemente de urea (actividades industriales y alcantarillado domestico), sus concentraciones no son elevadas y el mismo medio puede realizar los procesos de descomposición bacteriana lo que dará lugar a otras formas del nitrógeno como el NH_3 y NO_3 y sustento a la vida acuática.

6.1.5 Nitrógeno amoniacal (NH_3)

En términos generales, el humedal cuenta con un nitrógeno amoniacal del orden de los 0,00055 a los 0,00070 kg/m^3 (0,55 mg/L y 0,7 mg/L). En contraste con lo estipulado en la **Tabla 16**, este parámetro para los tres periodos de retorno modelados incumpliría con lo estipulado en el *Acuerdo 43 del 2006* ya que sobrepasa los 0,3 mg/L límites para la calidad de los cuerpos de agua en la cuenca del rio Bogotá, además para el *Decreto 703 del 2018* el parámetro cumple para su destinación al consumo humano y domestico requiriendo tratamiento convencional y desinfección.

Así mismo como en el caso del NOrg se sigue identificando la entrada HUCAP 09 como el principal aporte de altas concentraciones de NH_3 al medio. Y aunque en los tres escenarios las concentraciones disminuyen y se estabilizan a valores

constantes, no se alcanza a realizar depuración del compuesto e infringe la normativa ya mencionada.

El humedal actualmente cuenta con una concentración de oxígeno baja por la falta de movimiento del agua, una baja tasa de re aireación con la atmosfera, debido a la pérdida del espejo de agua y productividad fotosintética por organismos vegetales debido a las condiciones de eutrofización en el que se encuentra actualmente debido a altos niveles de contaminación, las grandes concentraciones de coliformes como ya se ha mencionado, alterando el porcentaje de oxígeno disuelto disponible en el agua.

Su presencia indica que se llevó acabo descomposición de compuestos orgánicos, en aguas superficiales de buen estado su presencia debería ser nula, en caso contrario se considera indicador de contaminación reciente y peligrosa. [63]

Sin embargo, para el caso de estudio, al ser un sistema natural y un ecosistema donde lo que se busca es la estabilidad del mismo, con los valores registrados se da lugar a la permanencia de la vida acuática en cuanto a NH_3 se refiere.

➤ *Periodo de retorno 10 años*



Figura 266. NH_3 para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.

Fuente: Autores.

Al presentarse predominio de áreas coloreadas verdes se estima que el valor promedio está determinado por los 0,00057 y 0,00063 kg/m³. Los valores más elevados en este escenario se presentan en la entrada HUCAP 09, donde se evidencian áreas de tono rojo y amarillo con valores de 0,00074 kg/m³ (0,74 mg/L). Por lo que sigue siendo esta entrada la que más nutrientes asociados al nitrógeno aporta.

➤ *Periodo de retorno 25 años*



Figura 27. NH_3 para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellania.

Fuente: Autores.

Al igual que en el escenario anterior, la concentración de NH_3 se mantiene en un mismo valor en todo el medio, las áreas coloreadas naranja representan un valor promedio entre los 0,00060 kg/m³, y como se mencionó anteriormente el aporte más significativo de este parámetro es la entrada *HUCAP 09* donde los valores no superan los 0,0007 kg/m³ (0,7 mg/L).

➤ *Periodo de retorno 100 años*



Figura 288. NH_3 para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Este periodo de retorno si podría significar un aumento en los niveles de NH_3 , tanto así que incluso se registran valores cercanos al 1 mg/L que infringiría el límite permisible estipulado en el *Decreto 703 del 2018*.

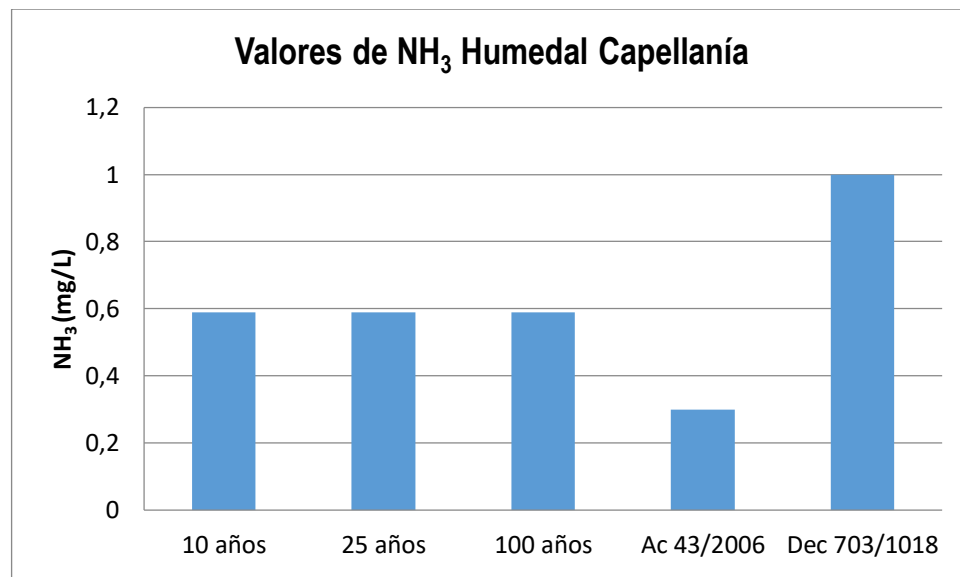
Sin embargo los valores promedio del escenario están entre los 0,00051 kg/m³ y los 0,00061 kg/m³, aunque en las áreas coloreadas de verde se presentan los niveles más bajos de 0,00040 kg/m³ que indica que se logra hacer una descomposición de materiales nitrogenados por parte de microorganismos en el medio justo muy cerca de la descarga más significativa de nitrógeno amoniacal (*HUCAP 09*), la actividad de descomposición no es suficiente y las concentraciones vuelven a ascender en todo el cuerpo de agua.

En la **Gráfica 5**. se refleja el comportamiento de los tres escenarios y la normativa encontrada aplicable al parámetro, al igual que en el *NOrg* las concentraciones se mantienen por debajo de los 0,6 mg/L, sin embargo aquí si se presentan incumplimientos para el *Acuerdo 43 del 2006* pero cumpliría con el *Decreto 703 del 2018*.

Se estima que la procedencia de NH_3 en el medio se debe primeramente a la descomposición de nitrógeno orgánico y seguidamente a aguas de tipo sanitario.

Su presencia indica que hay un aporte de nutrientes permanente al medio, debido a que su presencia se da gracias a la descomposición constante del *NOrg*.

Para hacer posible que el parámetro cumpla con los objetivos de calidad de la CAR (< 0,3 mg/L) se deben tomar acciones sobre el punto de descarga *HUCAP 09* que es el que más altas concentraciones de este parámetro aporta.



Gráfica 5. Valores NH₃ Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.
Fuente: Autores.

6.1.6 Nitratos (NO₃)

Este parámetro es inestable, oxidable y su presencia refleja la degradación del nitrógeno. En aguas superficiales no contaminadas su concentración es de 4 a 8 mg/L [64], su aumento es debido a presencia de materia orgánica, aguas residuales e industriales.

Los nitratos y nitritos al igual que el nitrógeno amoniacal se encuentran influenciados por la concentración de oxígeno que esté presente en el medio acuático. Cabe mencionar que el modelo numérico toma en forma conjunta los nitritos y nitratos debido a la rapidez con la que generalmente los primeros se oxidan a nitratos.

En cuanto a la capacidad de asimilación de nitratos del humedal, en el modelo numérico se muestra una baja capacidad de depuración de este nutriente para todos los periodos de retorno, puesto que de acuerdo con los resultados de la modelación, aunque los valores cambian en los tres escenarios siempre se maneja un promedio de concentraciones (áreas coloreadas extensas).

En el marco legal tomado como referencia para este caso de estudio, el NO_3 en promedio estaría cumpliendo con los valores permisibles, pese al punto de descarga donde se registran los valores más altos del parámetro (*HUCAP 04*) por lo que este punto de entrada significaría un problema para el medio en cuanto a este parámetro se refiere según lo estipulado en el *Acuerdo 43 del 2006*.

Además se denoto que para este caso de estudio a los nitratos no se les encontró relación alguna con la concentración de oxígeno en el agua, ya que las fluctuaciones del parámetro no fueron significativas en función del OD.

A grandes rasgos y como lo modelo *Iber*, el humedal tiene buena capacidad para depurar los nitratos, eso apoyado a que en los muestreos de las descargas tomados como datos de entrada tampoco se hacen aportes altos (normativamente) del parámetro.

➤ *Periodo de retorno 10 años*



Figura 29. NO_3 para el escenario de periodo de retorno de 10 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

La predominancia de áreas coloreadas azules asigna un valor promedio entre los 0,00018 y los 0,00032 kg/m³, solo se denota la presencia de concentraciones más altas en la entrada *HUCAP 04* donde no se superan los 1,3 mg/L (0,00128 kg/m³) lo cual refleja riesgo para el límite establecido en el *Acuerdo 43 del 2006*.

➤ *Periodo de retorno 25 años*



Figura 300. NO₃ para el escenario de periodo de retorno de 25 años para el Humedal Capellania.

Fuente: Autores.

En este escenario, al igual que para el periodo de 10 años de NO₃, en el cuerpo de agua se ve la predominancia de concentraciones entre los 0,000021 y los 0,00044 kg/m³, y sigue siendo la descarga del punto *HUCAP 04* la que mayor aporte de este parámetro realiza al medio, aunque en la zona inmediatamente cercana a la descarga se denotan áreas coloreadas con valores de hasta 0,00128 kg/m³ (1,28 mg/L), estas concentraciones se disipan y logran ser estabilizadas a lo largo del humedal.

➤ *Periodo de retorno 100 años*

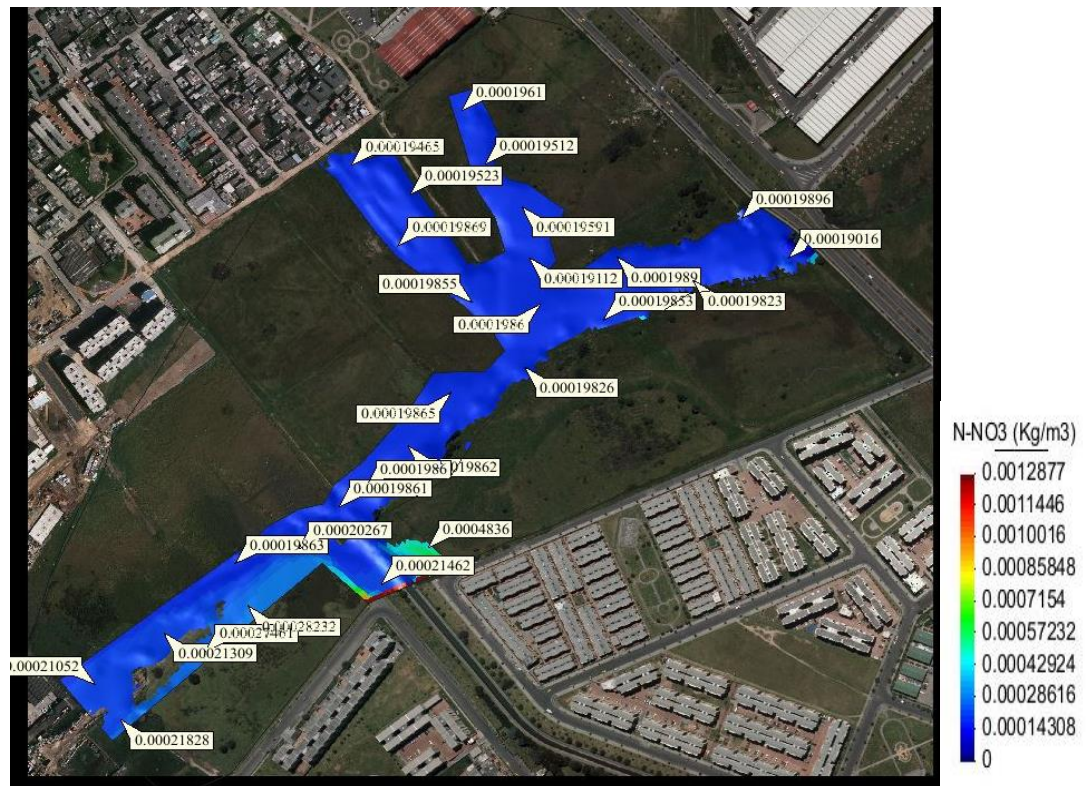


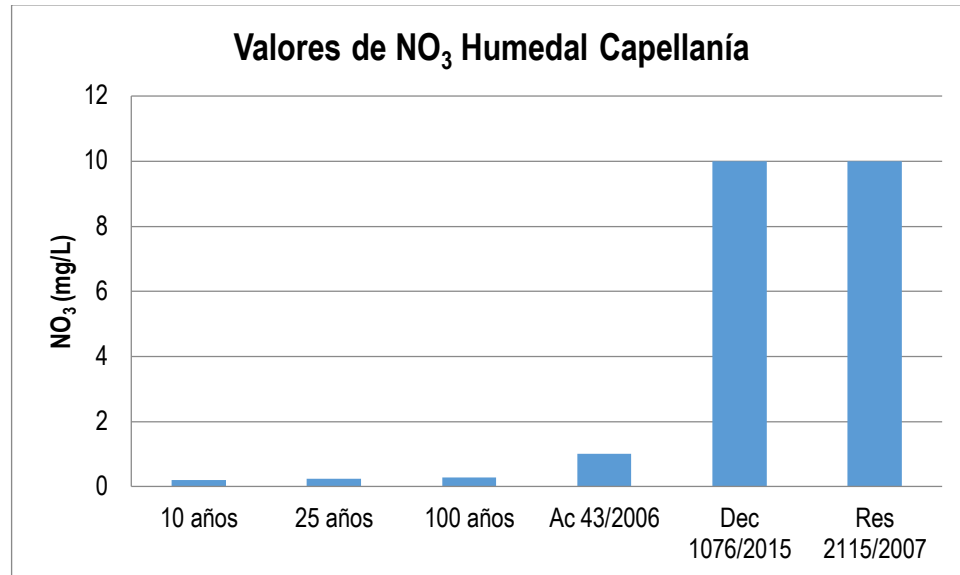
Figura 311. NO_3 para el escenario de periodo de retorno de 100 años para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.

Los valores registrados en este escenario se mantienen en el orden de los dos escenarios anteriores de este parámetro, sin embargo las concentraciones más elevadas en zonas cercanas a la descarga *HUCAP 04* muestran áreas coloreadas (verdes) más extensas y cuyas concentraciones alcanzarían los 0.00048 kg/m^3 , que aunque no son significativas en cuanto a límites permisibles si representan un aumento en los niveles de NO_3 en esta zona del humedal.

En general el NO_3 cumple con el marco legal aplicado al parámetro, lo que indica que su presencia en el caso de estudio es consecuencia natural del ciclo del nitrógeno que se ha llevado a cabo en el humedal.

Las concentraciones de este parámetro dentro de los valores permisibles se debe a que en las zonas aledañas no se realizan actividades que tengan relación con el uso de abonos nitrogenados (agricultura o industrias relacionadas), esto gracias también al encerramiento que se le ha realizado al ecosistema y que impide el uso de sus suelos.

Se estima que la presencia de nitratos en el medio está determinada por la dinámica natural del ecosistema y que de haber algún aporte de tipo antropogénico (vertimientos) el medio está en la capacidad de regularlo.



Gráfica 6. Valores NO₃ Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.
Fuente: Autores.

6.1.7 Temperatura

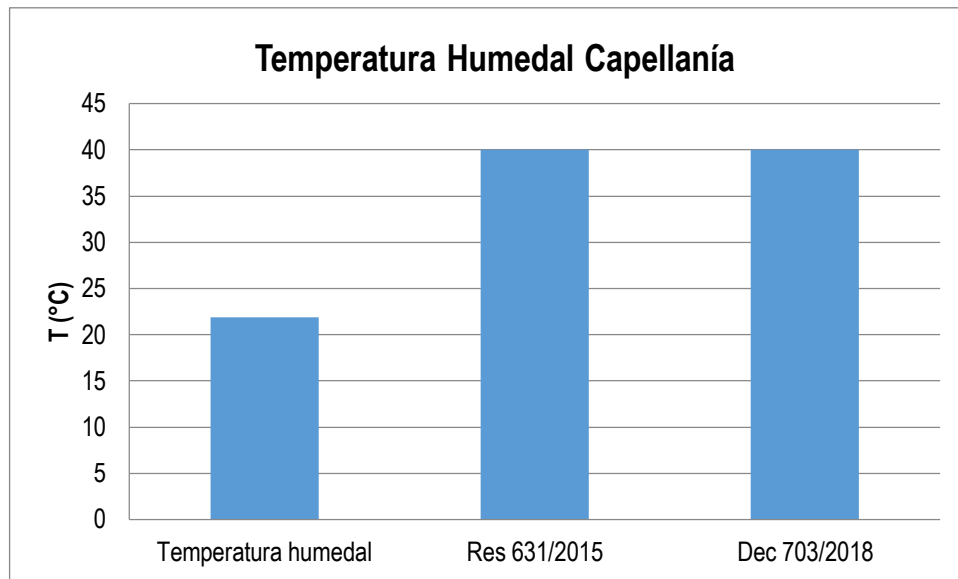
La temperatura del agua afecta a la solubilidad de sales y gases y en general a todas sus propiedades químicas y a su comportamiento microbiológico, debido a esto todos los parámetros estudiados son dependientes de la temperatura.

Sin embargo para los datos de muestreo brindados por la EAAB del humedal se registraron temperaturas entre los 21,3 y 22,5 °C, estos al ser ingresados en *Iber* y al correr el modelo se promedia y toman valor constante de 21,9 °C para todo el medio. En la revisión bibliográfica realizada se estipula que los cuerpos naturales como humedales deben registrar temperaturas entre 21 °C y 25 °C [65], por lo tanto se infiere que el humedal está en el rango de temperatura adecuado y que esta no tuvo gran influencia en los otros parámetros estudiados.



**Figura 322. Temperatura para el Humedal Capellanía.
Fuente: Autores.**

Como se relaciona a continuación, los registros de temperatura no infringen en ningún momento la normativa nacional aplicable. Por lo que se supone que este parámetro no es una problemática para la calidad de agua del ecosistema. Sin embargo se requiere una vigilancia constante para evitar que se empiecen a generar vertimientos que afecten la estabilidad del medio.



Gráfica 7. Temperatura Humedal Capellanía vs. Normativa nacional.
Fuente: Autores.

6.1.8 Análisis de todo el modelo

Al realizar el análisis del comportamiento conjunto de los siete parámetros se evidenció que aunque a lo largo del desarrollo del documento se resalta que la temperatura incide significativamente en los demás parámetros, para el *Capellanía*, este parámetro tuvo un comportamiento entre los 21,3 y los 22,1 °C, lo que a su vez no representa un problema para el estado de la calidad del agua en el modelo ya que el mismo medio tiene la capacidad de estabilizar este parámetro y mantenerlo alrededor de los 21,9 °C, esto se puede deber a probablemente en el muestreo no se detectaron vertimientos o descargas de las entradas con valores altos de temperatura (provenientes de calderas de actividades industriales o similares).

Dicho esto, los demás seis parámetros centran su comportamiento en relación a la disponibilidad de oxígeno en el humedal, principalmente se encuentran altos niveles de coliformes en el medio lo que sustenta las bajas concentraciones de *OD* en el agua. Esto causa que las especies acuáticas como organismos aerobios, plantas y peces no puedan subsistir gracias a que el *OD* no es suficiente para su desarrollo.

Respecto a la *DBO* y su relación con los coliformes se deduce que los niveles de *E. Coli* son altos y por ello la *DBO* también es alta debido a que existen procesos de fermentación los cuales requieren de materia orgánica, microorganismos y nutrientes lo que ocasiona mayor existencia de coliformes, sin embargo para que este proceso de fermentación tenga lugar es necesaria una temperatura aproximada de 35°C, que está lejos de las temperaturas promedio del humedal,

siendo esto un privilegio para la inhibición del proceso. [66] Sin embargo los niveles de coliformes para el humedal son altos, lo que puede significar una alta incidencia de conexiones de alcantarillado urbano que van a dar al humedal y que aportan gran cantidad de material fecal, siendo esta la principal problemática y sobre el cual debe tomarse acciones ya que al moderar estas situaciones la situación del *OD* y la *DBO* en el medio mejorara.

Las formas de nitrógeno estudiadas en este modelo (*N_{Org}*, *NH₃* y *NO₃*) están relacionadas entre sí debido a que los procesos de descomposición bacteriana que se llevan a cabo con el nitrógeno orgánico dan lugar a los demás compuestos del nutriente, sin embargo estos parámetros en lo general se encuentran dentro de los límites permisibles consignados en el marco legal estudiado. Sus concentraciones no representan riesgo alguno para el ecosistema y no son los causantes del déficit de oxígeno en el medio. Estos nutrientes están en concentraciones que propician la vida acuática.

Al realizar la modelación, se tomaron en cuenta los siete parámetros en conjunto, simultáneamente, la interacción entre ellos y datos hidrodinámicos que aportan a que de todo lo que sucede en el humedal pueda ser llevado al modelo. Por lo que en este caso de estudio no solo se trató de ingresar los datos de un muestreo en el software, sino de evaluar su comportamiento simultaneo y analizar cómo se afectan o benefician entre sí, cual causa mayor incidencia sobre el medio y los puntos críticos de concentraciones, además se realiza una visualización del comportamiento de las variables y su zonificación lo que permite identificar en qué áreas se deben tomar medidas inmediatas.

7 IMPACTO SOCIAL

Se desea que este trabajo sirva como punto de partida para otras investigaciones de tipo académico en el estudio no solo de ecosistemas estratégicos en Colombia sino a nivel regional, debido a la implementación de un software como Iber que es gratuito, de fácil acceso y aprendizaje.

Así mismo se desea aportar a la información que dispone la *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*, la *Secretaría de Ambiente* y todas las entidades a las que compete el manejo y restauración del Humedal Capellanía, haciendo uso de la presente modelación y los análisis hallados del comportamiento de los parámetros para la toma de decisiones y como fundamento teórico para ejercer acciones de corrección y garantizar la calidad de agua del ecosistema permanentemente.

8 CONCLUSIONES

Se carece de un marco legal distrital que especifique la calidad del agua para parámetros que vayan más allá del estado paisajístico en la que los humedales de Bogotá deben encontrarse y permanecer, por lo que en este caso de estudio se realizó en su mayoría el contraste con normativa que hace relación al uso del agua para consumo humano.

En cuanto a los parámetros, el mejor escenario modelado para el *oxígeno disuelto* fue el de 25 años, esto se debe a que el caudal generado para este periodo de tiempo genera mayor aireación por medio de las corrientes naturales que se manejarían en el ecosistema, además en este escenario las concentraciones de *OD* permanecen más estables a lo largo del cuerpo de agua, lo que propicia la estabilidad de la vida acuática.

Para la *DBO* el escenario que menores valores registra es el periodo de 10 años lo que se puede relacionar con el mismo escenario para los coliformes, las concentraciones de *E. Coli* en los 10 años son menores y por ello la *DBO* disminuye. Siendo así estos dos parámetros directamente proporcionales.

En esta modelación y en contraste con la normativa, son los coliformes el parámetro que mayores concentraciones registra y que en ninguno de los tres escenarios generados en *Iber* cumplió con los valores permisibles estipulados en el marco legal aplicable.

En cuanto a los parámetros estudiados en la modelación, es el área cercana a la Avenida la Esperanza donde se registran las peores condiciones de oxigenación, esto debido probablemente a que las descargas en este punto presentan gran cantidad de materia orgánica y mayor demanda de oxígeno para su degradación.

La presencia de las tres formas de nitrógeno en el ecosistema (*NOrg*, NH_3 y NO_3) es indicador de una contaminación reciente y constante al medio, esto debido al ciclo de descomposición bacteriana que tiene lugar en el humedal. Estos aportes de nutrientes son propios del medio pero probablemente para parámetros como el nitrógeno amoniacal hay un aporte significativo por parte de los vertimientos (*HUCAP*) que el mismo medio logra estabilizar.

Los parámetros relativos al nitrógeno aunque no cumplen con todo el marco legal de referencia, no representan concentraciones que afecten la vida acuática ni la disponibilidad de oxígeno en el medio, por lo que no hay lugar a la eutrofización por causa de este nutriente.

Además *Iber* permite agregar datos como el *DEM* (modelo digital de elevación) lo que permite que lo que se vaya a modelar se asemeje a la realidad y para ser más concreto también incluye factores como la rugosidad que ya viene pre asignada por el mismo software a cada clasificación del suelo.

Aunque el módulo de calidad de agua es nuevo en el software, este se adapta bien a los otros módulos como el hidrodinámico y brinda herramientas más completas y útiles para el desarrollo de cualquier caso de estudio similar al realizado.

Se infiere que la implementación de *Iber* en el ámbito académico es altamente factible debido a la gran disponibilidad de información acerca de su uso y sus aplicaciones (tutoriales, guías y cursos de los diferentes módulos).

9 RECOMENDACIONES

La principal falencia que se encontró en el caso de estudio fue la ausencia de una normativa específica aplicada a la calidad de agua de los humedales del distrito, esta debe ser implementada como lineamiento para el manejo de estos por las entidades pertinentes (*SDA, EAAB*) y más ahora cuando estos ecosistemas están categorizados como sitios *Ramsar* y se debe velar por su conservación y preservación.

Se recomienda la realización de muestreos exhaustos por parte de las entidades encargadas de los 15 humedales de Bogotá que permitan detectar y actualizar las condiciones de calidad de agua en los mismos y tomar así acciones pertinentes.

Puntualmente, en el *Humedal Capellanía* se recomienda ejercer vigilancia constante sobre los vertimientos que van a dar al ecosistema para tener información actualizada, constante e identificar fluctuaciones significativas y ejercer acciones de control, mitigación o prevención según se requiera.

Además se recomienda hacer un estudio biológico y ecológico que de una noción de las concentraciones de nutrientes que el medio requiere y articular este estudio a la calidad de agua.

Es el parámetro de coliformes el que concentraciones más altas y mayor riesgo para la calidad del medio represento en esta modelación, por lo que se deben tomar acciones sobre el punto de descarga *HUCAP 02* que fue identificado como el que mayor aporte de este parámetro hace al medio, con ello se espera que la demanda bioquímica de oxígeno se reduzca y que la disponibilidad de oxígeno en el medio mejore.

Para solucionar la disponibilidad de oxígeno en el agua del *Capellanía* también es necesario promover la aireación del medio mediante la generación de corrientes naturales, por lo tanto se deberá garantizar que al ecosistema ingrese un caudal que dé lugar a esta acción. En lo posible, las entidades competentes deberían implementar adecuaciones hidrogeomorfológicas donde se cree la presencia de zonas permanentemente inundadas y se garantice un aumento en el flujo de agua que genere oxigenación en el ecosistema.

Dentro de las adecuaciones propuestas, se podría implementar un dragado y con ello un monitoreo constante de los parámetros relativos a la calidad del agua, para identificar el comportamiento del ecosistema y su capacidad de autorregulación. Para esto se podría incluir el módulo de sedimentos de *Iber*.

En el caso del nitrógeno amoniacal para generar una disminución de su concentración es necesario realizar otras acciones, dado que estos nutrientes no son muy susceptibles a los cambios solo de geomorfología, sino que es necesario eliminar los posibles vertimientos o aguas residuales que ingresen al sistema y el control de materia orgánica que pueda aumentar las concentraciones de NH_3 en

exceso generando un crecimiento acelerado de la vegetación y algas y por ende una eutrofización.

Con base a este caso de estudio y de la modelación realizada en *Iber*, podría incluirse posteriormente la implementación de los demás módulos del programa, por ejemplo los datos relativos a la sedimentación y así tener una simulación más completa de la dinámica del humedal y precisar la toma de decisiones y alternativas.

Iber podría aplicarse a la modelación de los demás humedales de Bogotá pero se reitera en que debe determinarse un marco legal específico a estos ecosistemas, la combinación de estas dos herramientas sería útil para la Política Distrital de Humedales que está estipulada.

10 REFERENCIAS

- [1] Juan Pablo Galeano Rey, "El uso del suelo en el caso de los humedales," *Verba Iuris*, no. 25, pp. 119-147, Junio 2011.
- [2] Secretaría de la Convención de Ramsar, "Manejo de humedales: Marcos para manejar Humedales de Importancia Internacional y otros humedales.," in *Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4a. edición.*, Dave Pritchard, Ed. Gland, Suiza, 2010, ch. 18, pp. 9-16.
- [3] Yarin Tatiana Puerta Quintana, Néstor Jaime Aguirre Ramírez, and Fabio Jesús Vélez Macías, "Sistema cenagoso de Ayapel como posible sitio Ramsar en Colombia," *Gestión y Ambiente*, vol. 19, no. 1, pp. 110-122, Junio 2016.
- [4] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá., "Plan de Manejo Ambiental Humedal Capellanía," Bogotá D.C., 2008.
- [5] Gilma Cruz Benavides, "Retrospección de Ecosistemas Acuáticos en Bogotá," Universidad Pedagógica Nacional , Bogotá, 2013.
- [6] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico," Bogotá D.C., 2010. [Online].
<http://www.jbb.gov.co/index.php/generalidades/humedales-de-colombia>
- [7] Convención de Ramsar. (2014) Ramsar.org. [Online].
<https://www.ramsar.org/es/humedal/colombia>
- [8] Gonzalo Duque Escobar, "Colombia, país de humedales amenazados," *La Patria*, Agosto 2016.
- [9] César Augusto Castellanos M, "Los ecosistemas de humedales en Colombia," *Luna Azul*, Agosto 2006.
- [10] Ministerio del Medio Ambiente, "Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia," Bogotá D.C., 2002.
- [11] Alcaldía Mayor de Bogotá, "Política de Humedales del Distrito Capital," Bogotá D.C., 2006.
- [12] Fundación Humedales Bogotá. (2018, Agosto) Humedales Bogotá. [Online].
<http://humedalesbogota.com/2018/08/06/once-humedales-de-bogota-seran-declarados-como-sitios-ramsar/>

- [13] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1468 del 2018 , Agosto 2018, Por el cual se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, con el fin de designar al Complejo de Humedales Urbanos del Distrito Capital de Bogotá para ser incluido en la lista de Humedales de Importancia Internacional Ramsar, en cumplimiento de lo dispu.
- [14] Juan Hernández Rangel and Daniel Martínez, "Modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para la evaluación ambiental de vertimientos generados a la Ciénaga Mesolandia, Atlántico-Colombia," Universidad de la Costa, Barranquilla, Tesis de pregrado 2016.
- [15] Sergio Armando Barbosa Casas, "Modelación hidrodinámica y de calidad de agua al sistema integrado Embalse Muña-Rio Bogotá," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Tesis de Maestría 2013.
- [16] Ernest Bladé i Castellet, "Modelación del flujo de lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones.," Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Tesis doctoral July 01, 2005.
- [17] Alexander Villamizar Hernández, "Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulacion de flujo a superficie libre en un canal horizontal," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Tesis de Maestría 2014.
- [18] L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolza y A. Coll E. Bladé, "IBER: herramienta de simulacion numerica del flujo en rios ," *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Dlseño en Ingenieria* , vol. 30, no. 1, p. 10, 2014.
- [19] Guillermo Collazos, "Uso del modelo Iber en un problema de flujo bidimensional," in *XXV Congreso Nacional del Agua*, Paraná, 2015.
- [20] Marco Sanz Ramos, Ernest Bladé i Castellet, and Josep Dolz, "Desarrollo de una herramienta para simular obstrucciones en flujos con Iber," *Research Gate*, Octubre 2017.
- [21] Jairo Villanueva Escobar, Jhonny Perez, and Jose Fragozo, "Influencia de las Crecidas del Río Ranchería Sobre las Inundaciones en la Ciudad de Riohacha, La Guajira-Colombia," *Research Gate*, Septiembre 2017.
- [22] Luis Felipe Sierra Porgutá, "Comparación entre metodologías de modelación hidrológica HEC HMS, hidráulica en 1D HEC-RAS y 2D modelo IBER, de planicies de inundación y zonas urbanas para el caso de Villapinzon, Cundinamarca," Escuela

Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Tesis de Maestría 2015.

- [23] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *El Medio Ambiente en Colombia*, Pablo Leyva, Ed. Bogotá , Colombia, 2001.
- [24] María Alejandra Charry Vásquez and Natalia Andrea Castellanos Caro, "Evaluación de la calidad físico-química y biológica de la laguna de Ubaque para el diseño y actualización de las medidas de manejo ambiental," Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Tesis de grado 2016.
- [25] Javier Alejandro Baeza Ormeño, "Estudio de Ecuaciones Tipo Hidrodinámica para Sistemas Granulares Densos," Santiago de Chile, 2015.
- [26] Hermes Alfonso García Quintero and Nelson Obregón Neira, "Modelación de la calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados," Bogotá D.C., 2008.
- [27] Rebeca Benayas Polo, Modelización Hidráulica Bidimensional con Iber y ArcGIS.
- [28] M Arbat et al., "Modelación numérica (2D y 3D) de la hidrodinámica en el entorno de la confluencia Ebro-Serge," in *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, Córdoba, 2015, pp. 117-124.
- [29] Gloria Estefany Amarís Castro, Thomas Edison Guerrero Barbosa, and Edgar Antonio Sánchez Ortiz, "Comportamiento de las ecuaciones de Saint Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable," *Tecnura*, vol. 19, no. 45, pp. 75-87, Abril 2015.
- [30] Juan Carlos Rivera Montilla, "Recomendaciones técnicas de aplicación de modelos hidráulicos en cauces reales," Universidad de Sevilla, Sevilla, Tesis maestría 2017.
- [31] Agencia Vasca del Agua, "Batimetría de Rios, Arroyos, Embalses y Estuarios de la Comunidad Autónoma del Pais Vasco," 2014.
- [32] Luis Andrés Avecillas Arellano, "Caracterización Físicoquímica del Estero Salado entre el Puente de la Avenida Keneddy y el Puente 5 de Junio Efectuado en el Periodo Agosto-Octubre del Año 2012," Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Tesis de pregrado 2013.
- [33] Gabriel Roldán Pérez, *Bioindicación de la Calidad del Agua en Colombia: Propuesta para el Uso del Método BMWP Col*, 1st ed. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia, 2003.

- [34] Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Manual de Referencia del Módulo de Calidad de Aguas, 2015.
- [35] Mayra Castro Huertas, "Aplicación del QUAL2Kw en la Modelación de la Calidad del Agua del Río Guacaica, Departamento de Caldas, Colombia," Manizales, 2015.
- [36] Bi Yun Zhen Wu, "Calidad físicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoria, Curubandé, Guanacaste, Costa Rica, año hidrológico 2007-2008," Universidad Estatal a Distancia, San José, Tesis de maestría 2009.
- [37] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales," Bogotá, Guía 2018.
- [38] Steven Chapra, *Surface Water-Quality Modeling.*, 2008.
- [39] Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia, *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales.* Medellín, Colombia: Editorial INSA, 1993.
- [40] Clair N Sawyer, Perry L McCarty, and Gene Parkin, *Química para Ingeniería Ambiental*, Cuarta ed.: McGraw-Hill, 2001.
- [41] Beatriz Díaz Merchán, "Modelación de la Calidad del Agua en el Interceptor Río Bogotá en los tramos Fucha-Tunjuelo-Canoas," Bogotá D.C., 2004.
- [42] Rafael Nikolay Agudelo Valencia, "Construcción de una hoja de cálculo en Excel para la aplicación del modelo de simulación de oxígeno disuelto en cuerpos de aguas superficiales (ríos y quebradas)," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Tesis especialista 2009.
- [43] Marlen Robert Pullés, "Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba," *CENIC*, vol. 45, no. 1, pp. 25--36, 2014.
- [44] Cristina Andrea Peña Cotrino and Diego Mauricio Quijano Prieto, "Modelación de Nitrógeno en la cuenca alta del río Siecha para establecer procesos de transformación de Nitrógeno," Universidad de la Salle, Bogotá, Tesis de pregrado 2010.
- [45] Marian Moreinys Almeida Cujia, "Validación de métodos analíticos para la determinación de nitratos, nitritos, ortofosfatos y nitrógeno amoniacal en aguas, en el laboratorio de SIAMA LTDA.," Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Tesis de pregrado 2016.

- [46] Donald O' Connor and William Dobbins, "Mechanism of Reareation in Natural Streams," *Journal of the Sanitary Engineering Division*, vol. 123, no. 1, pp. 641-666, 1958.
- [47] José Arumí, Luis Salgado, J Nuñez, and Marcelino Claret, "Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable rural en Chile," *Revista Panamericana de Salud Pública*, vol. 20, no. 10, Diciembre 2006.
- [48] Luis Cea, "Modelos numéricos para el estudio de calidad de aguas del medio receptor," Universidad de La Coruña, La Coruña, Artículo de Investigación 2010.
- [49] J. L. Mancini, *Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions.*, 1978.
- [50] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, "Análisis de la calidad del agua de las diferentes entradas al humedal y su relación con el caudal de entrada y estudio de banco de semillas del humedal," EAAB, Bogotá, Informe 2010.
- [51] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Acuerdo No. 43 del 2006, Octubre 2006.
- [52] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 del 2015, Abril 2015.
- [53] Ministerios de la Protección Social, Ministerios de Ambiente y Desarrollo Territorial, Resolución 2115 del 2007, Junio 2007.
- [54] Ministerio de Desarrollo Económico, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000.
- [55] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1076 del 2015, 2015.
- [56] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 703 del 2018, 2018, Por el que se efectúan unos ajustes al Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y se dictan otras disposiciones.
- [57] Secretaría Distrital de Ambiente, Resolución 5731 del 2008, 2008, Por la cual se deroga la Resolución 1813 de 2006 y se adoptan nuevos objetivos de calidad para los Ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo y el Canal Torca en el Distrito Capital.
- [58] Patricia Torres, Camilo Cruz, and Paola Patiño, "Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano, una revisión crítica," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 79-94,

Diciembre 2009.

- [59] J Gamboa, R Moreno, M Guzmán, and C Pinilla, "Comportamiento de coliformes fecales como indicadores bacterianos de contaminación fecal en diferentes mezclas de biosólido y estériles utilizados para la restauración ecológica de la cantera Soratama, Bogotá," *Universitas Scientiarum*, vol. 12, no. 2, pp. 111-120, 2007.
- [60] Lina Ramos, Luís Vidal, Sandra Vilardy, and Lina Saavedra, "Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, caribe colombiano," *Acta biol*, vol. 13, no. 3, pp. 87-98, 2008.
- [61] Jim Bauder and Adam Sigler. Well Educated, Educación en el Agua de Pozo.
- [62] Elsa Victoria Carvajal Jaimes and Rafael Alberto Esparragoza Zárate, "Análisis de la Normatividad Ambiental Colombiana para el Vertimiento de Aguas Residuales al Sistema de Alcantarillado Público," Floridablanca, 2008.
- [63] Maria del C Espinosa Lloréns, Yadiana León Hernandez, and Xiomara Rodríguez Petit, "Problemática de la determinación de especies nitrogenadas (nitrógeno total y amoniacal) en aguas residuales.," *Revista Cenic*, vol. 44, 2013.
- [64] Central Coast Regional Water Quality Control Board, "Programa regulatorio agrícola, recursos para agricultores "El Nitrato en el Agua Potable", " California, 2013.
- [65] CORTOLIMA; CORPOICA; SENA; UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, "Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrografica Mayor del Río Totare,".
- [66] José Fuentes, Rodolfo Patiño, Pedro López, and Juan López, "Densidad de bacterias coliformes y su relación con algunas variables físicoquímicas en aguas de la laguna de los Mártires, Isla Margarita, Venezuela," *Saber*, vol. 21, no. 2, pp. 126-132, Mayo 2009.