



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo
a la obtención del Título de
Ingeniero en Gestión Ambiental

Proyecto de Investigación:

*“Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, cantón Quevedo, estación
húmeda, año 2019”*

Autor:

Miguel Fabián Aspiazu Rosado

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Julio César Pazmiño Rodríguez, MSc.

Quevedo-Los Ríos-Ecuador

2018-2019

DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Miguel Fabián Aspiazu Rosado, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f.

Miguel Fabián Aspiazu Rosado
C.C. # 1205471392

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, Ing. Julio Pazmiño Rodríguez MSc., Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante: Sr. Aspiazu Rosado Miguel Fabián, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado *“Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, cantón Quevedo, estación húmeda, año 2019”*, previo a la obtención del título de Ingeniero en Gestión Ambiental, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

.....

Ing. Julio César Pazmiño Rodríguez MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, cantón Quevedo, estación húmeda, año 2019”

Presentado a la Comisión Académica como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero en Gestión Ambiental.

Aprobado por:

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Carolina Tay Hing Cajas, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Norma Guerrero Chuez, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Ángel Yépez Rosado, MSc.

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

2019

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi madre Nury Rosado, luchadora incansable, admiro y agradezco su esfuerzo y sacrificio para permitirme tener un mejor futuro y que a pesar de que 8877 kilómetros nos separan, siempre está pendiente de mi diario vivir.

Gracias a mi abuela Aurora Fernández, quien cumple un rol importante en mi crecimiento personal y profesional, gracias por cada minuto que me dedica con todo su amor y cariño.

Gracias a mi amada novia Gina Martínez, la persona que me brinda su amor y compañía que siempre deseé, gracias mi negra hermosa por todo el tiempo, paciencia y ayuda en todo mi proceso universitario.

Gracias a Dios por darme salud y fuerzas necesarias para permitirme cumplir este objetivo importante en mi vida.

DEDICATORIA

Te dedico esto donde sea que te encuentres, sé y siento que tu orgullo y alegría es grande al verme cumplir un objetivo importante en mi vida, gracias por ser mi luz, mi ángel de la guarda, te amo y extraño papá.

*Con amor, sacrificio y
dedicación, por ti y para ti
Miguel Orlando Aspiazu[†].*

RESUMEN EJECUTIVO

Los modelos de calidad de agua tienen como finalidad generar información sobre el comportamiento de las fuentes hídricas, y predecir sus futuros escenarios, esta investigación se llevó a cabo en el estero El Guayabo perteneciente al cantón Quevedo y tiene como objetivo modelizar la calidad del agua del estero El Guayabo en la estación húmeda. Cabe recalcar que la investigación cuenta con 4 objetivos específicos que fueron útiles para el cumplimiento de la investigación. El trabajo de campo se llevó a cabo realizando 6 campañas de muestreo quincenales durante los meses de febrero, marzo y abril, en la época lluviosa. De la misma manera se realizó un trabajo exhaustivo en el área determinada para el estudio de la corriente de agua, segmentando los 4,15 km del estero El Guayabo en 3 tramos, con un total de 9 puntos de muestreo.

Es importante resaltar que dentro de todos los puntos de muestreo se realizó estudio de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua del estero El Guayabo, analizando; oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (°C), y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se aplicaron modelos matemáticos para determinar y comprobar el comportamiento de los parámetros analizados, se utilizaron ecuaciones de STREETER-PHELPS con la cual se modelizó la calidad del agua del estero El Guayabo, así mismo se aplicó la herramienta estadística STATGRAPHICS. Para la finalización de los resultados de la investigación se utilizó QUAL2K, permitiendo ingresar información hidrodinámica del estero estudiado. Para calibrar el modelo se ajustaron las constantes cinéticas de desoxigenación (Kd), reaireación (Ka) y de remoción total de la DBO (kr), empleando la metodología Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), utilizando el software estadístico Statgraphics mediante la herramienta de simulaciones Monte Carlo.

Se pudo verificar que el agua del estero se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normativa de calidad ambiental, debido a la velocidad de flujo de la corriente, aporte de caudal de los afluentes tributarios con altas concentraciones de OD y baja DBO, además de las pocas descargas con materia orgánica que existen en el estero.

Palabras clave: Qual2k, Streeter-Phelps, Statgraphics, Hidronámica, Fisicoquímicos, Constantes Calibradas, Conductividad Eléctrica, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Oxígeno Disuelto.

ABSTRACT

The models of water quality have as generating information on the behavior of water sources, and predict their future scenarios, this research will be carried out in the east El Guayabo belonging to the Quevedo canton and aims to model the water quality of Estero The Guayabo in the wet season. It should be noted that the research has 4 specific objectives that were useful for the fulfillment of the investigation. The field work was carried out 6 biweekly sampling campaigns during the months of February, March and April, in the rainy season. In the same way, an exhaustive work was carried out in the area determined for the study of the water flow, segmenting the 4.15 km of the El Guayabo estuary into 3 sections, with a total of 9 sampling points.

It is important to highlight that within all sampling points a study of the physicochemical parameters of the water quality of the El Guayabo estuary was carried out, analyzing; Dissolved oxygen (OD), hydrogen potential (pH), electrical conductivity (EC), temperature ($^{\circ}$ C), and biochemical oxygen demand (BOD). Mathematical models were applied to determine and check the behavior of the parameters analyzed, STREETER-PHELPS equations were used with which the water quality of the El Guayabo estuary was modeled, the STATGRAPHICS statistical tool was also applied. To complete the results of the research, QUAL2K was used, allowing hydrodynamic information to be entered from the estuary studied. To calibrate the model, the kinetic constants of deoxygenation (Kd), reaeration (Ka) and total BOD removal (kr) were adjusted, using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) methodology, using Statgraphics statistical software using the Monte Carlo simulations.

It was possible to verify that the water of the estuary is within the parameters established by the environmental quality regulations, due to the flow rate of the current, flow contribution of the tributary tributaries with high concentrations of OD and low BOD, in addition to the few discharges with organic matter that exist in the estuary.

Keywords: Qual2k, Streeter-Phelps, Statgraphics, Hydronics, Physicochemicals, Calibrated Constants, Electrical Conductivity, Biochemical Oxygen Demand, Dissolved Oxygen.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	3
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Problema de investigación	4
1.1.1. Planteamiento del problema	4
1.1.1.1. Diagnóstico	4
1.1.1.2. Pronóstico	5
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.3. Sistematización del problema.....	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Justificación.....	7
CAPÍTULO II	8
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1. Marco Conceptual	9
2.1.1. Contaminación del agua	9
2.1.2. Fuentes de contaminación	9
2.1.3. Efectos de la contaminación del agua	9
2.1.4. Parámetros de calidad del agua superficial	10
2.1.4.1. Parámetros físicos	10
2.1.4.1.1. Temperatura.....	10
2.1.4.1.2. Olor.....	10
2.1.4.1.3. Color.....	10
2.1.4.2. Parámetros químicos	10
2.1.4.2.1. pH	10
2.1.4.2.2. Oxígeno disuelto.....	11
2.1.4.2.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	11
2.1.4.2.4. Modelos de calidad del agua	11
2.2. Marco Referencial	13
CAPÍTULO III	16
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
3.1. Localización	17

3.2.	Tipo De Investigación	18
3.3.	Métodos De Investigación.....	18
3.4.	Fuentes de Información	18
3.5.	Diseño De La Investigación	19
3.5.1.	Determinación de las características hidrodinámicas del estero El Guayabo	19
3.5.2.	Caracterización de la calidad del agua del estero El Guayabo.....	20
3.5.2.1.	Recolección de muestras de agua	23
3.5.3.	Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo con el modelo matemático de Streeter-Phelps	23
3.5.4.	Simulación de la calidad del agua del estero El Guayabo con programa informático	25
3.6.	Instrumentos de investigación	26
3.6.1.	Hojas de cálculo para caudales.....	26
3.6.2.	Hoja del modelo de Streeter-Phelps	26
3.6.3.	Hojas de calibración de Statgraphics	26
3.7.	Tratamiento de los datos	26
3.8.	Recursos Materiales Y Equipos	27
3.8.1.	Materiales y equipos.....	27
CAPÍTULO IV		28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		28
4.1.	Resultados de la investigación	29
4.1.1.	Características hidromorfológicas del estero El Guayabo	29
4.1.1.1.	Caudal.....	29
4.1.1.2.	Velocidad de la corriente	30
4.1.1.3.	Profundidad del cauce	32
4.1.2.	Caracterización de la calidad del agua del estero El Guayabo.....	33
4.1.2.1.	Oxígeno disuelto.....	33
4.1.2.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	34
4.1.2.3.	pH	36
4.1.2.4.	Conductividad eléctrica	37
4.1.3.	Modelización de la calidad del agua con el modelo de Streeter-Phelps	38
4.1.3.1.	Constantes cinéticas.....	38
4.1.3.1.1.	Constante de reaireación (ka)	38

4.1.3.1.2.	Constante de desoxigenación (kd).....	38
4.1.3.1.3.	Constante de remoción total de la DBO (kr)	39
4.1.3.2.1.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de febrero	40
4.1.3.2.2.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de marzo.....	42
4.1.3.2.3.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de abril	45
4.1.3.2.4.	Análisis de rendimiento	47
4.1.4.	Simulación de la calidad del agua del estero El Guayabo con QUAL2K.....	48
4.1.4.1.	Simulación del OD y la DBO en el mes de febrero.....	48
4.1.4.2.	Simulación del OD y la DBO en el mes de marzo	49
4.1.4.3.	Simulación del OD y la DBO en el mes de abril.....	50
4.1.4.4.	Análisis de rendimiento	51
4.2.	Discusión.....	53
CAPÍTULO V		55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		55
5.1.	Conclusiones	56
5.2.	Recomendaciones.....	58
CAPÍTULO VI.....		59
BIBLIOGRAFÍA.....		59
Referencias Bibliográficas		60
CAPÍTULO VII.....		62
ANEXO.....		62
7.1.	Tablas de datos generales sobre las características hidromorfológicas del estero El Guayabo.	63
7.2.	Tablas de datos generales sobre las características fisicoquímicas del estero El Guayabo	67
7.3.	Hojas de cálculo del modelo de Streeter-Phelps	70
7.4.	Hojas de datos de simulación con QUAL2K	73
7.5.	Fotografías.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. Modelo de preservación de la muestra	23
Tabla 4. Fórmulas y rangos de profundidad y velocidad utilizados para estimar k_a	24
Tabla 5. Medidas de bondad de Ajuste.....	27
Tabla 6. Materiales y equipos utilizados en la investigación	27
Tabla 7. Caudales en l/s del estero El Guayabo en la estación lluviosa	29
La tabla 8 muestra las velocidades de la corriente donde se puede notar que la corriente más rápida de la época lluviosa registrada durante las seis campañas es la del 15 de febrero con un valor de 0,96 l/s; mientras que el punto de muestro de corriente mas lenta se presentó el 24 de abril con una velocidad de 0,35 l/s en el punto de muestreo aguas arriba.	
Tabla 8. Velocidad de la corriente principal en m/s del estero El Guayabo	30
Tabla 9. Profundidad de la corriente principal del estero El Guayabo, en cm	32
Tabla 10. Niveles de oxígeno disuelto en el estero El Guayabo, en mg/l	33
Tabla 11. DBO ₅ en el estero El Guayabo, en mg/l.....	35
Tabla 12. Valores de pH en el estero El Guayabo.....	36
Tabla 13. Conductividad eléctrica en el estero El Guayabo, en $\mu\text{S}/\text{cm}$	37
Tabla 14. Valores calculados y calibrados de la constante de reaeración (k_a)	38
Tabla 15. Valores calculados y calibrados de la constante de desoxigenación (k_d)	39
Tabla 16. Valores calculados y calibrados de constante de remoción total de DBO k_r	39
Tabla 17. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de febrero.....	40
Tabla 18. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de febrero	40
Tabla 19. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno del mes de febrero %	42
Tabla 20. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de marzo	42
Tabla 21. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de marzo	43
Tabla 22. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno del mes de marzo, %.....	44
Tabla 23. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de abril.....	45
Tabla 24. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de abril	45
Tabla 25. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica del mes de abril, en %	46
Tabla 26. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto al OD.....	47
Tabla 27. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto a la DBO	47
Tabla 28. Rendimiento de QUAL2K con respecto al OD.....	52
Tabla 29. Rendimiento de QUAL2K con respecto a la DBO	52
Tabla 30. Valores obtenidos en el cálculo del caudal por fechas de las campañas de muestreo en l/s.....	63
Tabla 31. Promedio de los caudales en m/s.....	63
Tabla 32. Valores obtenidos en el cálculo de la velocidad por fechas de las campañas de muestreo	64
Tabla 33. Promedio de la velocidad en m/s.....	64
Tabla 34. Valores obtenidos en el cálculo de la profundidad por fechas de las campañas de muestreo.....	64

Tabla 35. Promedio de la profundidad en m	64
Tabla 36. Valores de DBO mg/l	67
Tabla 37. Promedio de DBO mg/l	67
Tabla 38. Valores de oxígeno disuelto mg/l	67
Tabla 39. Valores promedio de oxígeno disuelto mg/l.....	68
Tabla 40. Mediciones de pH.....	68
Tabla 41. Promedio pH.....	68
Tabla 42. Mediciones de temperatura, °C	68
Tabla 43. Promedio de temperatura °C	69
Tabla 44. Mediciones de conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	69
Tabla 45. Promedio de conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Variación del caudal promedio de la corriente principal del estero El Guayabo	30
Gráfico 2. Velocidad promedio de la corriente principal del estero El Guayabo, en m/s	31
Gráfico 3. Variación promedio de la profundidad en la corriente principal del estero El Guayabo.....	32
Gráfico 4. Variación promedio del oxígeno disuelto en el estero El Guayabo	34
Gráfico 5. Variación promedio de la DBO ₅ en el estero El Guayabo	35
Gráfico 6. Variación promedio del pH en la corriente principal del estero El Guayabo	36
Gráfico 7. Variación promedio de la conductividad eléctrica en la corriente principal del estero El Guayabo.....	37
Gráfico 8. Perfil del OD del mes de febrero.....	41
Gráfico 9. Perfil de la DBO del mes de febrero	41
Gráfico 10. Perfil del OD del mes de marzo	43
Gráfico 11. Perfil de la DBO del mes de marzo.....	44
Gráfico 12. Perfil del OD del mes de abril	45
Gráfico 13. Perfil de la DBO del mes de abril.....	46
Gráfico 14. Simulación del OD con QUAL2K del mes de febrero.....	48
Gráfico 15. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de febrero	49
Gráfico 16. Simulación del OD con QUAL2K del mes de marzo	49
Gráfico 17. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de marzo.....	50
Gráfico 18. Simulación del OD con QUAL2K del mes de abril.....	50
Gráfico 19. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de abril	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del sitio de estudio	17
Figura 2. Mapa de localización de los puntos de estudio	22
Figura 3. Curva sag de oxígeno disuelto en corrientes de agua superficial.....	24
Figura 4. QUAL2K.....	25
Figura 5. Hojas de cálculo de caudales Aguas Arriba en marzo	65
Figura 6. Hoja de cálculo de caudales punto de muestreo tramo 1 en marzo	65
Figura 7. Hoja de cálculo de caudales punto de muestreo tramo 2 en marzo	66
Figura 8. Hoja de cálculo de caudales punto de muestreo tramo 3 en marzo	66
Figura 9. Hoja de cálculo de Streeter-Phelps, mes de febrero.....	70
Figura 10. Hojas de cálculo modelo Streeter-Phelps, mes de marzo	70
Figura 11. Hojas de cálculo modelo Streeter-Phelps, mes de abril	71
Figura 12. Hojas de Statgraphics, para el cálculo de las constantes cinéticas.....	71
Figura 13. Hojas de Statgraphics para el cálculo de las constantes cinéticas.....	72
Figura 14. Hojas de Statgraphics para el cálculo de las constantes cinéticas.....	72
Figura 15. Hoja de datos iniciales de QUAL2K.....	73
Figura 16. Hoja de datos de cabecera de QUAL2K	73
Figura 17. Hoja de Reach (tramos) de ingreso de datos para los tramos	74
Figura 18. Hoja para ingresar las tasas o constantes cinéticas (Reach rates)	74
Figura 19. Hoja para ingresar los datos de las descargas puntuales	75

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, cantón Quevedo, estación húmeda, año 2019				
Autor:	Miguel Fabián Aspiazu Rosado				
Palabras clave:	Qual2k	Streeter-Phelps	Statgraphics	Hidronámica	Fisicoquímicos
	Constantes Calibradas	Conductividad Eléctrica		Demanda Bioquímica de Oxígeno	Oxígeno Disuelto
Fecha de publicación:					
Editorial:					
Resumen: (hasta 300 palabras)	<p>Los modelos de calidad de agua tienen como finalidad generar información sobre el comportamiento de las fuentes hídricas, y predecir sus futuros escenarios, esta investigación se llevó a cabo en el estero El Guayabo perteneciente al cantón Quevedo y tiene como objetivo modelizar la calidad del agua del estero El Guayabo en la estación húmeda. Cabe recalcar que la investigación cuenta con 4 objetivos específicos que fueron útiles para el cumplimiento de la investigación. El trabajo de campo se llevó a cabo realizando 6 campañas de muestreo quincenales durante los meses de febrero, marzo y abril, en la época lluviosa. De la misma manera se realizó un trabajo exhaustivo en el área determinada para el estudio de la corriente de agua, segmentando los 4,15 km del estero El Guayabo en 3 tramos, con un total de 9 puntos de muestreo.</p> <p>Es importante resaltar que dentro de todos los puntos de muestreo se realizó estudio de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua del estero El Guayabo, analizando; oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (°C), y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se aplicaron modelos matemáticos para determinar y comprobar el comportamiento de los parámetros analizados, se utilizaron ecuaciones de STREETER-PHELPS con la cual se modelizó la calidad del agua del estero El Guayabo, así mismo se aplicó la herramienta estadística STATGRAPHICS. Para la finalización de los resultados de la investigación se utilizó QUAL2K, permitiendo ingresar información hidrodinámica del estero estudiado. Para calibrar el modelo se ajustaron las constantes cinéticas de desoxigenación (Kd), reaireación (Ka) y de remoción total de la DBO (kr), empleando la metodología Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), utilizando el software estadístico Statgraphics mediante la herramienta de simulaciones Monte Carlo.</p>				
Descripción:					
URI:	<u>(en blanco hasta cuando se dispongan los repositorios)</u>				

Introducción

A medida que aumenta el control del hombre sobre la tierra y aparecen nuevas necesidades como consecuencia de la vida en sociedad, el medio ambiente se deteriora cada vez más. El comportamiento del hombre y su adaptación al medio ambiente para poder sobrevivir, conlleva a la modificación del medio según sus necesidades. La contaminación del medio ambiente es uno de los problemas más críticos presentes en el mundo, por lo que ha surgido la necesidad de buscar alternativas para su solución. [1]

El agua es uno de los recursos naturales que tienen más afectaciones, ya que sufre alteración de sus características naturales principalmente producida por la actividad humana que la hace total o parcialmente inadecuada para el consumo humano o como soporte vital de plantas y animales. Como resultado de la contaminación, el agua ha sufrido cambios en su color y composición, producto de la cantidad de suciedad que llega a ella (desechos de los hogares, detergentes, petróleo y pesticidas). Estos desechos alteran su sabor, densidad, pureza, entre otros. Existen diferentes contaminantes del agua. Algunas de ellas son las aguas residuales y los residuos provenientes de las industrias. [1]

Ecuador es considerado como uno de los territorios con cuantiosos recursos hídricos, pero en los últimos años se ha visto limitado su acceso al agua de buena calidad. Pese a contar con una de las constituciones más verdes del mundo y una serie de normativas que defienden la conservación de la naturaleza y los derechos del ser humano, nos vemos inmersos en grandes y graves problemas de degradación, amenaza a la flora y fauna y el peligro inminente de acrecentar la crisis global del agua. [2]

La presente investigación se llevó a cabo para determinar la calidad del agua del estero El Guayabo, ubicado al oeste del cantón Quevedo, utilizando el modelo de Streeter-Phelps como método de modelización que brindará información sobre la capacidad de renovación que tiene el sitio en estudio, este método fue aplicado por considerarse un método confiable y con bajos índices de error, que ha sido aplicado en varios estudios a nivel mundial.

El cantón Quevedo está ubicado en una zona donde es fácil acceder al recurso hídrico, cuenta con un río de gran importancia, el río Quevedo, con un recorrido por toda la extensión de la ciudad, así mismo este cuerpo de agua se ve afectado por las descargas directas de las aguas residuales sin tratamiento alguno.

La investigación se realizó en la época lluviosa como continuidad a un estudio previo en la época seca, los resultados de ambos estudios serán de utilidad para tener índices de contaminación que ingresa hacia el cuerpo de agua principal del cantón Quevedo.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La contaminación del agua es un problema de gran relevancia que puede proceder de fuentes naturales o de actividades humanas. En la actualidad la más importante, sin duda, es la provocada por el hombre, el desarrollo y la industrialización supone un mayor uso del agua, una gran generación de residuos y muchos de los cuales van a parar a esteros y ríos. [3]

En el cantón Quevedo existe una red hidrográfica de gran importancia, la cual cuenta con el estero El Guayabo que ha sido afectado por muchas causas que lo contaminan. Al no existir una planta de tratamiento y un adecuado sistema de aguas servidas, suscita la problemática que conlleva a la contaminación del estero, que recibe descargas directas de aguas servidas, sin tratamiento alguno, viéndose alterada la calidad del agua y destruyendo ecosistemas acuáticos.

1.1.1.1. Diagnóstico

Por la necesidad de tener una vivienda los habitantes del oeste del Cantón Quevedo, se ven en la obligación de construir sus casas cerca o en muchos casos a orillas del estero El Guayabo, esto conlleva a que todas las aguas servidas que son generadas en los hogares que están en la periferia del estero sean descargadas directamente al cuerpo de agua, alterando su calidad y estado natural. También se presentan afectaciones por aguas negras generadas en la industria Plantabal S.A. que son descargadas directamente hacia el estero El Guayabo, sin tratamiento previo.

Debido a la frecuente descarga de aguas residuales existente en el estero El Guayabo, muchos de los habitantes del sector presentan afectaciones en la salud, debido a la alteración físico – química que sufre el recurso hídrico, de la misma manera se ven afectados los animales que consumen esta agua.

1.1.1.2. Pronóstico

Debido al excesivo crecimiento poblacional los recursos naturales se ven afectados cada vez más, es por ello que los cuerpos de agua que existen en el Cantón Quevedo sufren contaminación de manera directa, si el aumento de la población continúa y no hace uso racional del agua, se pondrá en riesgo el tan preciado recurso hídrico.

1.1.2. Formulación del problema

¿Es factible, la evaluación y predicción del impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del agua del estero El Guayabo y su capacidad de autodepuración, mediante la modelización matemática de la variación del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno?

1.1.3. Sistematización del problema

¿Cuáles son las características hidromorfológicas del estero El Guayabo?

¿Cómo varían mensualmente las concentraciones de los parámetros seleccionados para lo modelización de la calidad del agua en el estero El Guayabo?

¿Cuán factible es predecir la calidad del agua del estero El Guayabo utilizando el modelo de Streeter-Phelps, con adecuado rendimiento estadístico?

¿Cuán factible es simular la calidad del agua del estero El Guayabo utilizando software especializado, con adecuado rendimiento estadístico?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Modelizar la calidad del agua del estero El Guayabo, en estación húmeda.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las características hidromorfológicas del estero El Guayabo.
- Caracterizar la calidad del agua del estero El Guayabo.
- Modelizar la calidad del agua del estero El Guayabo con el modelo de Streeter-Phelps.
- Simular la calidad del agua del estero El Guayabo mediante el programa informático QUAL2K.

1.3. Justificación

Actualmente existe mucha información sobre monitoreo llevado a cabo en diferentes fuentes hídricas, sin embargo, esta información no es utilizada para que la población realice acciones encaminadas a mejorar la calidad del agua y protegerla de la contaminación. [4]

Es por ello que en la presente investigación se plantean modelos matemáticos para ser usados como herramientas que nos permitan la evaluación de la calidad del agua del estero El Guayabo, y también hacer un estudio comparativo y determinar si la calidad del agua mejora o decae con el paso del tiempo.

Esta investigación se realizó con la finalidad de contribuir a la sociedad, para que organismos de control tomen decisiones y busquen soluciones ante la contaminación del agua existente en esteros del cantón Quevedo y por ende a su río.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Contaminación del agua

Por contaminación se entiende la introducción de desechos u otras materias en un cuerpo de agua, resultante directa o indirectamente de actividades humanas, que tenga o pueda tener efectos perjudiciales tales como causar daño a los recursos vivos y a los ecosistemas acuáticos, conllevar peligros a la salud del hombre, entorpecer las actividades de pesca y otros usos legítimos del agua, deteriorar la calidad y reducir las posibilidades de seguir utilizando este recurso. [5]

2.1.2. Fuentes de contaminación

Las principales fuentes de contaminación se han agrupado de acuerdo con su procedencia y pueden ser clasificadas en cuatro grandes grupos:

- **Urbanas:** Corresponden a las cargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales.
- **Industrias:** Son las descargas originadas por el desarrollo de actividades correspondientes a la extracción o transformación de recursos naturales.
- **Agropecuarias:** Son los efluentes de instalación dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor, así como las aguas de retorno de campos agrícolas.
- **Naturales:** Debido a la contaminación producida por las aguas residuales de las diferentes actividades del hombre está otro tipo de contaminación debida a causas naturales, como arrastres de materia orgánica por escorrentías y también productos inorgánicos de la erosión de suelos. [6]

2.1.3. Efectos de la contaminación del agua

Los efectos más destacados en la contaminación del agua es la pérdida de la vida acuática y por su consiguiente la pérdida del mismo (estero), enfermedades por hacer uso del agua para la agricultura y por el consumo de alimentos con alto nivel de contaminación, enfermedades de piel en jóvenes y adultos que utilizan estos sistemas de aguas. [7]

2.1.4. Parámetros de calidad del agua superficial

2.1.4.1. Parámetros físicos

2.1.4.1.1. Temperatura

La temperatura tiene un efecto significativo en la tasa de crecimiento de los microorganismos, aquellos que operan en un intervalo de temperatura más alta tienen una mayor tasa de crecimiento que los operarios en un intervalo inferior es relativamente estrecho. Al aumentar la temperatura, se observa un aumento gradual de la tasa de crecimiento hasta que se observa una caída abrupta debido a la desnaturalización de las proteínas a una temperatura más alta. [8]

2.1.4.1.2. Olor

Este parámetro se lo determina mediante diluciones, utilizando un panel de cata que determina el grado de dilución necesario para conseguir que desaparezca un determinado tipo de olor presente en el agua. Si tiene un olor aromático como hierba o madera indica que existe materia orgánica en las aguas superficiales; pero si el olor es nauseabundo indica que hay sulfuro hidrógeno o contaminaciones nocivas disueltas en el agua. [9]

2.1.4.1.3. Color

El agua para consumo humano, por definición debe ser incolora, por tanto, la presencia de color indica la presencia de sustancias en el agua, la cual se verá reflejada en la concentración de turbidez y sólidos, en tanto que sustancias disueltas dan lugar al denominado color verdadero y que hace referencia a la presencia de compuestos orgánicos a causa de la vegetación; el color artificial se debe a los vertidos que proveen color al agua. [10]

2.1.4.2. Parámetros químicos

2.1.4.2.1. pH

El pH del agua representa su acidez o alcalinidad, cuyo factor más importante es habitualmente la concentración en anhídrido carbónico debida a la mineralización total.

Este regulador del agua controla los valores de pH así como las reacciones químicas debidas la formación, alteración y disolución de los minerales presentes en las aguas. [11]

2.1.4.2.2. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) en el agua depende de factores tales como la temperatura, presión atmosférica y salinidad y depende del origen del agua. Así, por ejemplo, a mayores temperaturas la cantidad de oxígeno en el agua puede disminuir de manera significativa. También en las aguas profundas o con menor renovación tiende a disminuir y pueden llegar a darse fenómenos anaerobios. La presencia de oxígeno es esencial en esteros y lagos y determinan su salud ambiental. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. [11]

2.1.4.2.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno

Es la cantidad de oxígeno usado por poblaciones microbianas del agua en respuesta a la introducción de material orgánico degradable. La materia orgánica se alimenta por las bacterias aeróbicas que requieren oxígeno, en este proceso la materia es degradada y oxidada. Esto provoca cambios en la vida acuática, pues mucho del oxígeno disuelto (OD) libre se consume por la bacteria aeróbica, robando a otros organismos acuáticos el oxígeno necesario para vivir, así organismos más tolerantes a niveles bajos de OD pueden aparecer y volverse más numerosos. [12]

2.1.4.2.4. Modelos de calidad del agua

2.1.4.2.4.1. Modelo de Streeter-Phelps

El primer modelo matemático aplicado a un curso de agua fue elaborado por W. B. Streeter y E. B. Phelps en 1925 aplicado al río Ohio (Estados Unidos) en el estudio “La polución y purificación natural del rio Ohio”. Estos autores desarrollaron una ecuación que representa el decaimiento de oxígeno disuelto (OD) por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y su recuperación por reaireación con oxígeno atmosférico. El modelo de Streeter-Phelps consistió en una ecuación de balance de oxígeno para una descarga

puntual a una tasa constante con condiciones hidrodinámicas estacionarias y para un tramo con geometría uniforme. [13]

2.1.4.2.4.2. Programa QUAL-2K

El modelo de calidad del agua QUAL2K fue desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Chapra y Pelletier en el año 2003, posteriormente fue mejorado en el año 2008 y recibió por nombre QUAL2Kw. La nueva versión del modelo tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario. [14]

2.1.4.2.4.3. Calibración de modelos de calidad del agua

La calibración es un proceso iterativo encaminado a llevar a un margen de error mínimo la diferencia entre los datos simulados por el modelo y los valores medidos en campo para el mismo. En un modelo de calidad del agua se deben especificar las tasas de reacción o transformación de los determinantes de calidad del agua y tasas de transferencia de masa hacia o desde la superficie del agua y el fondo del canal. La cinética de las reacciones son particulares para cada tipo de río en las condiciones específicas que se presentan en el sistema físico modelado y las tasas de transferencia dependen en gran parte de la turbulencia de la corriente. [15]

2.2. Marco Referencial

Previo a la realización del presente proyecto investigativo se tomaron en cuenta investigaciones que tenga similitud, para de esta manera dar soporte al estudio realizado, comparando los resultados obtenidos.

De acuerdo a la investigación realizada por; Villalobos Hernán destacando la calibración del programa Qual2K como herramienta para la modelización de la calidad del agua establece que; debido a la problemática ambiental que enfrenta el país en materia de calidad del agua y la necesidad de priorizar proyectos en materia de saneamiento ambiental, se formuló, junto con el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), el presente estudio cuyo objetivo general es: “Calibrar un modelo matemático para la simulación de la autodepuración en ríos (QUAL2K) que se adapte a la realidad del país, de manera que sirva de herramienta para el análisis de calidad del agua y proyección de impactos en los ríos”. [16]

La integración de modelos tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio temporal de los parámetros de calidad del agua Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Temperatura (T) en una escala de agregación mensual en el año de línea base considerado como 2011 y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café. Los valores de concentración de DBO no superan los 5 mg/L en el escenario de línea base. La concentración de OD se encontró entre 4 y 9.5 mg/L. Los resultados obtenidos, representan el comportamiento del río, cumple con la normatividad local para los usos actuales del agua. [16]

En referencia a Martínez y Pazmiño, llevando a cabo la aplicación de modelos matemáticos en la calidad del agua sirve para poder determinar el comportamiento de los parámetros a lo largo de una corriente y establecer las características hidromorfológicas. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo general modelizar la calidad del agua del estero El Pital en la estación lluviosa. [17]

Para cumplir con estos objetivos se realizó un trabajo de campo que contó con 6 campañas de muestreo quincenales durante los meses de febrero, marzo y abril, en la época lluviosa. Se establecieron 7 puntos de muestreo: aguas arriba, tramo 1, tramo 2, tramo 3, 1 descarga principal proveniente de una industria procesadora de maracuyá (Tropifrutas) y los dos tributarios identificados, uno proveniente del Sector Promejoras y el otro siendo un ojo de agua que nace desde el sector Gustavo Campi. Durante esta fase se llevó a cabo la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua los cuales fueron: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y conductividad eléctrica (CE). [17]

En referencia a Valarezo, los modelos de calidad del agua permiten evaluar el comportamiento de una corriente natural, describir el estado ecológico de un sistema fluvial y predecir escenarios futuros cuando ciertas condiciones límite o iniciales se alteran. El objetivo de esta investigación fue modelizar la incidencia la calidad del agua del estero El Guayabo, del cantón Quevedo, en la estación seca, con este fin se cumplieron los siguientes objetivos específicos: (1) determinar las características hidromorfológicas del estero, (2) caracterizar la calidad del agua del estero, (3) modelizar la calidad del agua aplicando el modelo de Streeter-Phelps, y, (4) simular con programas de computadora QUAL2K la calidad del agua. [7]

La modelización y calibración se realizó utilizando las expresiones matemáticas establecidas por el modelo de Streeter-Phelps, para lo cual se usaron los datos de campo de las características hidrométricas y fisicoquímicas observados. El proceso de calibración consistió en ajustar las constantes cinéticas de reaireación (k_a), desoxigenación (k_d) y de remoción total de la DBO (k_r), empleando la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), que combina el método manual (error y ensayo) con el método automático, con el fin de obtener posibles variaciones de las constantes cinéticas, a través de simulaciones Monte Carlo. Luego, se verificó (valido) el modelo calibrado con los datos registrados durante el evento de máxima precipitación. Los resultados obtenidos revelan que en los tres segmentos estudiados la tasa de reaireación es mayor que la tasa de desoxigenación, una condición que indica un alto potencial de autodepuración. [7]

Por otra, se comprueba que la variación de la DBO, se debe a los altos valores de k_r , que se les atribuyen a corrientes someras de bajas profundidades, lo que demuestra que se trata de sistemas relativamente sencillos de biodegradar. Finalmente, para determinar el error estadístico entre los valores medidos en el campo con los valores pronosticados por el modelo matemático se efectuó el análisis de rendimiento de la OD y DBO, mediante el método de “error relativo”, presentándose diferencias inferiores del 10% para el modelo de Streeter- Phelps. Sin embargo, en la simulación con QUAL2K, debido a la carencia de datos históricos de la cantidad de parámetros requeridos por el software no se obtuvo un buen ajuste. [7]

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

Esta investigación se realizó en el estero EL Guayabo del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, con una altitud promedio de 72 msnm, predominando el Bosque Húmedo Tropical, con una temperatura promedio de 25°C, la precipitación varía entre 1750-2500 mm. El área en la cual se realizó el estudio inicia en la parte sur de la parroquia rural La Esperanza y desemboca al Noreste del cantón, en el Río Quevedo.

Figura 1. Mapa de localización del sitio de estudio



Fuente: IGM / INEC

3.2. Tipo De Investigación

Para la realización de este proyecto se llevó a cabo básicamente investigación de campo, de esta manera se pudo obtener información y datos que sirvieron para el desarrollo del mismo. En conjunto con la investigación de campo también se aplicó investigación experimental, ya que así se pudieron manipular y utilizar de manera óptima equipos y herramientas que permitieron la consecución y finalización de esta investigación.

3.3. Métodos De Investigación

- Método analítico: Este modelo es el encargado de conocer las causas y sus características del objeto de estudio, se encargó de la identificación de las características hidromorfológicas en el estero y de la misma manera determinar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos necesarios para la aplicación de modelo matemático requerido en la presente investigación. [7]
- Método inductivo: Es el encargado de conocer la realidad del problema, por tal motivo la aplicación de este método en la investigación se basó en el planteamiento del modelo de Streeter-Phelps, del cual obtenemos resultados sobre la calidad del agua y que son presentados a través de gráficos sobre los perfiles de DBO y OD que son los encargados de concluir el grado de contaminación por materia orgánica en cuerpos de agua y de la misma manera se emplearon pruebas estadísticas para la calibración y simulación en la modelización. [7]

3.4. Fuentes de Información

En una investigación existen dos tipos de fuentes, entre ellas encontramos:

- Fuentes primarias: Consisten en datos reales que se emplean en el estudio y son tomados directamente por el investigador, en este caso son datos que se obtuvieron de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Fuentes secundarias: Las investigaciones de modelización de calidad de agua realizadas por otras personas, sirven en este caso como fuentes secundarias.

3.5. Diseño De La Investigación

3.5.1. Determinación de las características hidrodinámicas del estero El Guayabo

El cuerpo de agua considerado en la investigación, fue segmentado en 3 tramos, los cuales constituyeron las unidades de modelización del cauce, incluyendo 9 puntos de muestreo, Los tramos se delimitaron en función de las semejanzas y diferencias hidrodinámicas, morfológicas y ambientales que se identificaron en el recorrido exploratorio previo al desarrollo de la investigación. [20]

En cada una de las unidades de modelización se realizaron aforos quincenales en la estación lluviosa en los meses de febrero, marzo y abril del año 2019, utilizando el método del flotador, que se basó en determinar el área de la sección transversal de la corriente, con la ayuda de estacas y un flexómetro. Para determinar la velocidad de la corriente se utilizó una pelota flotante ligera donde se midió con un cronómetro el tiempo que duro la pelota en recorrer una longitud de entre cinco a siete metros. De modo que el caudal en los tramos y descargas se obtuvo multiplicando el área de las secciones transversales al cauce, por la velocidad de la corriente. [20]

$$Q = A \times V$$

Para tal efecto el área de la sección transversal representativa de cada tramo fue calculada mediante la siguiente integral definida. [20]

$$\int_{X_0}^{X_f} f(z) dz$$

Donde, los límites inferior y superior de la integral (X_0 y X_f) fueron el inicio y el final de la anchura del cauce; y $f(z)$ es la curva resultante del ajuste de los diferentes datos de profundidad que se midieron en las secciones transversales de los tramos a modelizar, o por regresión polinómica o por el método de interpolación de Newton. [20]

3.5.2. Caracterización de la calidad del agua del estero El Guayabo

Para la modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, se realizó el recorrido para el reconocimiento del mismo, tomando en cuenta las características hidromorfológicas y se identificó los afluentes que se descargaban en el cuerpo del agua, en el cual se establecieron 3 tramos y 3 afluentes, donde 2 afluentes consistían en la descarga de canal de aguas de cultivo y una descarga continua de aguas residuales de una industria maderera. El segmento total considerado para la investigación es de 4,15 km, la tabla 1 muestra los 9 puntos de monitoreo considerados en esta investigación (ver figura 2).

Tabla 1. Identificación de puntos de muestreo, coordenadas UTM

Puntos De Muestreo	Coordenadas UTM	
	Longitud E	Latitud N
Aguas arriba	675509	9892436
Descarga 1	675363	9892325
Descarga 2	675386	9892347
1 ^{er} PMT1	675278	9892277
Tributario	674633	9891690
2 ^{do} PMT1	672749	9889873
PMT2	674204	9891048
Descarga 3	673653	9890639
PMT3	672749	9889873

Paralelamente a los aforos, se recolectaron muestras de agua quincenales in situ en los 9 puntos de muestreo designados en el cauce para poder modelizar la calidad del agua del estero El Guayabo, es decir, en los tres tramos, observando los criterios establecidos por las normas INEN 2176:1998, INEN 2226:2000 e INEN 2169:1998, sobre manejo y conservación de muestras, técnicas de muestreo, y diseño de programas de muestreo, respectivamente. Se realizaron análisis de los parámetros físico- químicos en los 9 puntos de muestreo realizado en 6 ocasiones como fueron: oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y temperatura (°C).

El análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) fue el único parámetro que se realizó en 6 puntos de muestreo que son; aguas arriba, descarga 1, 1er PMT1, PMT2, descarga 3 y PMT3.

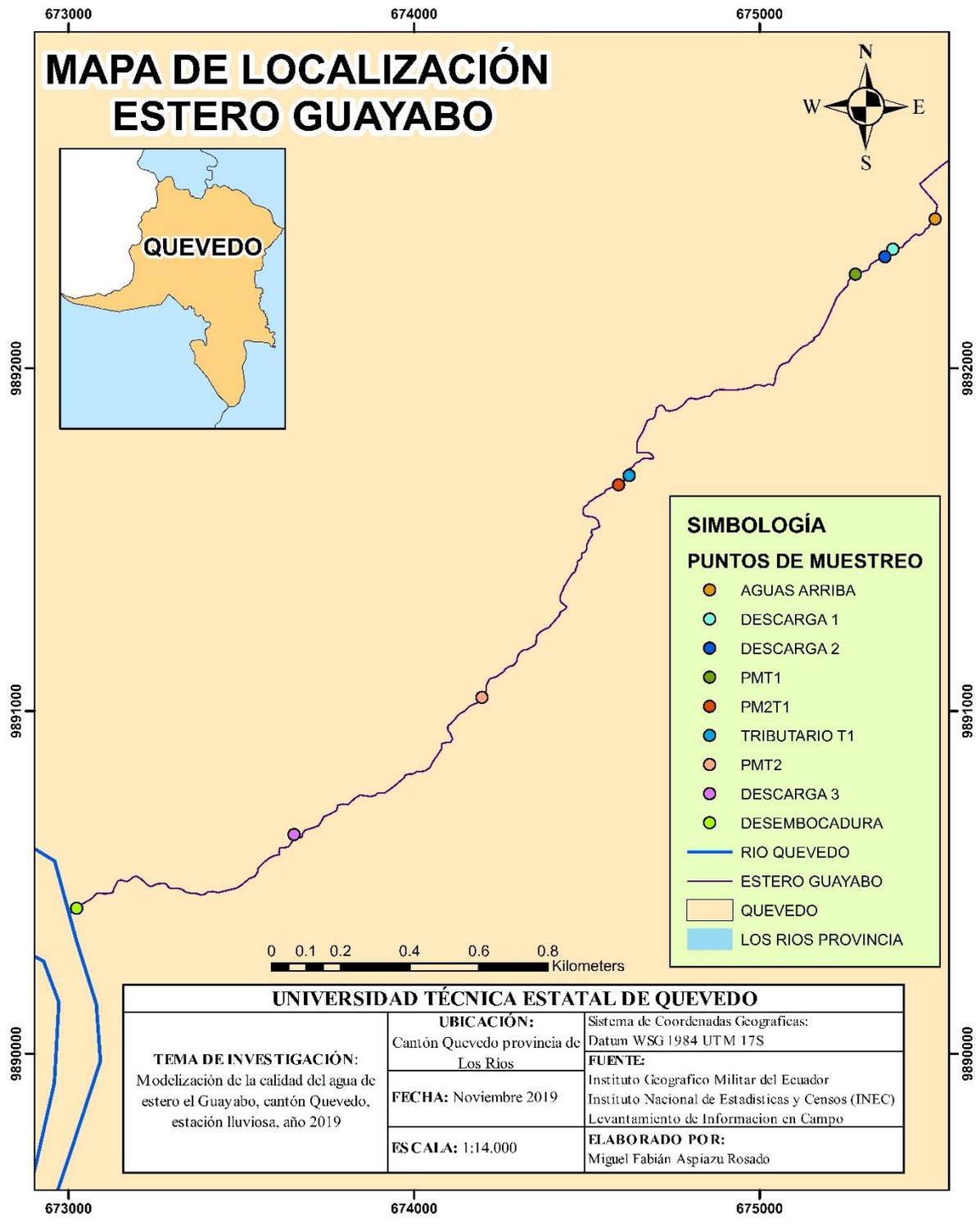
Las muestras de agua para el análisis de la DBO fueron llevadas en un período de 8 horas para ser analizadas en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Estatal de Quevedo mediante el método respirométrico dentro de una cabina de incubación OxiTop® Box, y los parámetros de oxígeno disuelto, potencial hidrógeno, conductividad eléctrica, y temperatura se registraron in situ mediante el medidor portátil Oxi 3310 SET 1e instrumentos portátiles digitales marca Biocharge. [19]

En la siguiente tabla se detallan las características de los equipos utilizados para los parámetros mencionados anteriormente:

Tabla 2. Equipos para medir parámetros físicos y químicos

Parámetro	Unidad de medida	Equipo de medición
Oxígeno disuelto	mg/l	Medidor portátil Milwaukee MW600
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	Método respirométrico en una cabina de incubación OxiTop® Box
Temperatura	°C	Portátil digital marca Biocharge
Conductividad eléctrica	μS/cm	Portátil digital marca Biocharge
pH	-	Portátil digital marca Biocharge

Figura 2. Mapa de localización de los puntos de estudio



Fuente: IGM / INEC

3.5.2.1. Recolección de muestras de agua

Para medir los valores de temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica se obtuvieron muestras in situ en los 9 puntos de muestreo. En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), se utilizaron envases plásticos de 1 litro con agua del estero, tomando en la mitad del cauce y sumergiendo el envase hasta llenar al tope, después rotular las muestras de agua con el nombre del punto, lugar de toma de muestra, la hora en que la tomaron y las coordenadas del punto, para después ser llevadas al laboratorio para realizar del análisis, como se lo especifica en la siguiente tabla.

Tabla 1. Modelo de preservación de la muestra

Parámetro	Envase	Tamaño mínimo de muestra	Preservación	Tiempo máximo de conservación Recomendado
Demanda bioquímica de oxígeno	Plástico	1 litro por muestra, llenada hasta el tope y bien sellada	Refrigerar entre 2°C y 5°C, guardar en la oscuridad	24 horas

3.5.3. Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo con el modelo matemático de Streeter-Phelps

La modelización matemática de la calidad del agua se realizó utilizando las ecuaciones del modelo de Streeter-Phelps, producto de lo cual se obtuvieron perfiles tanto del OD como de la DBO, que describieron el comportamiento de tales variables en cada uno de los tramos del estero El Guayabo. Cabe señalar que, para efectos de la modelización, se utilizaron los valores medios calculados para las variables hidrodinámicas y fisicoquímicas, en la estación seca. El referido modelo matemático se expresa como:

$$Dx = Do(e^{-kat}) + kdLo / ka - kd(e^{-kdt} - e^{-kat})$$

Donde, Dx es el déficit de oxígeno disuelto a cualquier distancia aguas debajo de la corriente, Do es el déficit inicial de oxígeno disuelto, Lo es la demanda bioquímica última de la corriente, kd es la constante de desoxigenación, ka es la constante de reaireación, y t es el tiempo de viaje de la corriente de agua.

Para determinar la DBO última total, L_0 , se utilizó la siguiente ecuación:

$$L = L_0 e^{-kt}$$

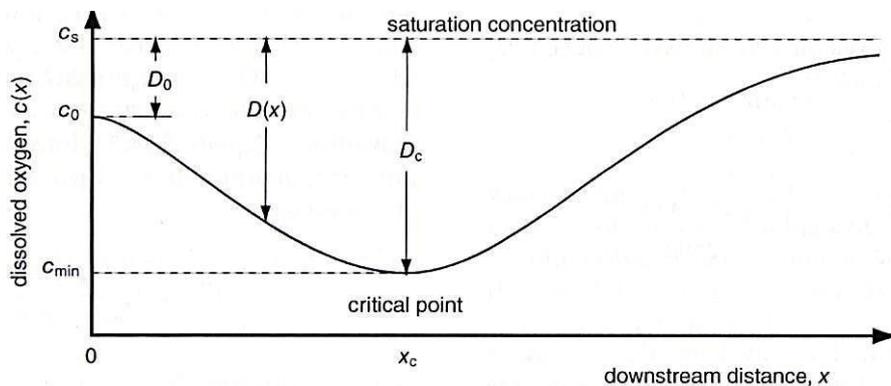
El oxígeno disuelto en cada tramo fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$ODx = OD_{sat} - Dx$$

Donde, OD_{sat} es el oxígeno disuelto de saturación.

De modo que al final se obtuvieron perfiles de oxígeno disuelto para describir la curva sag correspondiente en la figura:

Figura 3. Curva sag de oxígeno disuelto en corrientes de agua superficial



Fuente: Sierra, 2011.

Además, las constantes de desoxigenación fueron estimadas mediante el método de Thomas, y las constantes de reaeración mediante las siguientes fórmulas empíricas, diseñadas por varios autores como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Fórmulas y rangos de profundidad y velocidad utilizados para estimar k_a

Autores	Año	Fórmula	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
O'Connor-Dobbins	1956	$k_a = 3,93 \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	0,30 – 9,14	0,15 – 0,49
Churchill	1962	$k_a = 5,026 \frac{U}{H^{1,67}}$	0,61 – 3,35	0,55 – 1,52
Owens y Gibbs	1964	$k_a = 5,32 \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$	0,12 – 0,73	0,03 – 0,55

Asimismo, se efectuó la calibración del modelo de Streeter-Phelps, ajustando las constantes cinéticas de reaeración, desoxigenación y de remoción total de la DBO, k_a , k_d , y k_r , respectivamente.

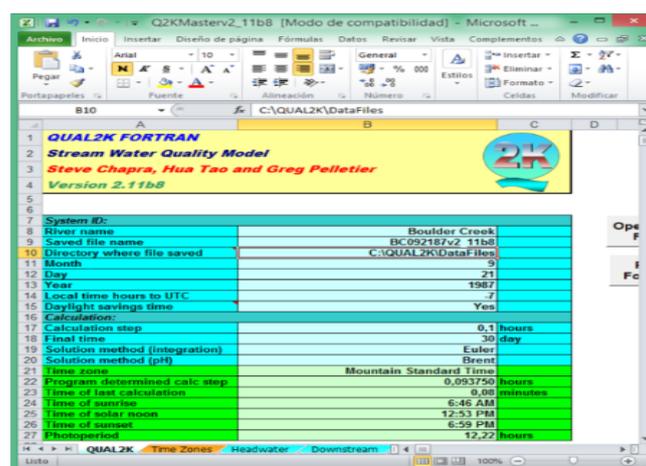
Este proceso de calibración paramétrica se realizó mediante una combinación del método manual, o de ensayo y error, y el método automático, para el cual se empleó la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), que consistió en definir los intervalos o rangos de variación de las constantes cinéticas, suponiendo una distribución de probabilidad uniforme de sus posibles valores, y luego, mediante simulaciones de Monte Carlo, se obtuvieron 100000 posibles combinaciones de los parámetros a calibrar, en función de los cuales se obtienen respuestas de las variables modelizadas. De este modo, y minimizando el estadístico la función objetivo, se obtienen los valores calibrados de las constantes cinéticas.

La validación del modelo se desarrolló siguiendo las directrices de [20]. En el sentido de correr el modelo calibrado para predecir concentraciones de OD y DBO5, manteniendo constantes los parámetros ya ajustados y manipulando las variables externas, principalmente las cargas contaminantes y las características hidrodinámicas del estero.

3.5.4. Simulación de la calidad del agua del estero El Guayabo con programa informático

Finalmente, se utilizó el software de modelización de la calidad del agua superficial QUAL2K, versión 2.12, como se observa en la figura 4, para la simulación computacional del comportamiento del OD y la DBO en el agua del estero.

Figura 4. QUAL2K



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, 2015

3.6. Instrumentos de investigación

3.6.1. Hojas de cálculo para caudales

Se utilizaron hojas estadísticas para el cálculo de los caudales de tres tramos, donde se ingresaron datos que fueron tomados en la fase de campo durante los tres meses de las seis campañas de muestreo, realizando aforos en los nueve puntos de muestreo.

3.6.2. Hoja del modelo de Streeter-Phelps

La hoja de cálculo para la modelización, fue diseñada en base a las ecuaciones de Streeter-Phelps, ingresando los valores y variables requeridas para el funcionamiento del modelo y obtención de los perfiles del OD y la DBO, para la determinación de la calidad del agua del estero.

3.6.3. Hojas de calibración de Statgraphics

Para la calibración de las constantes cinéticas, se utilizó el programa de Statgraphics, el cual es una herramienta de análisis de datos, donde se ingresaron los promedios mensuales de las características hidromorfológicas y parámetros como temperatura, oxígeno disuelto y DBO de los siete puntos de muestreo y mediante la opción de Simulación de Monte Carlos, se realizaron 100000 simulaciones, de las cuales arrojaron datos predichos más exactos o iguales a los medidos en el campo.

3.7. Tratamiento de los datos

3.7.1. Análisis de rendimiento

El análisis de rendimiento de la OD y DBO para determinar la bondad del ajuste de los valores medidos en el campo con los valores pronosticados por el modelo matemático, se efectuó mediante el coeficiente de determinación R^2 , el índice de rendimiento de Nash-Sutcliffe (NSE), y la raíz del error cuadrado medio (RMSE, por sus siglas en inglés) como se puede observar en la tabla 5.

Tabla 3. Medidas de bondad de Ajuste

	R^2
Coeficiente de determinación R^2	$= \left(\frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})(\hat{y}_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - \bar{y})^2}} \right)^2$
Índice de rendimiento de Nash-Sutcliffe	$NSE = 1,0 - \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2}$

3.8. Recursos Materiales Y Equipos

3.8.1. Materiales y equipos

En la tabla 6, los materiales que se utilizaron para el desarrollo de la fase de campo, materiales de oficina, equipos utilizados para las mediciones de los distintos parámetros, software y demás bases de datos que fueron efectuados en la modelización:

Tabla 4. Materiales y equipos utilizados en la investigación

<p>1.- Materiales campo Flexómetro Estacas de madera Botas Guantes de vinilo Botellas de plástico de 1 litro ½ Cronómetro Libreta de apuntes Balde de 4 litros Cinta de papel o transparente</p>	<p>2.- Equipos Medidor portátil Oxi 3310 SET 1 para el OD Instrumentos portátiles digitales marca Biocharge para el pH, temperatura y CE GPS Cámara fotográfica o de celular</p>
<p>3.- Materiales de oficina Computadora Útiles de oficina Pendrive</p>	<p>4.- Software ArcGis 10.1 Statgraphics Qual2k</p>

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

4.1.1. Características hidromorfológicas del estero El Guayabo

Las características hidromorfológicas del estero el Guayabo son: caudal, velocidad de la corriente, profundidad y ancho del cauce, datos que fueron tomados en la fase de campo de la investigación, y los promedios analizados por meses para así interpretar los datos.

4.1.1.1. Caudal

Los datos provenientes del caudal fueron tomados en la fase de campo mediante aforos a lo largo de tres meses como febrero, marzo y abril, tiempo que corresponde a la época lluviosa, los muestreos se realizaron durante 6 campañas donde analizaron tres tramos con sus respectivas descargas (3) y un tributario.

Los valores de la tabla 7 muestran la variación del caudal en la corriente principal, por el aporte de la descarga y los caudales tributarios durante los meses de febrero hasta abril. El tramo que registró en cada campaña el mayor caudal fue tramo tres, registrando 4642 l/s en la campaña más caudalosa realizada el 15 de marzo, mientras que el caudal de menor valor se presentó el 24 de abril, es decir la sexta campaña.

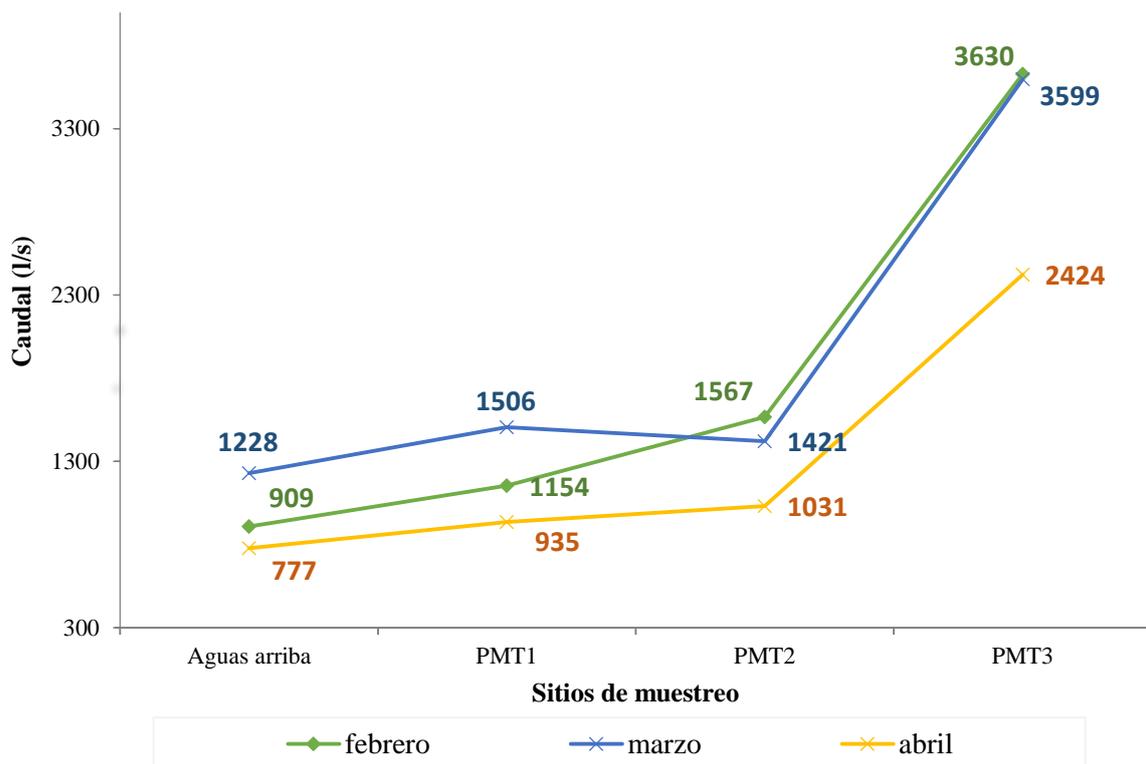
Tabla 5. Caudales en l/s del estero El Guayabo en la estación lluviosa

Punto	Caudal (l/s)					
	15-feb-19	28-feb-19	15-mar-19	29-mar-19	10-abr-19	24-abr-19
Aguas arriba	1034	783	1258	1197	1217	336
Descarga 1	61	37	68	28	21	16
Descarga 2	55	85	61	23	25	38
1er PMT1	1194	1114	1537	1474	1295	575
2do PMT1	1032	1391	1775	1459	1217	566
Tributario	110	107	56	89	81	60
PMT2	1485	1648	2492	996	1444	618
Descarga 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PMT3	3713	3546	4642	2556	3956	893

NOTA: Primer punto de muestreo del tramo 1 (1er PMT1), segundo punto de muestreo del tramo 1 (2do PMT1), punto de muestreo del tramo 2 (PMT2), punto de muestreo del tramo 3 (PMT3).

En el gráfico 1 se observa que el mes de marzo presenta los promedios de caudales mayores en referencia a los otros meses, el promedio de aguas arriba es de 1228 l/s, 1506 l/s en el PMT1, 1421 l/s en el PMT2 y 3599 l/s en el PMT3. Los caudales promediados mínimos se presentaron en el mes de abril y fueron; 707 l/s en aguas arriba, 935 l/s en el PMT1, 1031 l/s en el PMT2, y 2424 l/s en el PMT3 respectivamente, esto fue en el mes de febrero.

Gráfico 1. Variación del caudal promedio de la corriente principal del estero El Guayabo



4.1.1.2. Velocidad de la corriente

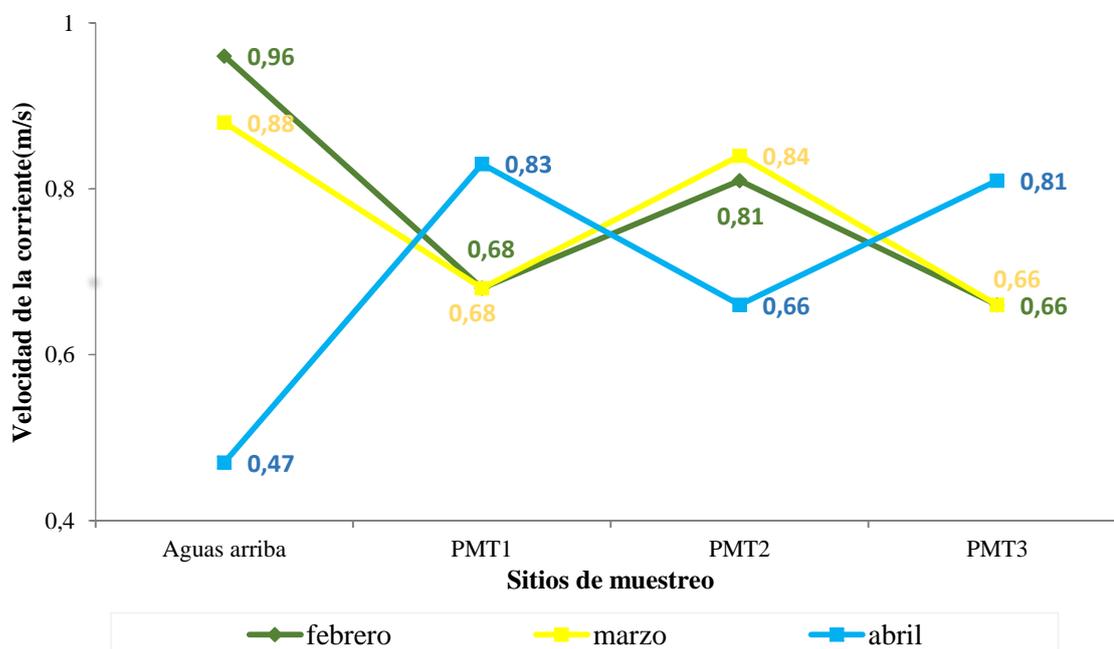
La tabla 8 muestra las velocidades de la corriente donde se puede notar que la corriente más rápida de la época lluviosa registrada durante las seis campañas es la del 15 de febrero con un valor de 0,96 l/s; mientras que el punto de muestro de corriente mas lenta se presentó el 24 de abril con una velocidad de 0,35 l/s en el punto de muestreo aguas arriba.

Tabla 6. Velocidad de la corriente principal en m/s del estero El Guayabo

Punto	Velocidad m/s					
	15-feb-19	28-feb-19	15-mar-19	29-mar-19	10-abr-19	24-abr-19
Aguas arriba	0,96	0,79	0,90	0,95	0,59	0,35
PMT1	0,68	0,73	0,67	0,65	0,80	0,86
PMT2	0,81	0,83	0,86	0,85	0,78	0,75
PMT3	0,66	0,67	0,68	0,64	0,93	0,68

En el gráfico 2 podemos apreciar los valores promedio de las velocidades de cada tramo, en este caso la velocidad promedio más baja se dio en el mes de abril, con valores; 0,47 m/s en aguas arriba, 0,83 m/s en el PMT1, 0,76 m/s en el PMT2 y 0,81 m/s en el PMT3. Así mismo verificamos que en el mes de febrero se dieron las velocidades más altas dando los siguientes valores en los 3 tramos; 0,96 m/s, 0,68 m/s, 0,81 m/s respectivamente.

Gráfico 2. Velocidad promedio de la corriente principal del estero El Guayabo, en m/s



4.1.1.3. Profundidad del cauce

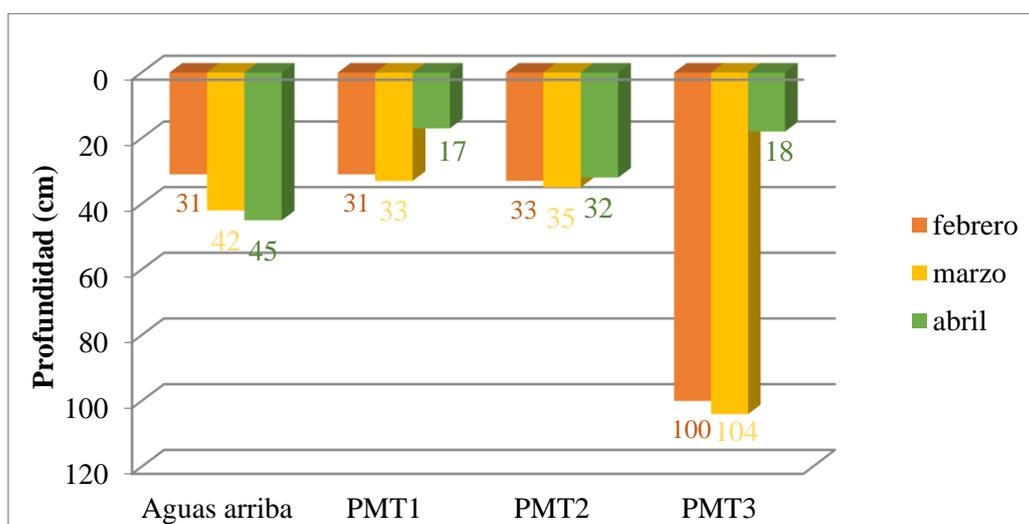
En la tabla 9 se presentan las profundidades del cauce del estero El Guayabo, en los meses de Febrero, Marzo y Abril durante 6 campañas. La mayor profundidad se registra en el el PTM3 para todas las campañas, siendo la mayor profundidad la del 29 de marzo con total de 119 cm, el punto de muestreo de menor profundidad es del PTM3 y el PMT1 con un valor de 13 cm, en la campaña llevada a cabo el 10 y 24 de abril respectivamente.

Tabla 7. Profundidad de la corriente principal del estero El Guayabo, en cm

Punto	Profundidad cm					
	15-feb-19	28-feb-19	15-mar-19	29-mar-19	10-abr-19	24-abr-19
Aguas arriba	31	31	55	39	52	38
PMT1	31	31	26	41	20	13
PMT2	33	39	33	34	37	28
PMT3	100	101	94	119	13	23

El gráfico 3 evidenciamos las profundidades promedio de mayor y menor consideración, en este gráfico se registra que la mayor profundidad promedio es en el mes de marzo en el PMT3 con una profundidad de 104 cm, mientras que en el PMT1 se registró la menor profundidad promedio en el mes de abril con un valor de profundidad de 17 cm.

Gráfico 3. Variación promedio de la profundidad en la corriente principal del estero El Guayabo



4.1.2. Caracterización de la calidad del agua del estero El Guayabo

4.1.2.1. Oxígeno disuelto

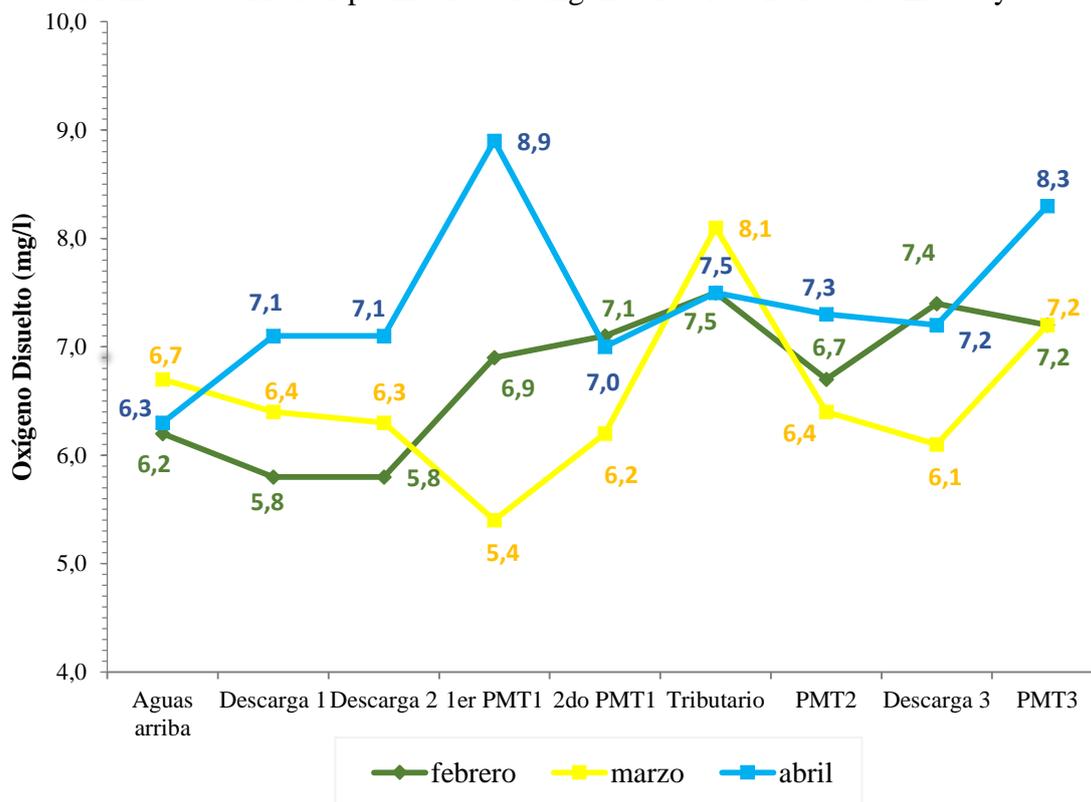
En la tabla 10 se muestran las concentraciones de oxígeno disuelto medidos en cada uno de los puntos de muestreo en el estero El Guayabo, obteniendo como valor más bajo de oxígeno disuelto 4,4 mg/l el 15 de febrero en aguas arriba, mientras que 10,2 mg/l fue el valor más alto, habiéndose tomado en el tributario el 10 de abril.

Tabla 8. Niveles de oxígeno disuelto en el estero El Guayabo, en mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Des-carga 1	Des-carga 2	1er PMT1	2do PMT1	Tribu-tario	PMT2	Des-carga 3	PMT3
15-feb-19	4,4	6,1	5,4	6,3	7,1	6,9	6,2	7,2	7
28-feb-19	7,9	5,5	6,1	7,4	7,1	8,1	7,2	7,5	7,4
15-mar-19	6,2	5,1	6,5	5,4	6,20	7,8	5,7	6,6	7,5
29-mar-19	7,1	7,6	6,1	5,4	6,2	8,3	7,1	5,6	6,8
10-abr-19	6,5	9,7	7,6	9,5	8,3	10,2	9,7	7,2	9,3
24-abr-19	6	4,5	6,5	8,2	5,7	4,7	4,9	7,1	7,3

El gráfico 4 nos permite observar la variación promedio de oxígeno disuelto, tomando en cuenta los niveles promedios más altos y bajos en cada mes de estudio, los cuales nos dieron como resultado que en el mes de abril se obtuvo un promedio de 8,9 mg/l para el 1er PMT1, siendo este valor el más alto. Cabe recalcar que el mes que presento valores mas bajos con promedios de 5,4 mg/l en el 1er PMT1 dado en el mes de marzo. Los valores se encuentran dentro del estándar ambiental (5 mg/l, establecido en el anexo 1, del libro VI De La Calidad Ambiental, del TULSMA)

Gráfico 4. Variación promedio del oxígeno disuelto en el estero El Guayabo



4.1.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

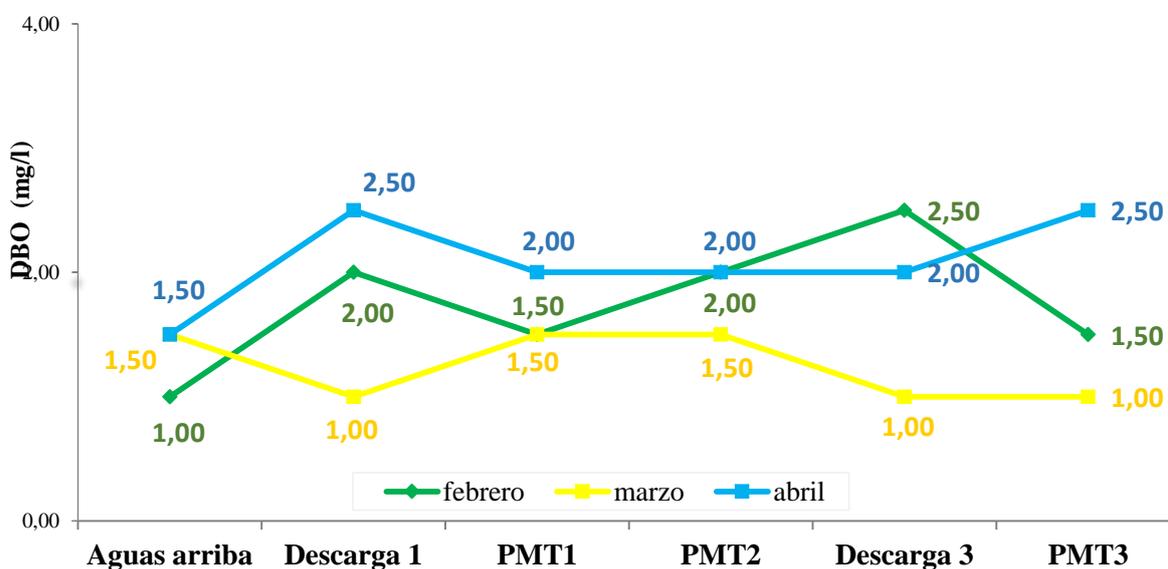
La tabla 11 presenta los valores del análisis de la DBO en cada punto de muestreo. Las concentraciones más altas de la DBO se determinaron en las Descarga 1, PMT1, PMT2, Descarga 3 y PMT3 con un valor de 3 mg/l, los valores mas bajos fueron registrados en los puntos de muestreo aguas arriba, descarga 1, PMT1, PMT2, Descarga 3 y PMT3 con valores de 1 mg/l. Cabe recalcar que la Descarga 3 procedente de una industria se encuentra dentro del rango permitido por la normativa vigente, el Registro Oficial 061 Reforma del libro VI, Anexo 1, tabla 10, donde especifica que los límites de DBO₅ son 100mg/l, para descargas industriales a cuerpos de agua dulce.

Tabla 9. DBO₅ en el estero El Guayabo, en mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Des-carga 1	PMT1	PMT2	Des-carga3	PMT3
15-feb-19	1	2	1	3	2	1
28-feb-19	1	2	2	1	3	2
15-mar-19	2	1	2	2	1	1
29-mar-19	1	1	1	1	1	1
10-abr-19	2	3	3	3	2	3
24-abr-19	1	2	1	1	2	2

En el gráfico 5 se muestra que las concentraciones más altas de la DBO se registraron en el mes de febrero y abril, con un valor de 2,5 mg/l, mientras que los valores más bajos se registraron en el punto de muestreo Aguas Arriba, Descarga 1, Descarga 3 y PMT3 con promedios de 1 mg/l en el mes de febrero y marzo.

Gráfico 5. Variación promedio de la DBO₅ en el estero El Guayabo



4.1.2.3. pH

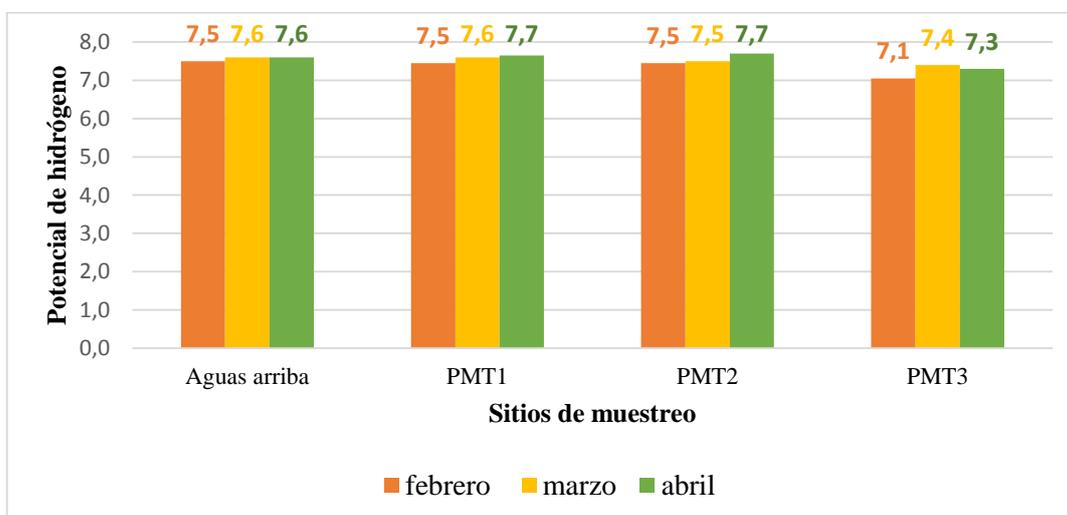
Las mediciones de pH, correspondiente a los 9 puntos estudiados se muestran en la tabla 12, comprobando que el estero posee un potencial de hidrógeno dentro de un rango de 6,7 a 7,8 siendo un pH neutro parcialmente alcalino, establecido en la Tabla 2 de Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios, del libro VI, Anexo 1 del TULSMA. Los mayores valores se observan en punto de muestreo Aguas Arriba, Descarga 2, 1er PMT1 y PMT2 con un pH de 7,8, mientras que los valores más bajos se presentan en la Descarga 2, con un pH de 6,7 en las campañas del 15 de febrero y 10 de abril.

Tabla 10. Valores de pH en el estero El Guayabo

FECHA	Aguas Arriba	Des-carga 1	Des-carga 2	1er PMT1	2do PMT1	Tribu-tario	PMT2	Des-carga3	PMT3
15-feb-19	7,4	7,7	6,7	7,4	7,6	7,2	7,3	7,4	7,0
28-feb-19	7,6	7,1	7,0	7,5	7,3	7,0	7,6	7,0	7,1
15-mar-19	7,5	6,9	6,9	7,5	7,5	7,1	7,3	7,3	7,4
29-mar-19	7,6	7,2	6,9	7,7	7,5	7,4	7,7	7,5	7,3
10-abr-19	7,4	7,0	6,7	7,5	7,6	7,5	7,6	7,4	7,6
24-abr-19	7,8	7,5	7,8	7,8	7,8	7,6	7,7	6,9	7,0

En el gráfico 6 se presentan los valores promedio de las variaciones del potencial de hidrógeno en los respectivos meses para la corriente principal del estero, como se observa, los niveles de pH en todos los meses se encuentran rangos similares, siendo 7,7 el valor más alto en el mes de abril y 7,1 el valor mas bajo en febrero.

Gráfico 6. Variación promedio del pH en la corriente principal del estero El Guayabo



4.1.2.4. Conductividad eléctrica

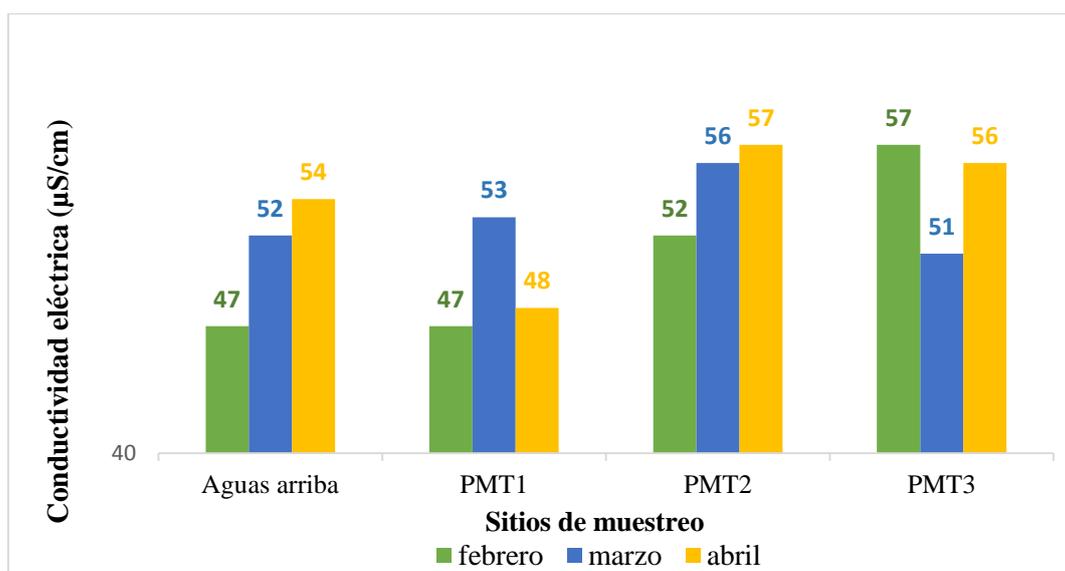
En la tabla 13 se observan las mediciones en relación a CE (conductividad eléctrica), donde los mayores valores se dan en la descarga 3 llegando a un valor de 097 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la quinta campaña realizada en el mes de abril. Mientras que el valor más bajo fue 041 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este valor se dio en la descarga 2, en la quinta campaña realizada.

Tabla 11. Conductividad eléctrica en el estero El Guayabo, en $\mu\text{S}/\text{cm}$

FECHA	Aguas Arriba	Des-carga1	Des-carga2	1er PMT1	2do PMT1	Tribu-tario	PMT2	Des-carga3	PMT3
15-feb-19	052	044	046	052	050	043	052	082	050
28-feb-19	042	046	044	041	055	043	054	071	043
15-mar-19	051	044	044	052	053	041	059	087	053
29-mar-19	052	045	044	054	053	043	056	094	049
10-abr-19	052	048	041	050	051	045	052	097	056
24-abr-19	055	051	054	045	056	058	062	068	060

En el gráfico 7 se observa que los valores promedio más altos de conductividad eléctrica se dan en el PMT2 y PMT3, en ambos casos su valor fue de 57 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores promedio menores de conductividad eléctrica se registraron en el mes de febrero, obteniendo valores de 047 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en aguas arriba y PMT1.

Gráfico 7. Variación promedio de la conductividad eléctrica en la corriente principal del estero El Guayabo



4.1.3. Modelización de la calidad del agua con el modelo de Streeter-Phelps

4.1.3.1. Constantes cinéticas

4.1.3.1.1. Constante de reaireación (k_a)

Se llevó a cabo el cálculo de la constante de reaireación (k_a) por medio de la aplicación de la ecuación propuesta por Langbeing y Durum (1967). También se aplicaron las ecuaciones empíricas de Owens y Gibbs (1964), O'Connor y Dobbins (1958) y Churchill et al., (1962). En la tabla 14 se detallan los valores de las constantes resultantes de la calibración y por las ecuaciones empíricas:

Tabla 12. Valores calculados y calibrados de la constante de reaireación (k_a)

Meses	PMT1		PMT2		PMT3	
	<i>Ka calculada</i>	<i>Ka calibrada</i>	<i>Ka calculada</i>	<i>Ka calibrada</i>	<i>Ka calculada</i>	<i>Ka calibrada</i>
<i>febrero</i>	20,425	99,951	13,565	0,24	2,187	0,11
<i>marzo</i>	18,885	0,126	13,000	12,488	2,073	15,991
<i>abril</i>	54,609	249,478	13,286	0,411	26,108	61,693

Se puede observar en la tabla 14 que el valor más alto de la constante de reaireación calculada con la ecuación de Lanbeing y Durum, se registra el mes de abril en el PMT1, mientras que en el mes de febrero y marzo los valores no presentan mayor diferencia. Las constantes calibradas en el PMT1 son mayores que las constantes calculadas durante los tres meses. En el PMT2 se presenta un comportamiento muy equitativo en sus valores, mientras que en el PMT3 las constantes calibradas son mayores a comparación con las calculadas.

4.1.3.1.2. Constante de desoxigenación (k_d)

Los valores calculados de la constante de desoxigenación k_d se expresaron en términos de profundidad media de los tramos (Hydroscience, 1971). En la tabla 15 se puede observar los valores calculados por la fórmula empírica Hydroscience y los calibrados mediante Statgraphic:

Tabla 13. Valores calculados y calibrados de la constante de desoxigenación (k_d)

Meses	PMT1		PMT2		PMT3	
	<i>Kd calculada</i>	<i>Kd calibrada</i>	<i>Kd calculada</i>	<i>Kd calibrada</i>	<i>Kd calculada</i>	<i>Kd calibrada</i>
<i>febrero</i>	1,094	0,041	1,050	0,982	0,649	0,97
<i>marzo</i>	1,075	3,972	1,042	0,916	0,650	0,112
<i>Abril</i>	1,380	0,385	1,045	0,979	1,341	0,193

Como se observa, los valores calculados y calibrados más altos de oxidación de materia orgánica (k_d) se dan en el PMT1 y PMT2, mientras que el PMT3 presenta valores menores, tanto para la k_d calculada como la calibrada.

4.1.3.1.3. Constante de remoción total de la DBO (k_r)

Los valores calculados para la constante de remoción total de la DBO, fueron obtenidas por las ecuaciones propuestas por Sierra, para ser utilizadas en el ajuste inicial del modelo de Streeter-Phelps. En la tabla 16, se puede observar los valores calculados y calibrados de k_r :

Tabla 14. Valores calculados y calibrados de constante de remoción total de DBO k_r

Meses	PMT1		PMT2		PMT3	
	<i>Kr calculada</i>	<i>Kr calibrada</i>	<i>Kr calculada</i>	<i>Kr calibrada</i>	<i>Kr calculada</i>	<i>Kr calibrada</i>
<i>febrero</i>	1,117	0,991	1,071	7,98	0,662	7,33
<i>marzo</i>	1,117	4,934	1,071	1,042	0,662	0,651
<i>Abril</i>	1,117	7,430	1,071	1,977	0,662	0,500

En la tabla 16 se observa que, en los PMT1, PMT2 y PMT3 se presentan valores calculados mayores en relación a los calibrados, en el PMT1 Y PMT2 para los tres meses se obtuvo un valor similar en k_r calculada.

4.1.3.2. Comportamiento del Oxígeno Disuelto y la Demanda Bioquímica de Oxígeno

A continuación, se detalla la variación y comportamiento del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno durante los tres meses de muestreo como febrero, marzo y abril durante las 6 campañas en todas las secciones como aguas arriba, tributarios y puntos de muestreo. También, se presentan las condiciones iniciales de cada tramo para los meses considerados, cálculos que fueron fundamentales para la modelización de la DBO y el OD. Cabe recalcar, que en la selección de los valores de entrada para el modelo de Streeter-Phelps, se escogieron datos promedios, máximos o mínimos, de acuerdo a la necesidad de obtener un ajuste eficiente del modelo al momento de calibrar.

4.1.3.2.1. Comportamiento del OD y la DBO en el mes de febrero

En la tabla 17, se muestran los valores de entrada para el mes de febrero, los cuales fueron ingresados al modelo de Streeter-Phelps para la modelización del OD y la DBO.

Tabla 15. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de febrero

	Q (m ³ /s)	DBO última (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Aguas arriba	0,9	2,4	6,2	28,5
Descarga 1 y 2	0,119	3,6	5,8	31,4
Tributario	0,109	2,4	5,8	25,6
Descarga 3	0,001	2,4	7,2	27,2

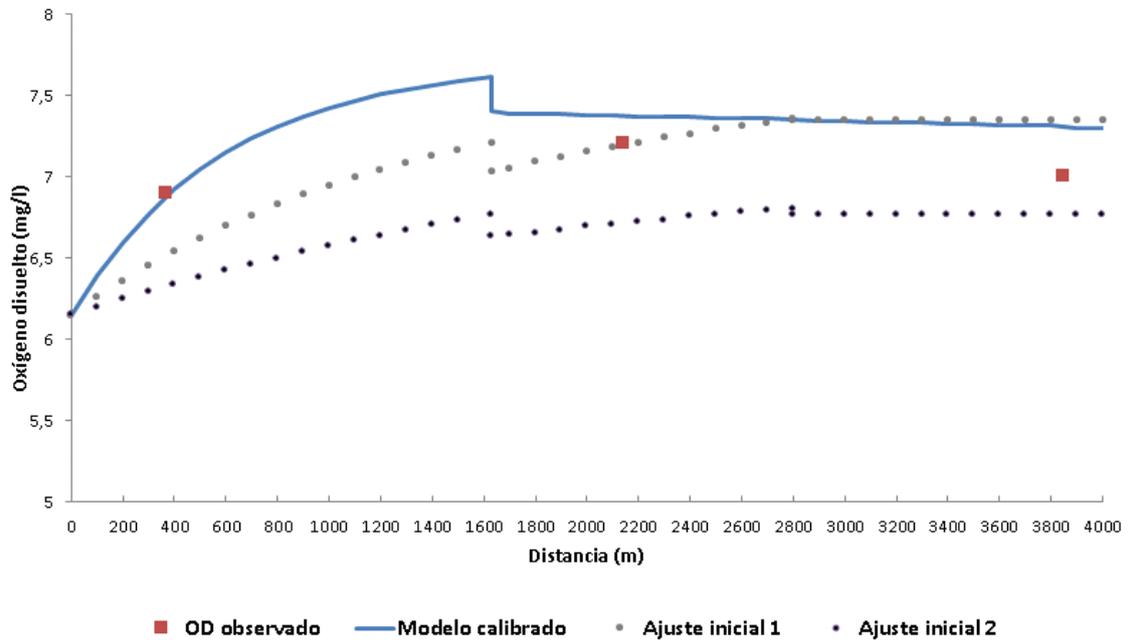
En la tabla 18 se observan las condiciones iniciales calculadas para cada tramo en el mes de febrero, los cuales fueron empleados en el modelo matemático de Streeter-Phelps, para finalmente obtener los perfiles de oxígeno disuelto y de la demanda bioquímica de oxígeno, tanto del ajuste inicial como del modelo calibrado.

Tabla 16. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de febrero

Tramo	L _o (mg/l)	OD _o (mg/l)	T _o (°C)	OD _{SAT} (mg/l)	D _o (mg/l)
1	2,54	6,15	28,84	7,71	1,56
2	2,73	7,44	28,53	7,75	0,31
3	2,39	7,35	28,53	7,75	0,40

El gráfico 8 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de febrero, incluyendo el valor de saturación del oxígeno:

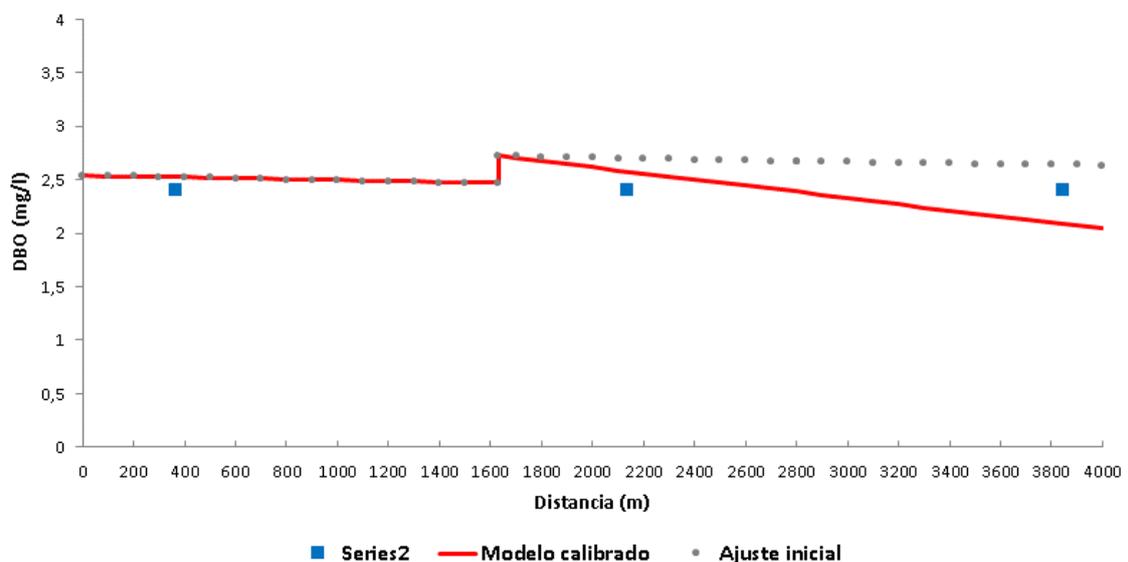
Gráfico 8. Perfil del OD del mes de febrero



La curva del gráfico 8 destaca la leve variación del oxígeno disuelto a lo largo de la corriente del estero El Guayabo hasta su desembocadura en el río Quevedo, con valores oscilando muy cercanamente a los 8 mg/l.

El gráfico 9 representa la variación de la DBO a lo largo de la corriente del estero El Guayabo durante el mes de febrero:

Gráfico 9. Perfil de la DBO del mes de febrero



La variación de la DBO representada en la gráfica 9, en concordancia con el perfil del oxígeno disuelto, hace evidente un mayor impacto de la carga orgánica, sin embargo, la variación es mínima en torno a los 3 mg/l, lo cual se explica en términos de una gran dilución de la carga orgánica por las precipitaciones características de la estación lluviosa en la ciudad de Quevedo.

La tabla 19 contiene los resultados del cálculo del error relativo entre los valores observados en campo y los predichos por el modelo calibrado, en relación al OD y DBO, donde el error mayor fue de 4,01% en el tramo 2, porcentaje que está dentro del límite permitido que es 10 %

Tabla 17. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno del mes de febrero %

	PMT1	PMT2	PMT3
OD	0,998	0,002	0,001
DBO	0,942	4,012	1,231

4.1.3.2.2. Comportamiento del OD y la DBO en el mes de marzo

En la tabla 20 se presentan los valores de entrada empleados en la modelización del OD y la DBO con Streeter-Phelps, para el mes de marzo.

Tabla 18. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de marzo

	Q (m³/s)	DBO última (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Aguas arriba	1,228	2,4	6,2	29,2
Descarga 1 y 2	0,09	6,0	5,8	26,9
Tributario	0,072	2,4	5,8	26,8
Descarga 3	0,002	12,0	7,2	27,4

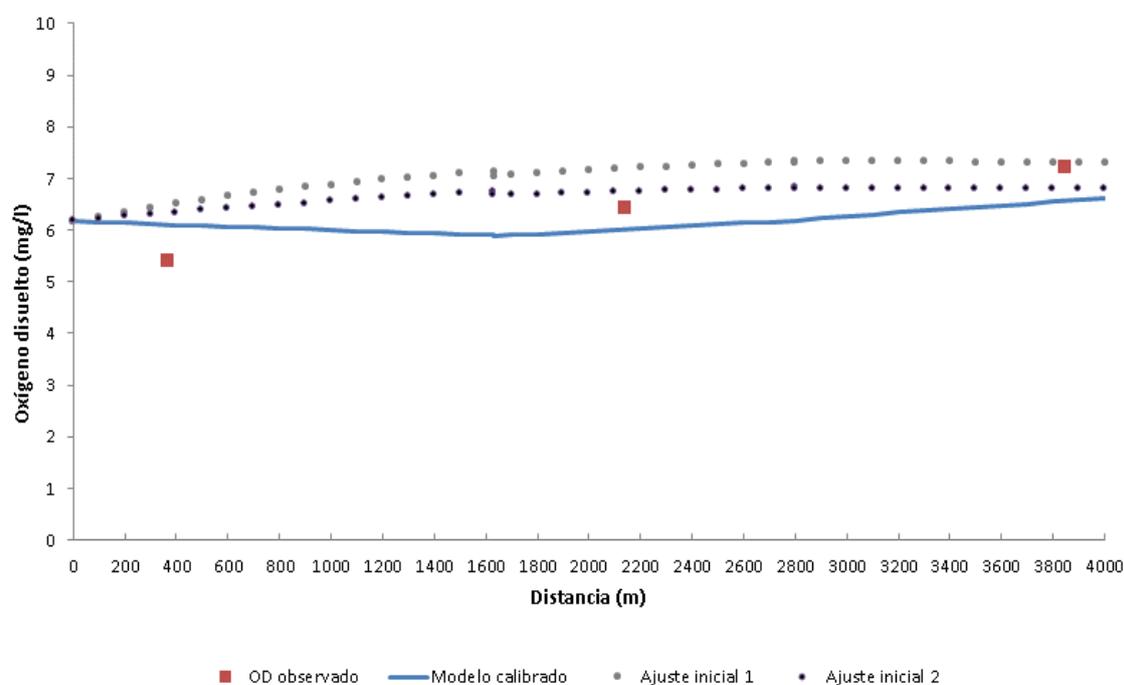
En la tabla 21 se puede observar las condiciones iniciales determinadas para el mes de marzo en los tramos segmentados, que formaron parte en la aplicación del modelo matemático y finalmente obtener los perfiles del OD y de la DBO.

Tabla 19. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de marzo

Tramo	L_0 (mg/l)	OD_0 (mg/l)	T_0 (°C)	OD_{SAT} (mg/l)	D_0 (mg/l)
1	2,65	6,17	29,04	7,69	1,52
2	2,44	5,90	28,92	7,70	1,80
3	2,41	6,18	28,92	7,70	1,52

El gráfico 10 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de marzo, incluyendo el valor de saturación del oxígeno:

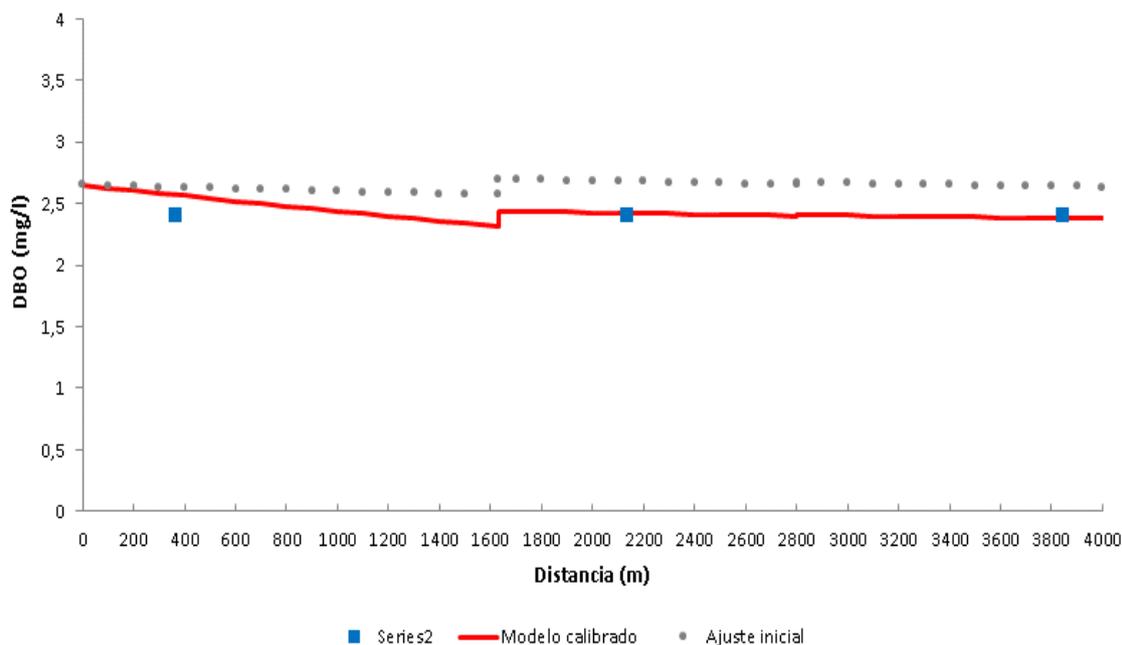
Gráfico 10. Perfil del OD del mes de marzo



En el gráfico 10 se observa una variación del oxígeno disuelto a lo largo de los tres tramos del estero El Guayabo hasta su desembocadura en el río Quevedo, con valores oscilando a los 7 mg/l, valor que se acerca a los niveles de saturación.

El gráfico 11 representa la variación de la DBO a lo largo de la corriente del estero El Guayabo durante el mes de marzo:

Gráfico 11. Perfil de la DBO del mes de marzo



La gráfica 11 en concordancia con el perfil del oxígeno disuelto, hace evidente un mayor impacto de la carga orgánica, sin embargo, la variación es mínima en torno a los 4 mg/l, valores muy similares a los resultados del mes de febrero.

En la tabla 22 se observan los resultados del cálculo del error relativo entre los valores observados en campo y los predichos por el modelo calibrado, tanto para el OD como para la DBO, obteniendo valores menores al 10% que es el límite permitido, donde los errores más altos fue en el OD para el PMT1 y PMT2 siendo 6,28% y 4,16 % respectivamente.

Tabla 20. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno del mes de marzo, %

	PMT1	PMT2	PMT3
OD	6,284	4,167	2,127
DBO	2,283	3,732	3,716

4.1.3.2.3. Comportamiento del OD y la DBO en el mes de abril

En la tabla 23 se observan los valores de entrada empleados en la modelización del OD y la DBO con Streeter-Phelps, para el mes de abril.

Tabla 21. Características de la cabecera, descarga y tributario en el mes de abril

	Q (m ³ /s)	DBO última (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Aguas arriba	0,777	2,4	6,5	28,3
Descarga 1 y 2	0,052	6,0	6,0	26,9
Tributario	0,071	2,4	7,5	27,2
Descarga 3	0,002	12,0	7,2	27,8

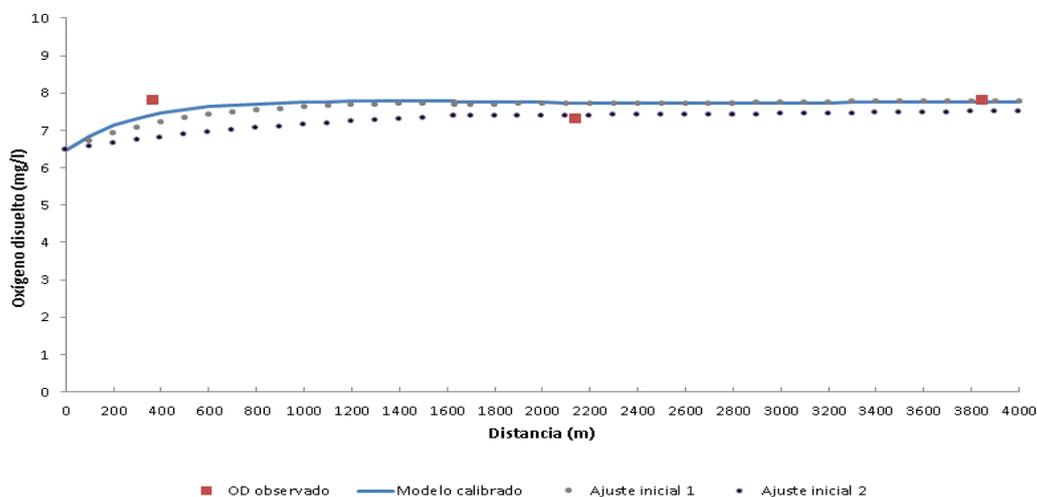
En la tabla 24 se observan las condiciones iniciales para cada tramo en el mes de abril, que sirvieron para la aplicación del modelo matemático y obtener los perfiles de oxígeno disuelto y de la demanda bioquímica de oxígeno, tanto para el ajuste inicial como del modelo calibrado.

Tabla 22. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de abril

Tramo	L _o (mg/l)	OD ₀ (mg/l)	T _o (°C)	OD _{SAT} (mg/l)	D _o (mg/l)
1	2,63	6,47	28,21	7,80	1,33
2	2,43	7,77	28,13	7,81	0,04
3	2,37	7,72	28,13	7,81	0,09

El gráfico 12 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de abril, incluyendo el valor de saturación del oxígeno:

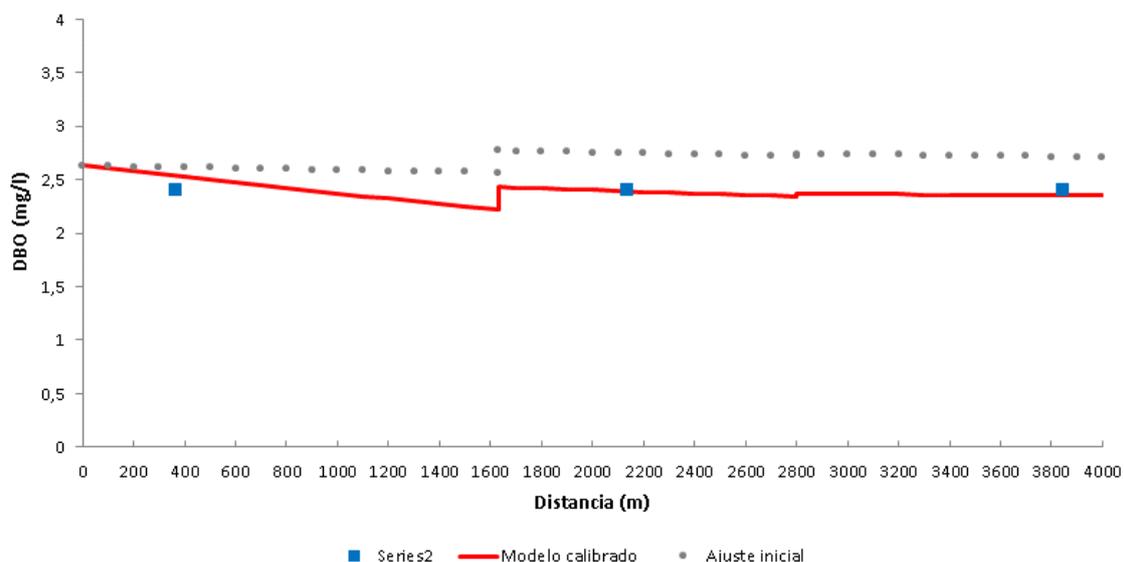
Gráfico 12. Perfil del OD del mes de abril



Se observa en el gráfico 12, el perfil del OD para el mes de abril, donde las concentraciones en el PMT1 tienden a bajar a medida que llega al final del mismo, pero de una manera no muy significativa, con valores oscilando muy cercanamente a los 8 mg/l, valor que se acerca a los niveles de saturación. Además, se observa que, al inicio del PMT3 se presenta un descenso de los niveles de oxígeno disuelto mayor que al inicio del PMT2.

El gráfico 13 representa la variación de la DBO a lo largo de la corriente del estero El Guayabo durante el mes de marzo:

Gráfico 13. Perfil de la DBO del mes de abril



En la tabla 25 se observan los resultados del cálculo del error relativo entre los valores observados en campo y los predichos por el modelo calibrado, tanto para el OD como para la DBO, obteniendo valores menores al 10% que es el límite permitido, donde los errores más altos fue en el OD para el PMT1 y PMT2 siendo 2,29% y 8,37 % respectivamente.

Tabla 23. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica del mes de abril, en %

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
OD	2,298	2,157	8,378
DBO	0,021	0,394	0,514

4.1.3.2.4. Análisis de rendimiento

En la tabla 26 se muestra el análisis de rendimiento del modelo calibrado de Streeter-Phelps durante los 3 meses de estudio como febrero, marzo y abril. La relación que existe para el parámetro OD entre los valores observados en la corriente y los valores predichos por el modelo, son valores iguales a 1,0 tanto en el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe como en el coeficiente de determinación lo que significa que tuvieron un ajuste óptimo.

Tabla 24. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto al OD

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	6,90	5,40	7,80	6,70	0,782	0,998
	Predicción	6,88	6,11	7,43	6,81		
T2	Medición	7,20	6,40	7,30	6,97	-1,763	0,637
	Predicción	6,33	5,74	7,69	6,59		
T3	Medición	7,00	7,20	7,80	7,33	0,656	0,733
	Predicción	7,34	7,14	7,80	7,43		
Media	Medición	7,03	6,33	7,63			
	Predicción	6,85	6,33	7,64			
Error	NSE	-2,234	0,058	0,711			
	R2	0,480	0,440	0,052			

Por otro lado, en la tabla 27 se muestra el rendimiento del modelo para la DBO que al igual que el OD también presenta un valor óptimo iguales a 1,0 en todos los tramos.

Tabla 25. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto a la DBO

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,973	0,984
	Predicción	2,52	2,57	2,52	2,54		
T2	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,835	0,999
	Predicción	3,77	3,73	2,46	3,32		
T3	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,478	0,907
	Predicción	2,38	2,30	2,31	2,33		
Media	Medición	2,00	2,00	2,00			
	Predicción	2,89	2,87	2,43			
Error	NSE	0,954	0,188	0,993			
	R2	0,818	0,013	0,996			

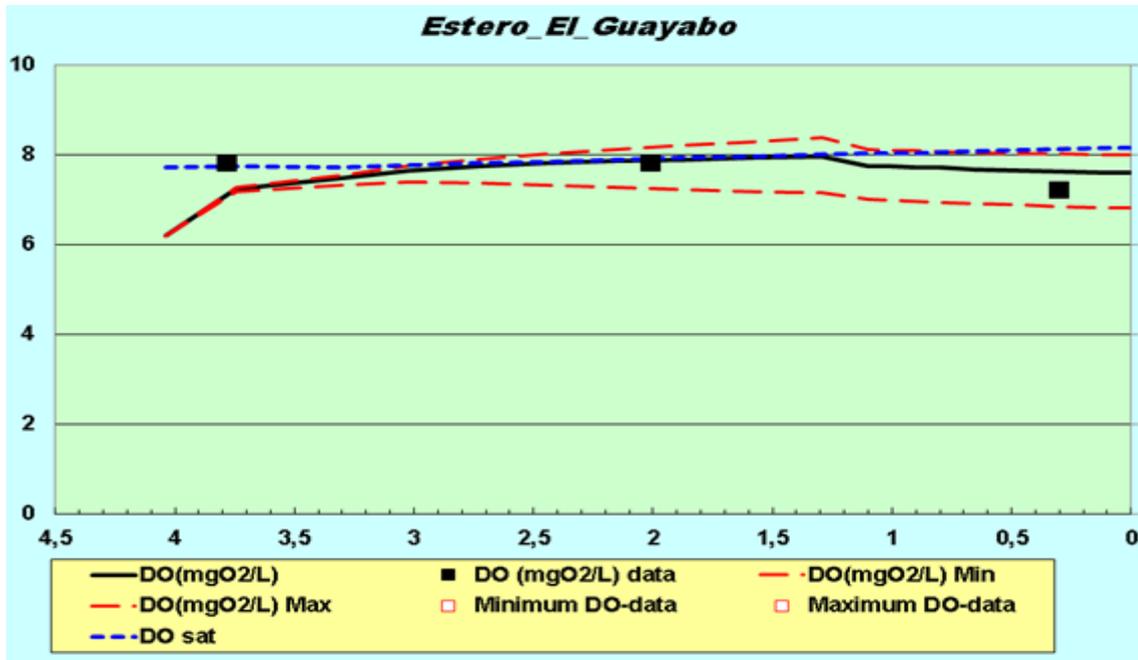
4.1.4. Simulación de la calidad del agua del estero El Guayabo con QUAL2K

Para la simulación de la calidad del agua del estero El Guayabo mediante el uso del software QUAL2K, se utilizaron los valores obtenidos de las constantes cinéticas de reaireación k_a desoxigenación k_d y de remoción total de la DBO k_r , mediante la calibración del modelo matemático de Streeter-Phelps, también, la información de las características hidromorfológicas y geométricas del estero, que fueron aplicados anteriormente en el modelo, para finalmente hacer correr el programa y obtener los gráficos que muestran los puntos respectivos (3 puntos) con sus valores observados en la fase de campo para cada tramo y la curva de variación predicha por el programa.

4.1.4.1. Simulación del OD y la DBO en el mes de febrero

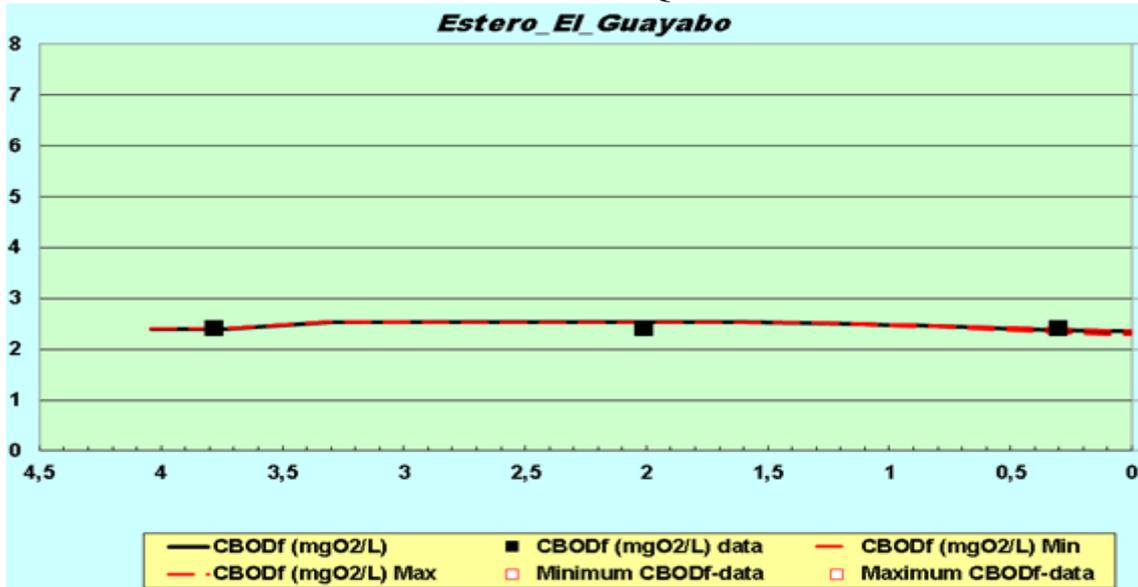
La simulación de la calidad del agua en términos del OD y la DBO a través del programa QUAL2K para el mes de febrero, se muestra en los gráficos 14 y 15, respectivamente:

Gráfico 14. Simulación del OD con QUAL2K del mes de febrero



En el gráfico 14 se puede observar la simulación en relación al OD con el modelo QUAL2K para el mes de febrero, donde se observa que el ajuste es óptimo para todos los tramos, debido al acercamiento de los valores observados en campo y los predichos por el programa.

Gráfico 15. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de febrero

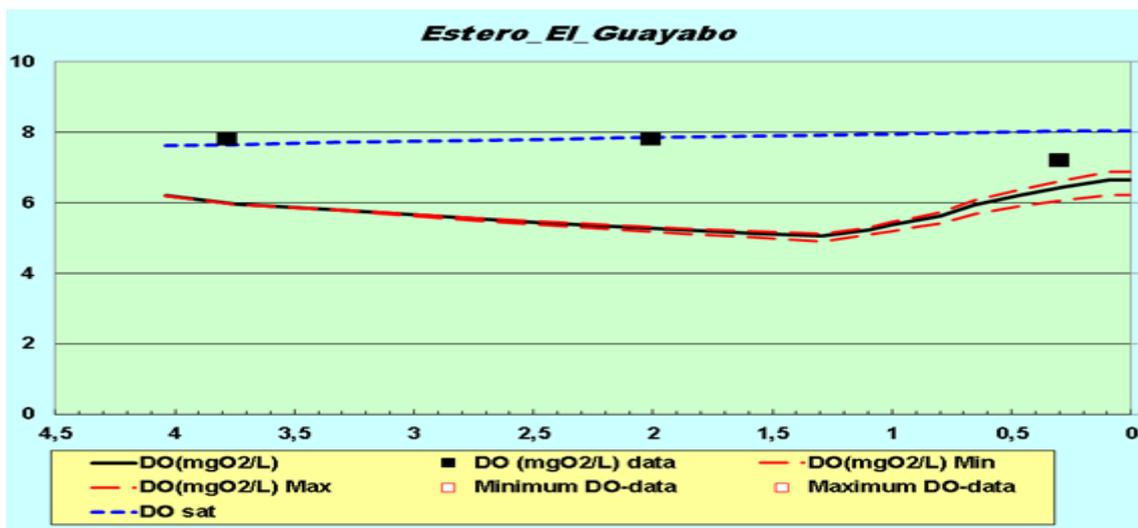


En relación con la simulación de la DBO en el mes de febrero con QUAL2K, mostrado en el gráfico 15, se observa que presenta un buen ajuste de los datos observados en campo con los predichos por el programa, en todos los tramos.

4.1.4.2. Simulación del OD y la DBO en el mes de marzo

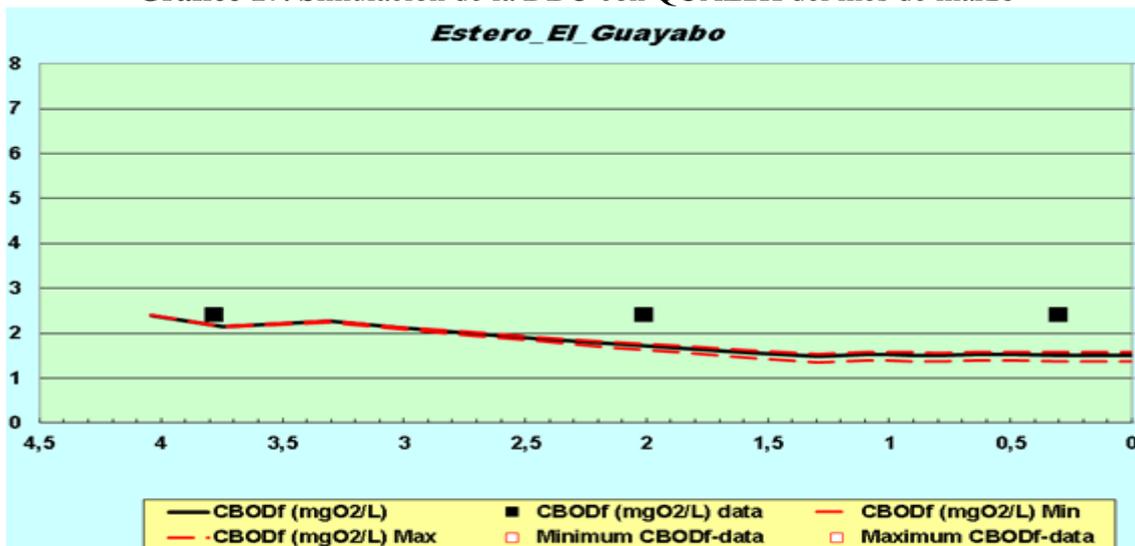
La simulación del OD y de la DBO con QUAL2K para el mes de marzo, se observa en los gráficos 16 y 17, respectivamente:

Gráfico 16. Simulación del OD con QUAL2K del mes de marzo



La simulación del OD realizado por QUAL2K para el mes de marzo se observa en el gráfico 16, en el cual se presenta un ajuste óptimo a lo largo de toda la corriente y sus valores no están muy alejados al valor de saturación de OD.

Gráfico 17. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de marzo

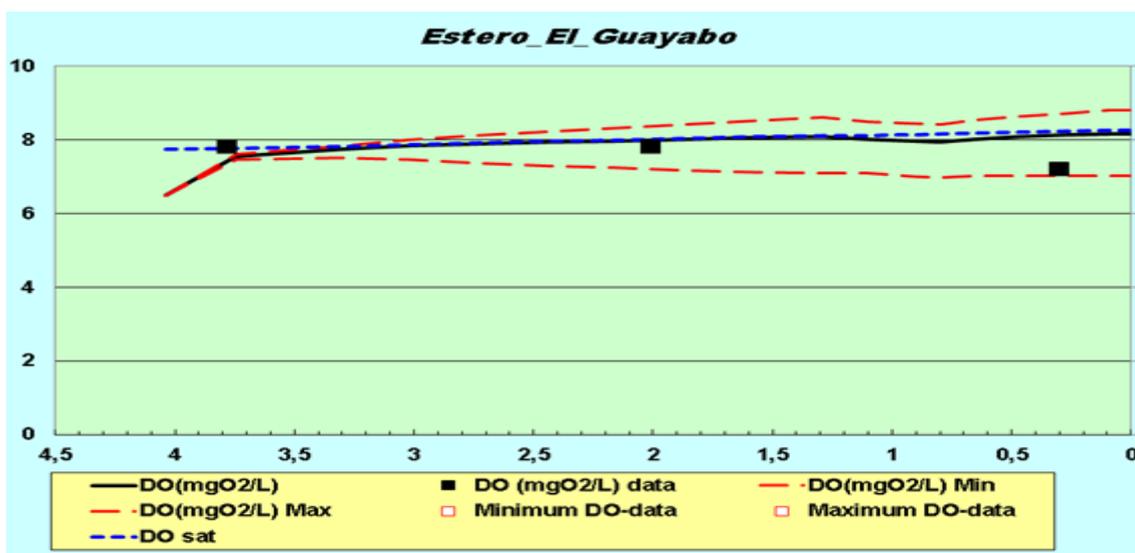


Con respecto a la simulación de la DBO por QUAL2K para el mes de marzo, se observa en el gráfico 17, que se obtiene un buen ajuste entre los valores observados en campo en relación a los que predice el programa sobre los datos de DBO a lo largo de todos los tramos.

4.1.4.3. Simulación del OD y la DBO en el mes de abril

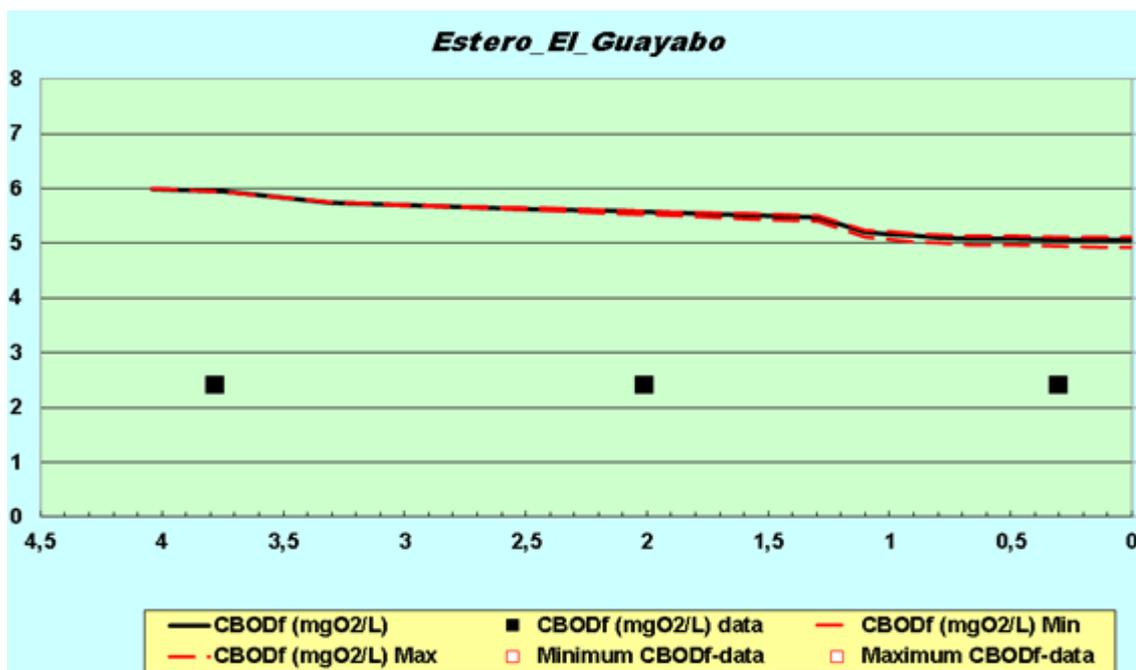
La simulación con QUAL2K en términos del OD y la DBO, se muestra en los gráficos 18 y 19, correspondiente al mes de abril:

Gráfico 18. Simulación del OD con QUAL2K del mes de abril



Como puede observarse en el gráfico 18, el ajuste en relación al OD es óptimo en los tres tramos de la corriente de El Guayabo, acercándose suficientemente los valores de campo a los predichos por el modelo.

Gráfico 19. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de abril



El gráfico 19 muestra también un ajuste óptimo del programa QUAL2K, con valores predichos por el modelo que sobreestiman por muy poca diferencia los valores medidos en los puntos de muestreo localizados en los tres tramos de la corriente del estero El Guayabo.

4.1.4.4. Análisis de rendimiento

El análisis de rendimiento de la calibración del programa QUAL2K indica un ajuste óptimo para la variable de OD entre los valores predichos por el modelo y los medidos en la corriente, presentando valores muy cercanos a 1, tanto en el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe como en el coeficiente de determinación. Así mismo, el rendimiento del modelo para la DBO presenta un ajuste óptimo en relación al OD en ambos estadísticos, especialmente en los valores determinados por el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Los resultados de los estadísticos utilizados para tal efecto se muestran en las tablas 28 y 29:

Tabla 26. Rendimiento de QUAL2K con respecto al OD

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FER	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	6,90	5,40	7,80	6,70	0,568	0,888
	Predicción	7,95	5,10	8,08	7,04		
T2	Medición	7,20	6,40	7,30	6,97	-1,829	1,000
	Predicción	7,72	5,57	7,95	7,08		
T3	Medición	7,00	7,20	7,80	7,33	-1,275	0,380
	Predicción	7,6	6,66	8,17	7,48		
Media	Medición	7,03	6,33	7,63			
	Predicción	7,76	5,78	8,07			
Error	NSE	-8,082	0,042	-0,322			
	R2	0,255	0,918	0,834			

Tabla 27. Rendimiento de QUAL2K con respecto a la DBO

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FER	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,918	0,999
	Predicción	2,53	1,54	5,49	3,19		
T2	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,197	0,999
	Predicción	2,47	1,51	5,13	3,04		
T3	Medición	2,00	2,00	2,00	2,00	0,639	0,994
	Predicción	2,35	1,51	5,06	2,97		
Media	Medición	2,00	2,00	2,00			
	Predicción	2,45	1,52	5,23			
Error	NSE	0,864	0,748	0,376			
	R2	0,815	0,787	0,865			

4.2. Discusión

El estero el Guayabo en época lluviosa presentó variación de caudales a lo largo de los tres meses de estudio, además se pudo comprobar que su caudal aumenta progresivamente en el PMT1 y PMT2, esto se debe al aporte hídrico de las descargas existentes a lo largo de todo el estero, sin embargo en el PMT3 su caudal denota un gran aumento debido a que este punto se encuentra muy cercano al río Quevedo, el mismo que por la época de lluvia incrementó su caudal, lo que hace que las aguas del estero se mezclen con las del río previo a su desembocadura. La mayor velocidad de la corriente fue registrada aguas arriba en los meses de febrero y marzo con valores de 0.96 m/s y 0.88 m/s respectivamente; cabe recalcar que la máxima profundidad se registró en el PMT3. Similares comportamientos determinó Valarezo en El estero el Guayabo en estación seca y Villalobos en el Río Tiribí; ya que en el primero existe incremento de caudal del agua debido a la descarga de aguas residuales de la industria maderera y la descarga de aguas de cultivo; así mismo el segundo concuerdan con el mismo criterio acerca de los resultados de aforos donde expresa que el caudal aumenta 10 veces en comparación con el punto de aguas arriba hasta llegar a la desembocadura debido a las aportaciones de caudal que recibe, variando desde 0.1 m³/s hasta poco más de 10 m³/s durante la época lluviosa. [7] [16]

Los valores de oxígeno disuelto varían en cada uno de los tramos establecidos desde aguas arriba hasta el PMT3, sin embargo el mayor incremento se produce en el PMT1 llegando a valores de hasta 8.9 mg/l, debido a la velocidad que presenta la corriente en este punto además de la caída a la que se somete este cuerpo de agua, el tributario se caracteriza por tener altas concentraciones de OD su máximo valor es de 8,1 mg/l, el OD disminuye debido a las descargas de aguas residuales que existen aunque el descenso no es tan significativo; Guizado y Díaz en su investigación de la calidad del agua de río Manzanares en el año 2007 que fue estudiado en época seca y lluviosa concuerdan que las aportaciones de las lluvias y de los caudales favorece para que haya dilución de cualquier contaminante en el agua. En el estudio realizado por Valarezo en la época seca, ocurre un comportamiento similar en el que el oxígeno disuelto incrementa en base al aporte de caudal de los afluentes tributarios y disminuye en base a las descargas que contienen materia orgánica. [7] [20]

En la presente investigación se obtuvo un valor promedio máximo de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 3 mg/l, contrastando con el valor obtenido de DBO en la investigación realizada en el río Manzanares pudimos verificar que tienen similitud, ya que su máximo valor fue de 2,5 mg/l, esto se atribuye a que en el periodo de lluvias el caudal es mayor y por tanto existe más probabilidades de autodepuración, cabe resaltar que Valarezo realizó su investigación en el estero El Guayabo en época seca y obtuvo valores de DBO promedio de 2,2 mg/l, que nos permiten verificar que sus valores obtenidos también tienen similitud a los valores de la presente investigación. [7] [20]

El análisis de rendimiento del modelo calibrado de Streeter-Phelps durante los 3 meses de estudio como febrero, marzo y abril presenta una relación que existe para el parámetro OD entre los valores observados en la corriente y los valores predichos por el modelo, son valores iguales a 1,0 tanto en el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe como en el coeficiente de determinación lo que significa que tuvieron un ajuste óptimo. Por otro lado, en la tabla se muestra el rendimiento del modelo para la DBO que al igual que el OD también presenta un valor óptimo en todos los tramos. En correspondencia con estos resultados, Martínez, calibró el modelo de Streeter-Phelps en la corriente del estero El Pital, también del cantón Quevedo, determinando un buen ajuste entre los valores medidos y los predichos, con valores promedios de 0,99 tanto para el coeficiente de determinación como para el índice de Nash-Sutcliffe, demostrando la aptitud del referido modelo matemático para ajustarse, con alto rendimiento estadístico, a las condiciones de variación del oxígeno disuelto en los esteros del cantón Quevedo. [18]

El análisis de rendimiento de la calibración del programa QUAL2K refleja un ajuste estadístico ligeramente óptimo en relación con los perfiles del OD, en el cual los valores predichos se acercaron a los medidos en campo, mostrando valores de 0,006 a 1,000 para el coeficiente de determinación de febrero a abril; asimismo, en los tramos valores de 0,913 a 0,966, para el coeficiente de determinación. Por el contrario, el ajuste del parámetro DBO, obtuvo un ajuste mayor con respecto al OD de acuerdo a los valores de coeficiente de determinación y el índice de Nash-Sutcliffe en cada tramo, mostrando valores de 0,994 a 0,999 y 0,197 a 0,918, para el coeficiente de determinación y el índice de Nash-Sutcliffe, respectivamente. [18]

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los mayores caudales registrados fueron en el mes de marzo, con un caudal promedio máximo de 3630 l/s en el PMT3, 1567 l/s en el PMT2 y 1154 l/s en el PMT1; siendo el mes de marzo el que presentó los mayores caudales a lo largo de las 6 campañas realizadas, en cuanto a lo que tiene que ver con profundidad contrastamos que las profundidades promedio de mayor consideración siempre se suscitaron en el PMT3, con un valor de 129 cm, esta profundidad se daba por la cercanía de este punto de muestreo con el afluente del río Quevedo, mientras que para la velocidad de la corriente del estero, se determinó que aguas arriba fue el más veloz, llegando a velocidades máximas de 0,92 m/s en el mes de febrero. Por otra parte, las corrientes más lentas se presentan en el PMT3, con valores que varían entre 0,20 m/s y 0,14 m/s.
- El análisis de las concentraciones de oxígeno disuelto indica niveles más altos se presentan en el tributario del cauce principal del estero el Guayabo, alcanzando un nivel máximo de 10,2 mg/l superando los niveles de saturación que es 8 mg/l. En el monitoreo quincenal del estero también se analizó la DBO, en este parámetro las concentraciones más altas fueron valores no máximos de 3 mg/l en la corriente y un valor mínimo de 1 mg/l a lo largo de los meses de estudio, lo cual no representa una diferencia significativa, otro de los parámetros analizados fue el potencial de hidrógeno (pH), obteniendo 7,8 como el valor más alto siendo un pH parcialmente alcalino, en el caso de la conductividad eléctrica analizada en aguas del estero El Guayabo el valor de mayor consideración fue 097 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este valor se encuentra en el rango establecido de $< 2500 \mu\text{S}/\text{cm}$, como un agua potable.
- La constante de reaeración mostró un comportamiento muy fluctuante, propio de la variabilidad pluvial de la estación lluviosa. Sin embargo, se observa una tendencia tener valores bajos en el tramo uno y tramo tres, entre 0,126 y 0,11 d^{-1} , a pesar de variaciones altas. Por otro lado, en el tramo dos se registró mayor uniformidad en la variación de la constante de reaeración.

- En relación con las constantes desoxigenación (k_d) y de remoción total de la DBO (k_r), se puede inferir, en el caso de la primera, un proceso muy rápido de eliminación de la materia orgánica contaminante por metabolismo bacteriano a lo largo de los tres tramos en que se dividió la corriente, con valores oscilando principalmente entre 0,3 y 0,6 d^{-1} ; y, en el caso de la segunda, que el fenómeno de sedimentación de la materia orgánica es significativo, por tratarse de una corriente relativamente lenta.
- Los objetivos planteados en esta investigación, se pudieron cumplir, recabando información y datos importantes que sirvieron para el desarrollo de la presente investigación. Cabe resaltar que los valores de parámetros fisicoquímico; oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, temperatura, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno medidos en los puntos de muestreo seleccionados para esta investigación, tienen variación en comparación de los datos obtenidos en la investigación realizada por Valarezo, 2018 en época seca.

5.2. Recomendaciones

- Es necesario que se continúe realizando más estudios sobre la calidad del agua del estero El Guayabo, y de esta manera se creen estrategias para la recuperación total de la calidad del agua, incluyendo las descargas y tributario que este cuerpo de agua tiene.
- Las organizaciones sociales y gubernamentales deben tener más relevancia en realizar capacitaciones y brindar información de las actividades adecuadas llevadas a cabo cuando se vive cerca de un estero, de esta manera se impide el mal uso del mismo usándolo como lugar para descargar las aguas residuales, el GAD municipal del cantón Quevedo debe ejecutar ordenanzas que permitan sancionar a quienes contaminen el recurso hídrico.
- Se recomienda que implementen planes de remediación, monitoreo de calidad y de educación ambiental en las empresas que realizan actividades agroindustriales que de una u otra manera, afectan la calidad del agua ya que desechan sus aguas residuales sin previo tratamiento.
- Los programas de simulación como QUAL2K merecen una mayor consideración en los estudios de calidad del agua, debido a que puede llegar a ser una herramienta eficaz para las estrategias de gestión de saneamiento de ríos, siendo útil en determinar las concentraciones de oxígeno disuelto requerido para sustentar la vida acuática, o también para buscar estrategias que permitan mantener las concentraciones de oxígeno disuelto en los niveles permitidos por la normativa vigente.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

- [1] J. A. P. PAEZ, «CONTAMINACIÓN,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.eumed.net/rev/delos/13/japp.html>. [Último acceso: 8 DICIEMBRE 2018].
- [2] R. G. SÁNCHEZ, 2004. [En línea]. Available: <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>. [Último acceso: 10 DICIEMBRE 2018].
- [3] S/N, 2009. [En línea]. Available: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/120ProcC.htm>. [Último acceso: 5 Diciembre 2018].
- [4] F. DORYS, «Calidad del agua en el sur de Ahuachapán,» El Salvador, 2005.
- [5] K. Stella, 2008. [En línea]. Available: <http://www.ingenieroambiental.com/agua2.pdf>. [Último acceso: 14 Diciembre 2018].
- [6] R. O. Raudel, El agua en el medio ambiente : muestreo y análisis, 1a ed., M. M. Contreras, Ed., Baja California: Plaza y Valdés, 2003.
- [7] Valarezo, “*Modelización de la calidad del agua del estero El Guayabo, cantón Quevedo, estación seca*, Quevedo, Los Rios, 2018, p. 115.
- [8] C. Lopez, G. Buitrón, F. Cervantes y H. Hernández, Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño, Monterrey: IWA Publising, 2017, pp. 19;42-43.
- [9] L. Grijalbo, Elaboración de inventarios de focos contaminantes, San Millán: Tutor Formación, 2016, pp. 218-217; 250.
- [10] P. Manuel, Las calidades del Agua, Primera edición ed., Barcelona: Cuadernos del medio ambiente RUBES, 1999.
- [11] V. Mercedes, *Evaluación de la calidad del agua en la subcuenca d Evaluación de la calidad del agua en la subcuenca del río yacuambi*, Cádiz, 2011.
- [12] M. M, Manual de campo de Proyecto del Río: una guía para monitorear la, Segunda edicion ed., Nuevo Mexico: Proyecto del río, 1991.
- [13] T. A, Reseña sobre modelos unidireccionales de calidad de aguas en ríos, Sexta edicion ed., Brasil: Revista Brasileira de Recursos Hidricos, 2001.

- [14] C. Steve, QUALK2Kw theory and documentatio version (5.1.), 2008.
- [15] C. Mayra, *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA, MANIZALES*, 2015.
- [16] V. & C. F. Cajas, *Estimación De Valores De Contaminación Difusa Para El Río*, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2015.
- [17] H. Villalobos, *Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua*, San José: Universidad De Costa Rica , 2008.
- [18] M. G. A. E. M. F. L. P. D. S. J. L. G. R. C. C. J. & S. C. Jaramillo, «Integración De Los Modelos Weap Y Qual2k Para La Simulación De La Calidad Agua,» *Aqua-LAC*, vol. 8, nº 2, pp. 14 -24, 2016.
- [19] G. & P. J. Martínez, *Modelización de la calidad del agua del estero El Pital, cantón Quevedo, estación lluviosa, año 2019*, Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2019.
- [20] C. Sierra, *Calidad del agua: Evaluacion y diagnostico*, Medellin: Ediciones de la U, 2011.
- [21] Villalobos, H, «Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica,» Ciudad Universitaria Rodrigo Facio , 2008.
- [22] Guizao, C y Díaz, F, «Simulación de la calidad del agua del Río Manzanares utilizando el modelo QUAL2K,» Santa Marta, 2007.
- [23] J. Pazmiño, G. Zambrano y A. Coello, «Modelización de la calidad del agua del estero Aguas Claras, del cantón Quevedo, Ecuador,» *DYNA*, pp. 10-12, 2017.
- [24] Pazmiño J y Toapanta M, «Modelizacion de la calidad del agua del estero El Limón, Cantón Quevedo, estación seca, Año 2018,» Quevedo- Ecuador , 2018.
- [25] G. Avila, *Manual basico para la modelizacion numerica de ña calidad del agua en ríos: programa computacional HEC-RAS Version 4.0*, 2014.
- [26] García, J, «Modelización de la calidad del agua del estero El Pital, cantón Quevedo, estación seca,» Quevedo, 2018.

CAPÍTULO VII

ANEXO

7.1. Tablas de datos generales sobre las características hidromorfológicas del estero El Guayabo.

Los valores en términos de caudal, velocidad y profundidad obtenidos en los tres puntos de muestreo, durante los meses de monitoreo febrero, marzo y abril se muestran en las tablas 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

Tabla 28. Valores obtenidos en el cálculo del caudal por fechas de las campañas de muestreo en l/s

Punto	Caudal (l/s)					
	<i>15-feb-19</i>	<i>28-feb-19</i>	<i>15-mar-19</i>	<i>29-mar-19</i>	<i>10-abr-19</i>	<i>24-abr-19</i>
Aguas arriba	1034	783	1258	1197	1217	336
Descarga 1	61	37	68	28	21	16
Descarga 2	55	85	61	23	25	38
1er PMT1	1194	1114	1537	1474	1295	575
2do PMT1	1032	1391	1775	1459	1217	566
Tributario	110	107	56	89	81	60
PMT2	1485	1648	1846	996	1444	618
Descarga 3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PMT3	3713	3546	4642	2556	3956	893

Tabla 29. Promedio de los caudales en m/s

PROMEDIO CAUDAL			
Promedio	<i>febrero</i>	<i>marzo</i>	<i>abril</i>
Aguas arriba	909	1228	777
Descarga 1	49	48	19
Descarga 2	70	42	32
1er PMT1	1154	1506	935
2do PMT1	1212	1617	891
Tributario	109	72	71
PMT2	1567	1421	1031
Descarga 3	1	1	1
PMT3	3630	3599	2424

Tabla 30. Valores obtenidos en el cálculo de la velocidad por fechas de las campañas de muestreo

Punto	Velocidad cm/s					
	<i>15-feb-19</i>	<i>28-feb-19</i>	<i>15-mar-19</i>	<i>29-mar-19</i>	<i>10-abr-19</i>	<i>24-abr-19</i>
Aguas arriba	95,69	79,47	90,23	94,94	59,00	35,29
PMT1	67,78	73,14	66,67	64,96	80,21	85,71
PMT2	80,54	82,64	85,71	85,13	77,72	75,00
PMT3	66,00	66,77	67,69	64,38	93,20	68,48

Tabla 31. Promedio de la velocidad en m/s

PROMEDIO VELOCIDAD m/s			
Promedio	<i>febrero</i>	<i>marzo</i>	<i>abril</i>
Aguas arriba	0,96	0,88	0,47
PMT1	0,68	0,68	0,83
PMT2	0,81	0,84	0,76
PMT3	0,66	0,66	0,81

Tabla 32. Valores obtenidos en el cálculo de la profundidad por fechas de las campañas de muestreo

Punto	Profundidad cm					
	<i>15-feb-19</i>	<i>28-feb-19</i>	<i>15-mar-19</i>	<i>29-mar-19</i>	<i>10-abr-19</i>	<i>24-abr-19</i>
Aguas arriba	31	31	55	39	52	38
PMT1	31	31	26	41	20	13
PMT2	33	39	33	34	37	28
PMT3	100	101	94	119	13	23

Tabla 33. Promedio de la profundidad en m

Promedio profundidad m			
Promedio	<i>febrero</i>	<i>marzo</i>	<i>abril</i>
Aguas arriba	0,31	0,42	0,45
PMT1	0,31	0,33	0,17
PMT2	0,33	0,35	0,32
PMT3	1,00	1,04	0,18

Figura 5. Hojas de cálculo de caudales Aguas Arriba en marzo

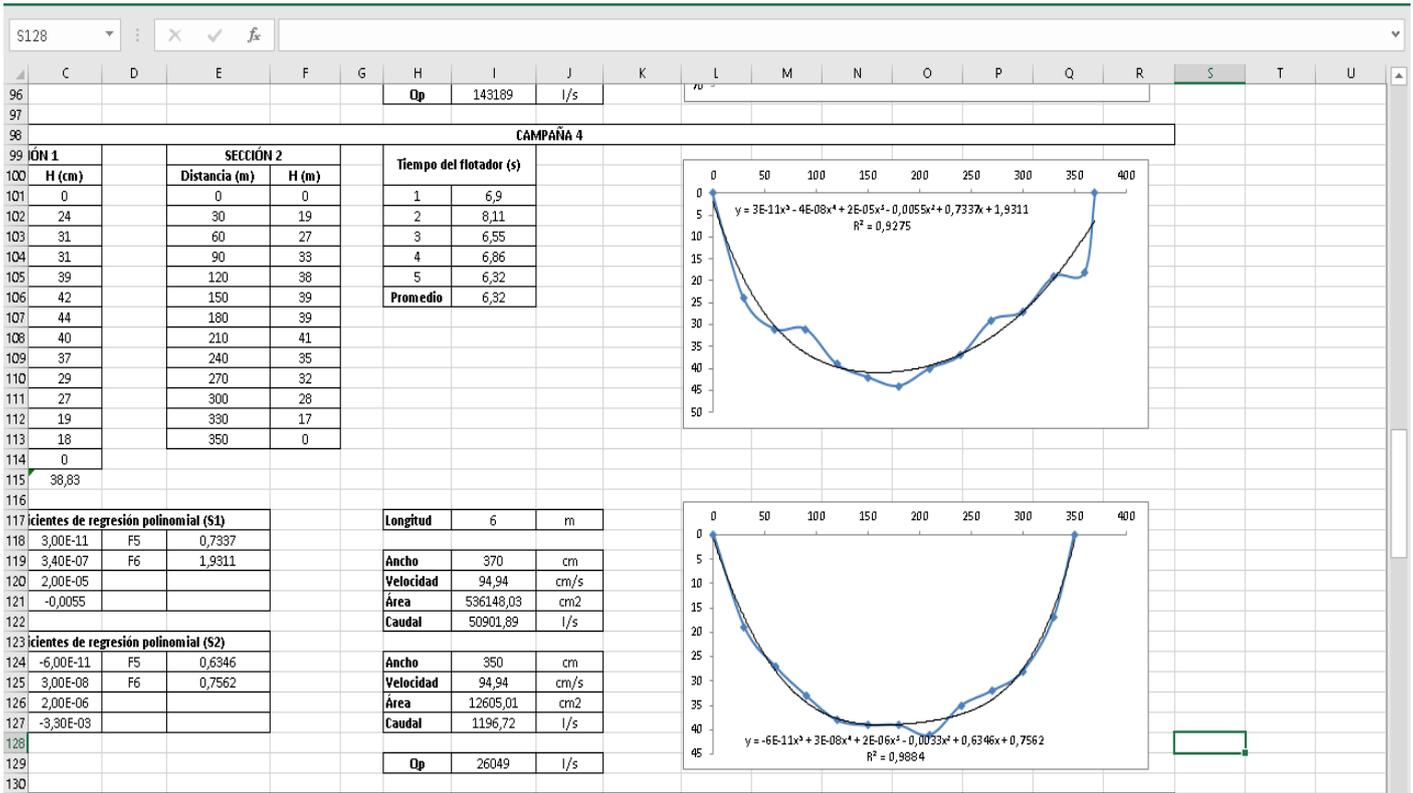


Figura 6. Hoja de cálculo de caudales PMT1 en marzo

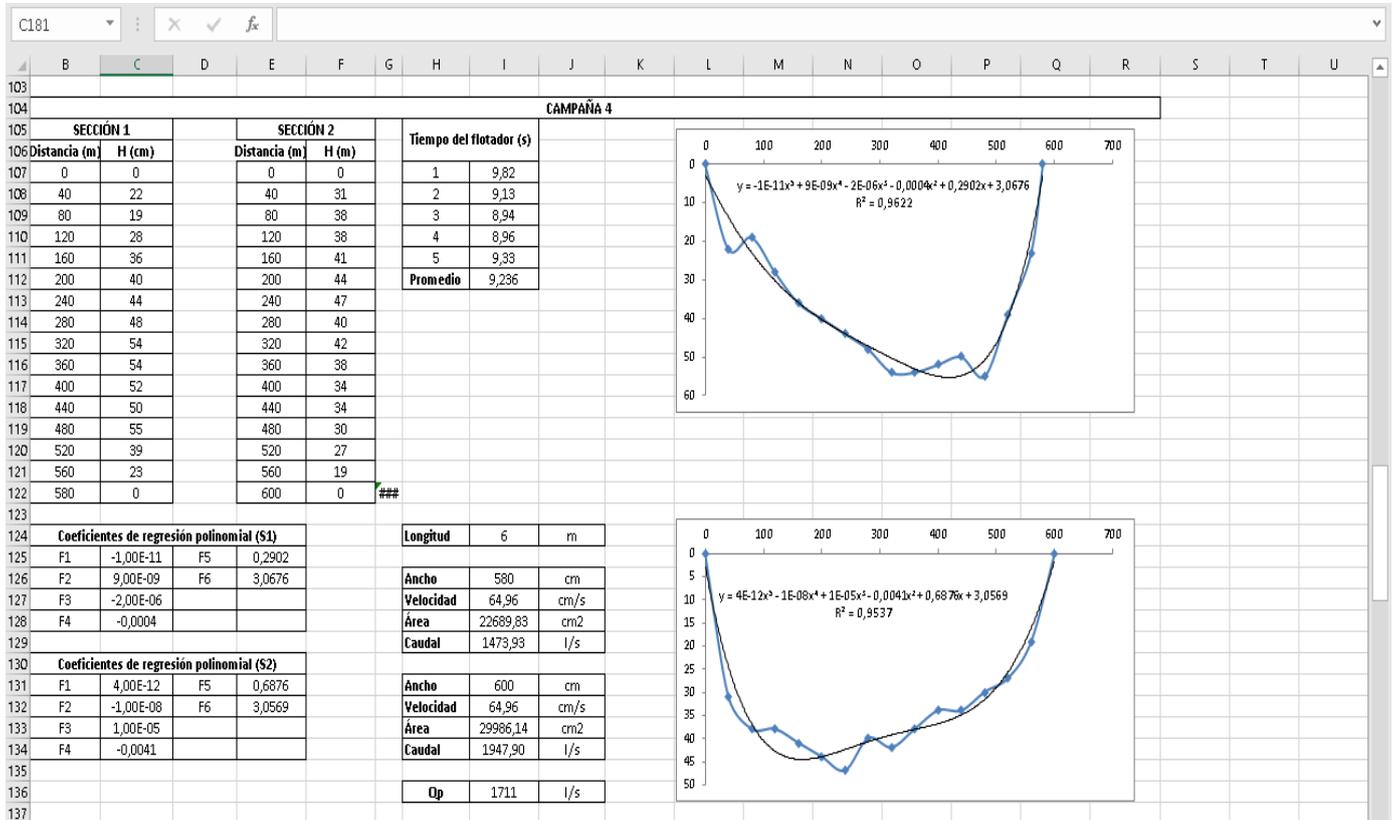


Figura 7. Hoja de cálculo de caudales PMT2 en marzo

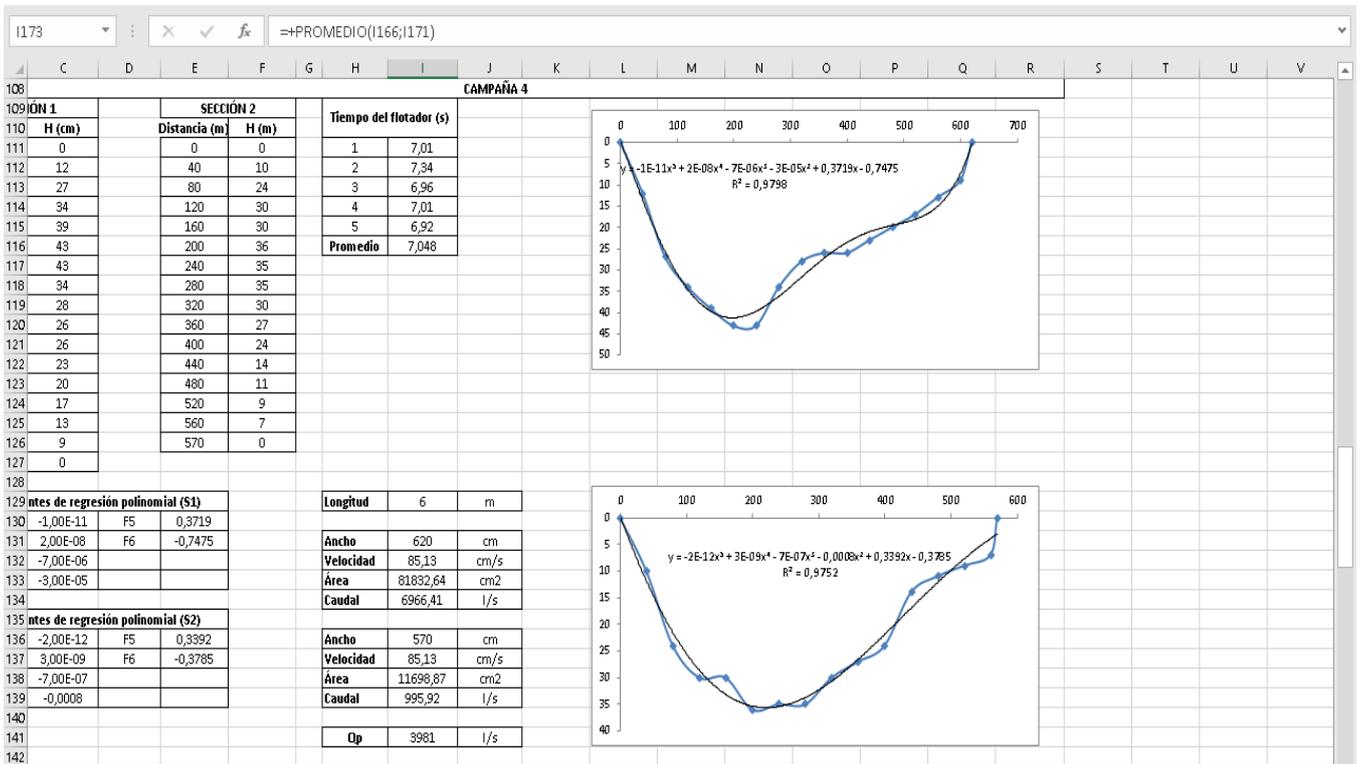
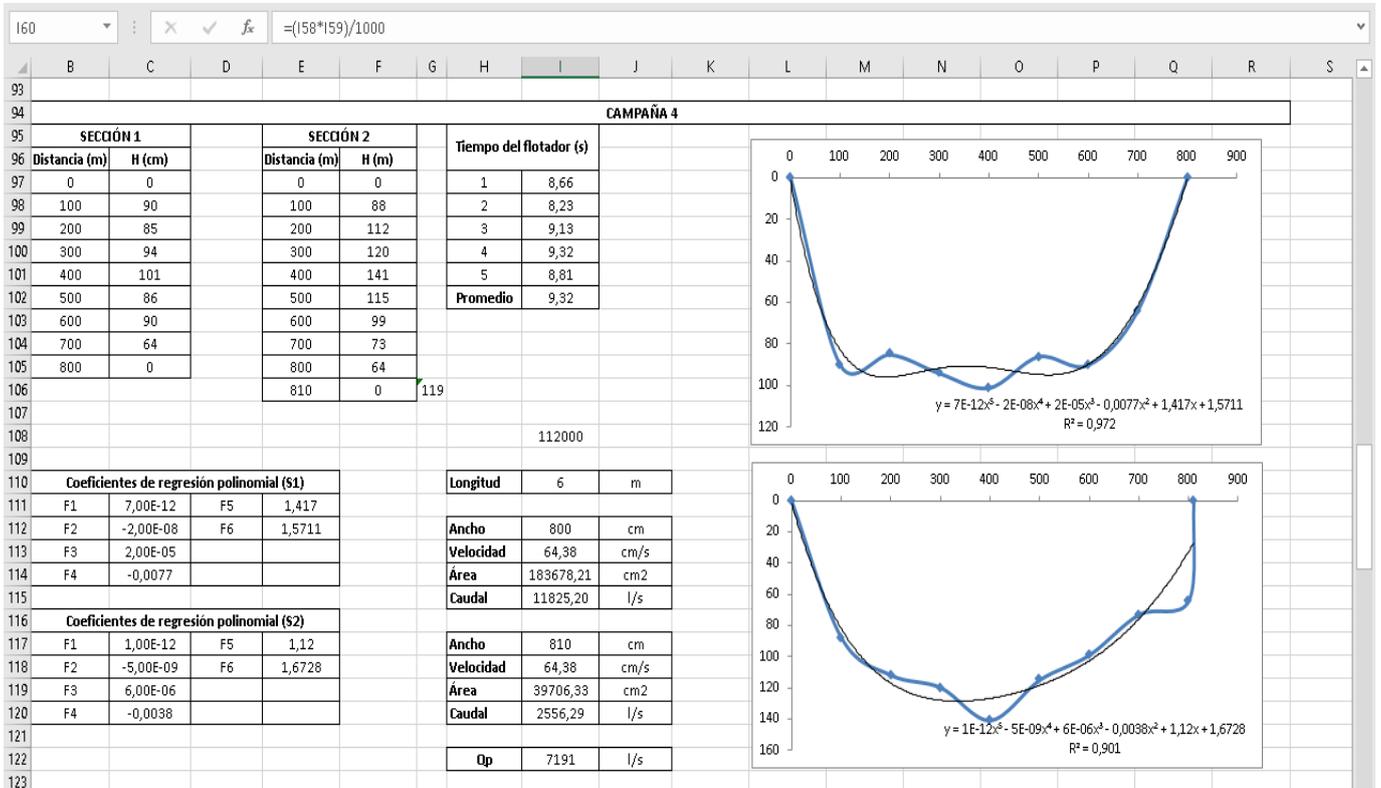


Figura 8. Hoja de cálculo de caudales PMT3 en marzo



7.2. Tablas de datos generales sobre las características fisicoquímicas del estero El Guayabo

En las tablas 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 44 y 45 se muestran los valores obtenidos de DBO, OD, pH, temperatura, conductividad eléctrica:

Tabla 34. Valores de DBO mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1 y 2	PM1T1	PMT2	Descarga 3	PMT3
15-feb-19	1	2	1	3	2	1
28-feb-19	1	2	2	1	3	2
15-mar-19	2	1	2	2	1	1
29-mar-19	1	1	1	1	1	1
10-abr-19	2	3	3	3	2	3
24-abr-19	1	2	1	1	2	2

Tabla 35. Promedio de DBO mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1 y 2	PM1T1	PMT2	Descarga 3	PMT3
febrero	1	2	1	3	2	1
marzo	1,3	1,3	1,7	1,3	1,7	1,3
abril	1,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,5

Tabla 36. Valores de oxígeno disuelto mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
15-feb-19	4,4	6,1	5,4	6,3	7,1	6,9	6,2	7,2	7
28-feb-19	7,9	5,5	6,1	7,4	7,1	8,1	7,2	7,5	7,4
15-mar-19	6,2	5,1	6,5	5,4	6,20	7,8	5,7	6,6	7,5
29-mar-19	7,1	7,6	6,1	5,4	6,2	8,3	7,1	5,6	6,8
10-abr-19	6,5	9,7	7,6	9,5	8,3	10,2	9,7	7,2	9,3
24-abr-19	6	4,5	6,5	8,2	5,7	4,7	4,9	7,1	7,3

Tabla 37. Valores promedio de oxígeno disuelto mg/l

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
febrero	4,4	6,1	5,4	6,3	7,1	6,9	6,2	7,2	7,0
marzo	7,1	6,1	6,2	6,1	6,5	8,1	6,7	6,6	7,2
abril	6,3	7,1	7,1	8,9	7,0	7,5	7,3	7,2	8,3

Tabla 38. Mediciones de pH

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
15-feb-19	7,4	7,7	6,7	7,4	7,6	7,2	7,3	7,4	0
28-feb-19	7,6	7,1	7,0	7,5	7,3	7,0	7,6	7,0	7,1
15-mar-19	7,5	6,9	6,9	7,5	7,5	7,1	7,3	7,3	7,4
29-mar-19	7,6	7,2	6,9	7,7	7,5	7,4	7,7	7,5	7,3
10-abr-19	7,4	7,0	6,7	7,5	7,6	7,5	7,6	7,4	7,6
24-abr-19	7,8	7,5	7,8	7,8	7,8	7,6	7,7	6,9	7,0

Tabla 39. Promedio pH

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
febrero	7,4	7,7	6,7	7,4	7,6	7,2	7,3	7,4	0
marzo	7,6	7,1	6,9	7,6	7,4	7,2	7,5	7,3	7,3
abril	7,6	7,3	7,3	7,7	7,7	7,6	7,7	7,2	7,3

Tabla 40. Mediciones de temperatura, °C

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
15-feb-19	29,3	32,4	26,0	28,5	29,6	26,0	28,5	27,2	0
28-feb-19	27,6	30,3	25,2	28,1	29,3	26,4	28,1	27,4	28,3
15-mar-19	30,9	26,4	28,5	30,4	27,4	26,3	29,9	27,3	26,7
29-mar-19	27,5	26,2	26,3	27,6	27,4	27,3	27,3	27,5	27,8
10-abr-19	29,7	27,8	26,3	29,3	29,7	27,5	29,6	29,0	29,2
24-abr-19	26,8	26,7	26,7	26,1	26,8	26,9	26,8	26,5	27,6

Tabla 41. Promedio de temperatura °C

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
febrero	29,3	32,4	26	28,5	29,6	26,0	28,5	27,2	0
marzo	28,7	27,6	26,7	28,7	28,0	26,7	28,4	27,4	27,6
abril	28,3	27,3	26,5	27,7	28,3	27,2	28,2	27,8	28,4

Tabla 42. Mediciones de conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
15-feb-19	052	044	046	052	050	043	052	082	0
28-feb-19	042	046	044	041	055	043	054	071	043
15-mar-19	051	044	044	052	053	041	059	087	053
29-mar-19	052	045	044	054	053	043	056	094	049
10-abr-19	052	048	041	050	051	045	052	097	056
24-abr-19	055	051	054	045	056	058	062	068	060

Tabla 43. Promedio de conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$

FECHA	Aguas Arriba	Descarga 1	Descarga 2	PM1T1	PM2T1	Tributario	PMT2	Descarga 3	PMT3
febrero	052	044	046	052	050	043	052	082	-
marzo	048	045	044	049	054	042	056	084	048
abril	054	050	048	048	054	052	057	083	056

7.3. Hojas de cálculo del modelo de Streeter-Phelps

Figura 9. Hoja de cálculo de Streeter-Phelps, mes de febrero

DATOS															
oriente aguas arrib				Entrada 1				Entrada 2				Entrada 3			
Qr (m3/s)	3,51			Q (m3/s)	0,043			Q (m3/s)	0,394			Qt (m3/s)	0,568		
DBO5	3			DBO5	11			DBO5	5			DBO5	5		
DBOu	3,6			DBOu	16,06			DBOu	6			DBOu	6		
Od (mg/l)	5,22			Od (mg/l)	4,5			Od (mg/l)	3,5			Od (mg/l)	1,24		
T (°C)	24,5			T (°C)	27,55			T (°C)	27,7			T (°C)	27,7		
Hidrodinámica de la corriente						Valores observados en campo									
	V (m/s)	H (m)	S (m/m)	Q (l/s)		P. Muestre	x (m)	z (m)	OD (mg/l)	BO5 (mg/l)	BOu (mg/l)				
Tramo 1	0,46	0,65	0,002	3553		PM-T1	1600	53	5,13	3,00	3,6				
Tramo 2	0,32	0,8	-0,009	3931		PM-T2	2590	44	4,98	3,00	3,6				
Tramo 3	0,19	1,7	0,001	4674		PM-T3	3400	45	4,79	3,30	4,0				
Constantes cinéticas de reacción												TRAMO RE_TOTAL			
Tramo	Constante de reaeración				Constante de desoxygenación				Constante remoción total		1	1,01			
	ka 20 °C	ka (T)	ka 20 °C	ka (T)	kd a 20 °C	kd (T)	kd calibrada	kd calibrada	kr (T)	kr calibrada	2	4,01			
	O'Connor y Dobbins	Langbein&Durun			Hydroscience			Carga		3	1,23				
1	5,086	5,665	4,185	4,661	0,503	0,529	0,651	0,640	-3,441	0,998					
2	2,940	1,830	2,103	1,309	0,194	0,476	0,595	0,673	-7,301	1,000					
3	0,759	0,473	0,474	0,295	2,292	0,347	0,441	0,354	-5,765	0,404					
Condiciones iniciales															
Tramo 1			Tramo 2				Tramo 3								
			Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado				Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado				
Lo (mg/l)	3,75		Lo (mg/l)	4,72	4,72	3,79			Lo (mg/l)	5,34	5,34	4,02			
Odo (mg/l)	5,21		Odo (mg/l)	5,70	5,58	5,00			Odo (mg/l)	5,20	5,04	4,50			
To (°C)	24,54		To (°C)	24,86					To (°C)	25,22					
OD sat (mg)	8,33		OD sat (mg)	8,28					OD sat (mg)	8,23					
Do (mg/l)	3,12		Do (mg/l)	2,58	2,70	3,28			Do (mg/l)	3,03	3,19	3,73			
Ajuste inicial del modelo															
Primer ajuste				Segundo ajuste				Modelo calibrado							

Figura 10. Hojas de cálculo modelo Streeter-Phelps, mes de marzo

DATOS															
Corriente aguas arriba				Entrada 1				Entrada 2				Entrada 3			
Qr (m3/s)	4,596			Q (m3/s)	0,044			Q (m3/s)	0,606			Qt (m3/s)	0,86		
DBO5	3			DBO5	18			DBO5	4			DBO5	4		
DBOu	3,6			DBOu	26,28			DBOu	4,8			DBOu	4,8		
Od (mg/l)	6,16			Od (mg/l)	4,6			Od (mg/l)	3,21			Od (mg/l)	1,24		
T (°C)	26,7			T (°C)	28,5			T (°C)	27,6			T (°C)	27,7		
Hidrodinámica de la corriente						Valores observados en campo									
	V (m/s)	H (m)	S (m/m)	Q (l/s)		P. Muestreo	x (m)	z (m)	OD (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DBOu (mg/l)				
Tramo 1	0,51	0,81	0,002	4641		PM-T1	1600	53	5,72	3,0	3,6				
Tramo 2	0,45	1,0	-0,009	5247		PM-T2	2590	44	5,5	3,0	3,6				
Tramo 3	0,20	2,0	0,001	6570		PM-T3	3400	45	4,96	3,3	4,0				
Constantes cinéticas de reacción												TRAMO RE_TOTAL			
Tramo	Constante de reaeración				Constante de desoxygenación				Constante remoción total		1	8,567			
	ka 20 °C	ka (T)	ka 20 °C	ka (T)	kd a 20 °C	kd (T)	kd calibrada	kd calibrada	kr (T)	kr calibrada	2	7,706			
	Owens y Gibbs	Langbein&Durun			Hydroscience			Carga		3	5,268				
1	5,004	5,868	3,463	4,061	0,527	0,481	0,654	0,605	-5,141	0,997					
2	2,636	1,641	2,309	1,437	0,128	0,439	0,175	0,465	-11,099	0,999					
3	0,621	0,387	0,408	0,254	0,102	0,325	0,130	0,287	-7,547	0,998					
Condiciones iniciales															
Tramo 1			Tramo 2				Tramo 3								
			Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado				Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado				
Lo (mg/l)	3,82		Lo (mg/l)	4,97	4,97	3,76			Lo (mg/l)	5,46	5,46	3,87			
Odo (mg/l)	6,15		Odo (mg/l)	6,13	6,00	5,75			Odo (mg/l)	5,47	5,35	5,10			
To (°C)	26,72		To (°C)	26,82					To (°C)	26,94					
OD sat (mg)	8,01		OD sat (mg)	7,99					OD sat (mg)	7,98					
Do (mg/l)	1,86		Do (mg/l)	1,86	1,99	2,24			Do (mg/l)	2,51	2,63	2,88			

Figura 11. Hojas de cálculo modelo Streeter-Phelps, mes de abril

DATOS															
Corriente aguas arriba			Entrada 1			Entrada 2			Entrada 3						
Qr (m3/s)	3,262		Q(m3/s)	0,034		Q(m3/s)	0,113		Qt (m3/s)	0,366					
DBO5	3,5		DBO5	13,5		DBO5	7		DBO5	6					
DBOu	4,2		DBOu	19,71		DBOu	8,4		DBOu	7,2					
Od (mg/l)	6,78		Od (mg/l)	5,87		Od (mg/l)	3,63		Od (mg/l)	2,54					
T (°C)	27,1		T (°C)	28,05		T (°C)	27,5		T (°C)	27,2					
Hidrodinámica de la corriente						Valores observados en campo									
	TRAMO 2	H (m)	S (m/m)	Q (l/s)		P. Muestreo	x (m)	z (m)	OD (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DBOu (mg/l)				
Tramo 1	0,36	0,49	0,002	3296		PM-T1	1600	53	6,96	3,5	4,2				
Tramo 2	0,40	0,47	-0,009	3412		PM-T2	2590	44	6,97	3,5	4,2				
Tramo 3	0,14	1,33	0,001	3968		PM-T3	3400	45	5,81	3,75	4,5				
Constantes cinéticas de reacción												TRAMO		RE TOTAL	
Tramo	Constante de reaeración				Ka calibrada	Constante de desoxigenación			Constante remoción total		1	2,32			
	ka 20 °C	ka (T)	ka 20 °C	ka (T)		kda 20 °C	kd (T)	kd calibrada	kr (T)	kr calibrada	2	2,55			
	O'Connor y Dobbins		Langbein&Durun			Hydroscience		Carga		3	8,89				
1	6,875	8,137	4,769	5,645	0,987	0,598	0,829	0,115	-1,147	0,731					
2	7,714	4,800	5,601	3,486	11,840	0,609	0,844	0,130	-6,335	1,499					
3	0,841	0,523	0,491	0,306	0,012	0,388	0,538	0,479	-3,055	0,502					
Condiciones iniciales															
Tramo 1			Tramo 2				Tramo 3								
				Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado				Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado			
Lo (mg/l)	4,36		Lo (mg/l)	4,87	4,87	4,27			Lo (mg/l)	5,43	5,43	4,49			
Odo (mg/l)	6,77		Odo (mg/l)	6,98	6,84	6,71			Odo (mg/l)	6,55	6,42	6,44			
To (°C)	27,11		To (°C)	27,12					To (°C)	27,13					
OD sat (mg/l)	7,95		OD sat (mg/l)	7,95					OD sat (mg/l)	7,95					
Do (mg/l)	1,18		Do (mg/l)	0,97	1,11	1,24			Do (mg/l)	1,40	1,53	1,51			

Figura 12. Hojas de Statgraphics, para el cálculo de las constantes cinéticas

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 1_ABRIL.sgp

Archivo Editar Graficar Describir Comparar Relacionar Pronósticos CEP DDE SnapStats! Herramientas Ver Ventana Ayuda

Libro de Datos

StatAdvisor
StatGallery
StatReporter
Comentarios del StatFolk
Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo

Tamaño de muestra: 10000

Semilla para el generador de números aleatorios: 16894

Variable	Tipo
ka	v.a. uniforme
kd	v.a. uniforme
kr	v.a. uniforme
OD	Función
RE_OD	Función
DBO	Función
RE_DBO	Función
RE_TOTAL	Función

Variable	Definición
ka	UNIFORM(0,1;1,0)
kd	UNIFORM(0,1;0,7)
kr	UNIFORM(0,7;1,0)
OD	$7,95 - ((1,18 * \text{EXP}(-ka * (1600 / (0,36 * 86400)))) + (((kd * 4,36) / (ka - kr)) * \text{EXP}(-kr * (1600 / (0,36 * 86400)))) - \text{EXP}(-ka * (1600 / (0,36 * 86400))))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 6,96) / OD) * 100$
DBO	$(4,36 * \text{EXP}(-kr * 1600)) / (0,36 * 86400)$
RE_DBO	$\text{ABS}(DBO - 4,2) / DBO * 100$
RE_TOTAL	RE_DBO + RE_OD

El StatAdvisor

En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para estimar la distribución de variables aleatorias que no pueden determinarse teóricamente. Para ejecutar la simulación, presione Aceptar en el cuadro de diálogo de Opciones de Análisis.

Figura 13. Hojas de Statgraphics para el cálculo de las constantes cinéticas

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 2_ABRIL.sgp

Archivo Editar Graficar Describir Comparar Relacionar Pronósticos CEP DDE SnapStats!! Herramientas Ver Ventana Ayuda

Libro de Datos
StatAdvisor
StatGallery
StatReporter
Comentarios del StatFolk
Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo
Tamaño de muestra: 10000
Semilla para el generador de números aleatorios: 16935

Variable	Tipo
ka	v.a. uniforme
kd	v.a. uniforme
kr	v.a. uniforme
OD	Función
RE_OD	Función
DBO	Función
RE_DBO	Función
RE_TOTAL	Función

Variable	Definición
ka	UNIFORM(1,0;12,0)
kd	UNIFORM(0,1;0,5)
kr	UNIFORM(0,5;1,5)
OD	$7.95 - (1.24 * \text{EXP}(-ka * (290 / (0.40 * 86400)))) + (((kd * 4.27) * (ka - kr)) * (\text{EXP}(-kr * (290 / (0.40 * 86400))) - \text{EXP}(-ka * (290 / (0.40 * 86400)))))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 6.97) * OD) * 100$
DBO	$(4.27 * \text{EXP}(-kr * 290) / (0.40 * 86400))$
RE_DBO	$\text{ABS}(DBO - 4.2) * DBO * 100$
RE_TOTAL	RE_DBO + RE_OD

El StatAdvisor
En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para simular la distribución de variables aleatorias que no pueden determinarse teóricamente. Para ejecutar la simulación, presione Aceptar en el cuadro de diálogo de Opciones de Análisis.

Figura 14. Hojas de Statgraphics para el cálculo de las constantes cinéticas

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 3_ABRIL.sgp

Archivo Editar Graficar Describir Comparar Relacionar Pronósticos CEP DDE SnapStats!! Herramientas Ver Ventana Ayuda

Libro de Datos
StatAdvisor
StatGallery
StatReporter
Comentarios del StatFolk
Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo

Simulaciones Monte Carlo
Tamaño de muestra: 10000
Semilla para el generador de números aleatorios: 16967

Variable	Tipo
ka	v.a. uniforme
kd	v.a. uniforme
kr	v.a. uniforme
OD	Función
RE_OD	Función
DBO	Función
RE_DBO	Función
RE_TOTAL	Función

Variable	Definición
ka	UNIFORM(0,01;0,05)
kd	UNIFORM(0,01;0,05)
kr	UNIFORM(0,05;0,1)
OD	$7.95 - (1.51 * \text{EXP}(-ka * (700 / (0.14 * 86400)))) + (((kd * 4.49) * (ka - kr)) * (\text{EXP}(-kr * (700 / (0.14 * 86400))) - \text{EXP}(-ka * (700 / (0.14 * 86400)))))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 5.89) * OD) * 100$
DBO	$(4.49 * \text{EXP}(-kr * 700) / (0.14 * 86400))$
RE_DBO	$\text{ABS}(DBO - 4.5) * DBO * 100$
RE_TOTAL	RE_DBO + RE_OD

El StatAdvisor
En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para simular la distribución de variables aleatorias que no pueden determinarse teóricamente. Para ejecutar la simulación, presione Aceptar en el cuadro de diálogo de Opciones de Análisis.

7.4. Hojas de datos de simulación con QUAL2K

Figura 15. Hoja de datos iniciales de QUAL2K

QUAL2K FORTRAN
Stream Water Quality Model
Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier
Version 2.12b1

System ID:

River name	Estero_El_Pital
Saved file name	Cal_Febrero
Directory where file saved	rs\Gina_Martínez\Desktop\QUAL2K\DataFiles
Month	2
Day	8
Year	2019
Local time hours to UTC	-6
Daylight savings time	No

Calculation:

Calculation step	0,1	hours
Final time	30	day
Solution method (integration)	Runge-Kutta	
Solution method (pH)	Newton-Raphson	
Time zone	Central Standard Time	
Program determined calc step	0,093750	hours
Time of last calculation	0,14	minutes
Time of sunrise	12:10	AM
Time of solar noon	6:14	AM
Time of sunset	12:17	PM
Photoperiod	12,12	hours

QUAL2K | Time Zones | Headwater | Downstream | Reach | Reach Rates | Air Temperature

Figura 16. Hoja de datos de cabecera de QUAL2K

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Estero_El_Pital (2/8/2019)
Headwater Data:

Number of Headwaters: 1

Headwater 0 (Mainstem)

Headwater Label	Reach No	Rate (m ³ /s)	Elevation (m)	Weir				Rating Curves				Manning Formula				Prescribed Dispersion m ² /s		
				Weir Type	Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity Coefficient	Exponent	Depth Coefficient	Exponent	Slope	n	Bot Width m		Side Slope	Side Slope
Mainstem headwater	1	3,510	55,000	Sharp	0,0000	0,0000	1,2500	0,9000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,001	0,0350	4,96	0,00	0,00	0,00

Water Quality Constituents

Constituent	Units	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Temperature	C	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40
Conductivity	umhos																				
Inorganic Solids	mgO/L																				
Dissolved Oxygen	mg/L	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
CBODslow	mgO ₂ /L																				
CBODfast	mgO ₂ /L	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Organic Nitrogen	ugN/L																				
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L																				
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L																				
Organic Phosphorus	ugP/L																				
Inorganic Phosphorus	ugP/L																				
Phytoplankton	ugA/L																				
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L																				
Internal Phosphorus (IPH)	ugP/L																				
Detritus (POM)	mgO ₂ /L																				
Pathogen	cfu/100 mL																				
Alkalinity	mgCaCO ₃	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Constituent i																					
Constituent ii																					
Constituent iii																					
pH	s.u.	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4

QUAL2K | Time Zones | Headwater | Downstream | Reach | Reach Rates | Air Temperature

Figura 17. Hoja de Reach (tramos) de ingreso de datos para los tramos

Reach Data:

Reach for diel plot																		
Element for diel plot	1	Reach	Headwater	Reach			Location		Element	Elevation		Downstream						
Reach	Downstream	Number	Reach	length	Downstream		Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude			Wei
Label	end of reach label			(km)	Latitude	Longitude	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	Type
Mainstem headwater	Tramo 1	1	Yes	0,59	0,00	0,00	4,040	3,450	2	55,000	53,000							Sha
Tramo 1	Tramo 2	2		2,30	0,00	0,00	3,450	1,150	2	53,000	44,000							Sha
Tramo 2	Tramo 3	3		0,40	0,00	0,00	1,150	0,750	2	44,000	43,000							Sha
Tramo 3	Desembocadura	4		0,75	0,00	0,00	0,750	0,000	2	43,000	43,000							Sha

Figura 18. Hoja para ingresar las tasas o constantes cinéticas (Reach rates)

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Estero_El_Pital (2/8/2019)
Reach Rates and Velocities:

Open Old File Run Fortran

Reach	Reach	Prescribed	ISS	Slow CBOD	Fast CBOD	Organic N	Ammonium	Nitrate		
Number	Label	Reaeration	Settling Velocity	Hydrolysis Rate	Oxidation Rate	Hydrolysis Rate	Settling Velocity	Nitrification Rate	Denitri Rate	Se
		/d	m/d	/d	/d	/d	m/d	/d	m/d	tran
1	Mainstem headwater	0,503	0,233					0,640		
2	Tramo 1	0,503	0,233					0,640		
3	Tramo 2	0,194	0,271					0,673		
4	Tramo 3	2,292	0,086					0,354		

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature

7.5. Fotografías



Fotografía 1. Aforo en la sección aguas arriba



Fotografía 2. Toma de muestra para análisis de DBO, descarga 2



Fotografía 3. Toma de muestra de la descarga principal del tramo 3



Fotografía 4. Mediciones del oxígeno disuelto en el punto de muestreo tramo 3



Fotografía 5. Medición del cauce en la descarga 2



Fotografía 6. Realización de aforo en el tramo 2