



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 Ingeniera en
Gestión Ambiental

Título del proyecto de investigación:

*“Modelización de la calidad del agua del estero El Limón, cantón Quevedo, provincia
de Los Ríos, estación lluviosa, año 2018 - 2019”*

Autor:

Pérez Párraga Maybe Liliana

Docente Auspiciante:

Ing. Julio César Pazmiño Rodríguez, M.Sc.

Quevedo - Los Ríos - Ecuador

2018 - 2019

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Maybe Liliana Pérez Párraga declaro que la información descrita en este trabajo de investigación 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 trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

f. _____
Maybe Liliana Pérez Párraga
C.C. # 094037899-5

CERTIFICACIÓN DE CULMINACION DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, Ing. Julio Pazmiño Rodríguez MSc., Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante: Srta. Maybe Liliana Pérez Párraga, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Modelización de la calidad del agua del estero El Limón, cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, estación lluviosa, año 2018-2019**”, previo a la obtención del título de Ingeniera 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

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



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 Limón, cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, estación lluviosa, año 2018 - 2019”.

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

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Muñoz Marcillo José Luis

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Nieto Cañarte Carlos

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Sinchi Rivas Alexandra

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

2018 - 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien ha sido mi eje y guía, me ha brindado salud y fortaleza en cada paso de mi vida y por bendecirme con la familia y amigos que me rodean.

A mis padres Roger y Liliana por estar siempre junto a mí, brindándome su apoyo incondicional, su sabiduría y amor, gracias a ustedes y a su esfuerzo hoy puedo dar este paso.

A mis hermanos Lisbeth y especialmente a Steven por su apoyo constante cada vez que lo he necesitado.

A mis compañeros de estudio y amigos incondicionales Gina Martínez, Fabián Aspiazu, Acun Robles, y Diego García quienes me han acompañado y apoyado sin cesar durante este proceso.

A mí tutor de tesis Ing. Julio Pazmiño y demás docentes de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por los conocimientos brindados, fundamentales en mi futuro desempeño profesional.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación en primer lugar a Dios por demostrarme su amor y compañía en cada día de mi vida.

A mis padres Roger y Liliana, por su amor, guía y aliento en todo momento, siempre han sido mi fortaleza para seguir adelante.

A mis familiares, especialmente a mis hermanos Lisbeth y Steven, y a mis abuelos Jaime, Irene, y Aida[†] (mi ángel en el cielo).

A mi novio Cristhian por su paciencia, comprensión y amor.

Y a todos los amigos maravillosos que obtuve a lo largo de este camino, unos quienes al igual que yo lograron culminar esta etapa y a quienes desafortunadamente tuvieron que partir en el trayecto.

Maybe Liliana Pérez Párraga

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 Limón, perteneciente al Cantón Quevedo provincia de los Ríos en los meses de la época lluviosa Febrero, Marzo y Abril, con el fin de modelizar la calidad su agua, evaluando el las concentraciones del oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el estero, para lo cual se cumplió con los siguientes objetivos propuestos: (1) determinar las características hidromorfológicas del estero, (2) caracterizar la calidad del agua del estero El Limón, (3) modelizar la calidad del agua con el modelo Streeter-Phelps, y, (4) simular la calidad del agua con el software de QUAL2K.

La caracterización se realizó a través de los parámetros físico-químicos que fueron: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) , potencial de hidrógeno (pH), y conductividad eléctrica (CE) en los diez puntos de muestreo, que fueron: aguas arriba, tramo 1, tramo 2, tramo 3, tramo 4, una descarga y cuatro riachuelos tributarios. La calibración y modelación se llevó a cabo a través de las expresiones matemáticas del modelo de Streeter-Phelps, para calibrar el modelo se ajustaron las constantes cinéticas de desoxigenación (K_d), reaireación (K_a) y de remoción total de la DBO (k_r), empleando la metodología Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), utilizando el software estadístico Statgraphics mediante la herramienta de simulaciones Monte Carlo.

Finalmente se utilizó el programa QUAL2K para llevar a cabo la simulación de la calidad del agua, haciendo uso de los datos tomados en el estero y las constantes calibradas.

Palabras clave: Calidad de agua, Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Streeter-Phelps, Qual2k, calibración, validación, metodología GLUE, algoritmo de Monte Carlo.

ABSTRACT AND KEYWORDS.

The purpose of the water quality models is to generate information on the behavior of water sources, and to predict their future scenarios, this research was carried out in the El Limón stream, belonging to the Quevedo Canton province of Los Ríos in the months of the rainy season February, March and April, in order to model the quality of their water, evaluating the dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD) concentrations in the estuary, for which the following objectives were met: proposed: (1) determine the hydromorphological characteristics of the estuary, (2) characterize the water quality of the El Limón estuary, (3) model the water quality with the Streeter-Phelps model, and, (4) simulate water quality with the QUAL2K software.

The characterization was carried out through the physical-chemical parameters that were: dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), temperature ($^{\circ}$ C), hydrogen potential (pH), and electrical conductivity (EC) in the nine ten samples, which were: upstream, section 1, section 2, section 3, section 4, one discharge and four tributary streams. The calibration and modeling was carried out through the mathematical expressions of the Streeter-Phelps model. To calibrate the model, the kinetic constants of deoxygenation (K_d), reaeration (K_a) and total removal of the BOD (K_r) were adjusted. , using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) methodology, using statistical software Statgraphics using the Monte Carlo simulation tool.

Finally, the QUAL2K program was used to carry out the simulation of water quality, making use of the data taken in the estuary and the calibrated constants.

Keywords: Water quality, Dissolved oxygen, Biochemical Oxygen Demand, Streeter-Phelps, Qual2k, Calibration, Validation, GLUE methodology, Monte Carlo algorithm

CONTENIDO

Introducción.....	1
CAPÍTULO I.....	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Problematización.....	3
1.1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1.1. Diagnóstico.....	3
1.1.1.2. Pronóstico	4
1.1.2. Formulación del problema	4
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. Calidad del agua.....	9
2.1.2. Contaminación del agua	9
2.1.2.1. Tipos de contaminación.....	10
2.1.2.2. Fuentes puntuales	10
2.1.2.2. Fuentes difusas	10
2.1.3. Origen de la contaminación	10
2.1.3.1. Natural	10
2.1.3.2. Antropogénico	11
2.1.3.3. Urbano o doméstico.....	11

2.1.3.4.	Actividad productiva agrícola y ganadera	11
2.1.3.5	Otras	11
2.1.4.	Efectos de la contaminación del agua.....	12
2.1.5.	Parámetros de la calidad del agua	12
2.1.5.1.	Parámetros físicos.....	12
2.1.5.1.1.	Temperatura.....	12
2.1.5.1.2.	Sabor.....	12
2.1.5.1.3.	Olor.....	13
2.1.5.1.4.	Color.....	13
2.1.5.1.5.	Turbidez.....	13
2.1.5.1.6.	Sólidos	13
2.1.5.1.7.	Conductividad eléctrica	13
2.1.5.2.	Parámetros químicos	13
2.1.5.2.1.	pH	14
2.1.5.2.2.	Alcalinidad	14
2.1.5.2.3.	Dureza.....	14
2.1.5.2.4.	Oxígeno disuelto.....	14
2.1.5.2.5.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	14
2.2.	Modelos de calidad del agua.....	14
2.2.1.	Modelo de Streeter-Phelps	15
2.2.2.	Programa QUAL-2K	15
2.2.3.	Programa Water Quality Analysis Modeling System (WASP)	16
2.2.4.	Calibración de modelo de la calidad del agua.....	16
2.3.	Marco referencial	17
CAPÍTULO III		21
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		21
3.1.	Localización.....	22

3.1.1.	Condiciones edafoclimáticas.....	23
3.1.1.1.	Altitud.....	23
3.1.2.	Temperatura.....	23
3.1.3.	Precipitación.....	23
3.1.4.	Suelo.....	23
3.2.	Tipo de investigación.....	24
3.2.1.	Investigación exploratoria.....	24
3.3.	Métodos de investigación.....	24
3.3.1.	Método analítico.....	24
3.3.2.	Método inductivo.....	25
3.4.	Fuentes de recopilación de información.....	25
3.5.	Diseño de la investigación.....	25
3.5.1.	Determinación de las características hidrodinámicas del estero El Limón..	25
3.5.2.	Caracterización de la calidad del agua del estero El Limón.....	26
3.5.3.	Modelizar la calidad del agua en el estero El Limón con el modelo matemático de Streeter-Phelps.....	29
3.5.4.	Simular con programas de computadora la calidad del agua del estero El Limón.....	32
3.6.	Instrumentos de investigación.....	32
3.6.1.	Hojas de cálculo para caudales.....	32
3.6.2.	Hojas de calibración de Stacgraphics.....	33
3.7.	Tratamiento de datos.....	33
3.8.	Recursos materiales y equipos.....	34
3.8.1.	Materiales y equipos.....	34
CAPÍTULO IV.....		35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		35
4.1.	Resultados de la investigación.....	36
4.1.1.	Características hidromorfológicas del estero El Limón.....	36

4.1.1.1.	Caudal.....	36
4.1.1.2.	Velocidad de corriente.....	38
4.1.1.3.	Profundidad del cauce	39
4.1.2.	Caracterizar la calidad del agua del estero El Limón.....	40
4.1.2.1.	Oxígeno disuelto.....	40
4.1.2.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	42
4.1.2.3.	pH	43
4.1.2.4.	Conductividad eléctrica	45
4.1.3.	Modelización de la calidad del agua con el modelo de Streeter-Phelps	46
4.1.3.1.	Constantes cinéticas.....	46
4.1.3.1.1.	Constante de reaireación (Ka)	46
4.1.3.1.2.	Constante de desoxigenación (Kd).....	47
4.1.3.1.3.	Constante de remoción total de la DBO (Kr)	47
4.1.3.2.	Comportamiento del Oxígeno Disuelto y la Demanda Bioquímica de Oxígeno	48
4.1.3.2.1.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de Febrero.....	48
4.1.3.2.2.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de Marzo	51
4.1.3.2.3.	Comportamiento del OD y la DBO en el mes de Abril.....	54
4.1.3.2.4.	Análisis de rendimiento	56
4.1.4.	Simulación de la calidad del agua del estero El Limón con QUAL2K.....	58
4.1.4.1.	Simulación del OD y la DBO en el mes de Febrero.....	58
4.1.4.2.	Simulación del OD y la DBO en el mes de Marzo.....	60
4.1.4.3.	Simulación del OD y la DBO en el mes de Abril.....	61
4.1.4.4.	Análisis de rendimiento	62
4.2.	Discusión de resultados.....	64
CAPÍTULO V		66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		66

5.1.	Conclusiones	67
5.2.	Recomendaciones	69
CAPÍTULO VI		70
BIBLIOGRAFÍA		70
6.1.	Bibliografía	71
CAPÍTULO VII.....		74
ANEXOS		74
7.1.	Reporte de laboratorio.....	75
7.2.	Hoja de Caudales	75
7.3.	Hoja del Modelo Streeter-Phelps	81
7.4.	Hoja de Stacgraphics.....	84
7.5.	Hoja de QUAL2K	86
7.6.	Fotografías	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipos utilizados para la medición de parámetros físicos y químicos básicos ..	27
Tabla 2. Modelo de preservación de la muestra	28
Tabla 3. Coordenadas UTM de los puntos de Monitoreo.....	28
Tabla 4. Fórmulas y rangos de profundidad y velocidad utilizados para estimar K_a	31
Tabla 5. Análisis de rendimiento	34
Tabla 6. Materiales y equipos utilizados en la investigación	34
Tabla 7. Caudales medidos en litros/segundo (l/s) de la estación lluviosa.....	36
Tabla 8. Velocidad de la corriente en metros/segundo (m/s) del estero El Limón.....	38
Tabla 9. Profundidad del cauce del estero El Limón en metros (m).	39
Tabla 10. Valores de oxígeno disuelto en miligramos/litro (mg/l) para las diez puntos de muestreo.	40
Tabla 11. Valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) del estero Limón en mg/l.....	42
Tabla 12. Valores de pH en el estero El Limón.....	44
Tabla 13. Conductividad eléctrica en el estero El Limón en microsiemens/centimetro ($\mu\text{S/cm}$).....	45
Tabla 14. Resultados de los valores calculados y calibrados de la constante de reaireación (K_a)	46
Tabla 15. Valores calculados y calibrados de la constante de desoxigenación (K_d)	47
Tabla 16. Resultados de los valores calculados y calibrados de la constante de remoción total (kr)	47
Tabla 17. Características de aguas arriba, tributarios y descarga principal.....	48
Tabla 18. Condiciones iniciales de los tramos	48
Tabla 19. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno	50
Tabla 20. Características de aguas arriba, tributarios y descarga principal en el mes de Marzo.....	51
Tabla 21. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de Marzo	51
Tabla 22. Error relativo del OD y la DBO del mes de Marzo, en %	53
Tabla 23. Características de la cabecera, descarga y tributarios en el mes de Abril	54
Tabla 24. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de Abril	54
Tabla 25. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica del mes de Abril en %	56
Tabla 26. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto al OD.....	57
Tabla 27. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto a la DBO.	58
Tabla 28. Rendimiento del modelo de QUAL2K con respecto al OD	63
Tabla 29. Rendimiento del modelo de QUAL2K con respecto a la DBO.....	63

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Promedio de la variación de la corriente principal del estero El Limón	37
Gráfico 2. Velocidad de la corriente del estero El Limón en m/s.....	38
Gráfico 3. Variación de la profundidad en el estero El Limón en metros.	40
Gráfico 4. Promedios del OD en el estero El Limón.....	41
Gráfico 5. Promedios de la DBO ₅ en el estero El Limón.	43

Gráfico 6. Promedios del pH del estero El Limón	44
Gráfico 7. Variación de la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$	45
Gráfico 8. Perfil de la OD del mes de Febrero	49
Gráfico 9. Perfil de la DBO del mes de Febrero	50
Gráfico 10. Perfil del OD del mes de Marzo	52
Gráfico 11. Perfil de DBO del mes de Marzo	53
Gráfico 12. Perfil del OD del mes de Abril	55
Gráfico 13. Perfil de DBO del mes de Abril	56
Gráfico 14. Simulación del OD con QUAL2K del mes de Febrero.....	59
Gráfico 15. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de Febrero	59
Gráfico 16. Simulación del OD con QUAL2K del mes de Marzo.....	60
Gráfico 17. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de Marzo	61
Gráfico 18. Simulación del OD con QUAL2K del mes de Abril.....	61
Gráfico 19. Simulación de la DBO con QUAL2K del mes de Abril	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del lugar de estudio	22
Figura 2. Mapa de localización del lugar de estudio.....	29
Figura 3. Curva sag de oxígeno disuelto en corrientes de agua superficial	30
Figura 4. QUAL2K.....	32

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Reporte del laboratorio químico Marcos de análisis de DBO	75
Anexo 2. Caudal aguas arriba, campaña 6.	76
Anexo 3. Caudal tributario 1, campaña 6.....	76
Anexo 4. Caudal tramo 1, campaña 6	77
Anexo 5. Caudal tributario 2, campaña 6.....	77
Anexo 6. Caudal tramo 2, campaña 6	78
Anexo 7. Caudal tributario 3, campaña 6.....	78
Anexo 8. Caudal tramo 3, campaña 6	79
Anexo 9. Caudal tributario el Gallo, campaña 6	79
Anexo 10. Caudal tramo 4, campaña 6	80
Anexo 11. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Febrero	81
Anexo 12. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Marzo.	82
Anexo 13. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Abril.	83
Anexo 14. Statgraphics mes de Febrero, tramo 1	84
Anexo 15. Statgraphics mes de Febrero, tramo 2.	84
Anexo 16. Statgraphics mes de Febrero, tramo 3.	85
Anexo 17. Statgraphics mes de Febrero, tramo 4.	85
Anexo 18. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero	86
Anexo 19. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero	86
Anexo 20. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero	87
Anexo 21. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero	87

Anexo 22. Aforo en el punto de muestreo tramo uno.	88
Anexo 23. Toma de datos en la descarga del botadero de basura.	88
Anexo 24. Aforo en el punto de muestreo tramo uno.	89
Anexo 25. Toma de muestra de agua en el tributario dos	89
Anexo 26. Aforo en el punto de muestreo tramo dos.....	90
Anexo 27. Aforo en el tributario tres.	90
Anexo 28. Toma de muestra de agua en el punto de muestreo tramo tres.....	91
Anexo 29. Aforo en el tributario el Gallo.	91
Anexo 30. Toma de muestra de agua en el punto de muestreo tramo 4.....	92
Anexo 31. Análisis de muestras en laboratorio de suelos y aguas.....	92

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Modelización de la calidad del agua del estero El Limón, cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, estación lluviosa, año 2018-2019				
Autor:	Maybe Liliana Pérez Párraga				
Palabras clave:	Calidad de agua	Oxígeno disuelto	Demanda bioquímica de oxígeno	Streeter-Phelps	QUAL2K
	Calibración	Validación,	Metodología GLUE	Algoritmo de Monte Carlo	
Fecha de publicación:					
Editorial:					
Resumen:	<p>Resumen. - 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 Limón, perteneciente al Cantón Quevedo provincia de los Ríos en los meses de la época lluviosa Febrero, Marzo y Abril, con el fin de modelizar la calidad su agua, evaluando el las concentraciones del oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el estero, para lo cual se cumplió con los siguientes objetivos propuestos: (1) determinar las características hidromorfológicas del estero, (2) caracterizar la calidad del agua del estero El Limón, (3) modelizar la calidad del agua con el modelo Streeter-Phelps, y, (4) simular la calidad del agua con el software de QUAL2K.</p> <p>La caracterización se realizó a través de los parámetros físico-químicos que fueron: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura (°C) , potencial de hidrógeno (pH), y conductividad eléctrica (CE) en los nueve diez de muestreo, que fueron: aguas arriba, tramo 1, tramo 2, tramo 3, tramo 4, una descarga y cuatro riachuelos tributarios. La calibración y modelación se llevó a cabo a través de las expresiones matemáticas del modelo de Streeter-Phelps, para calibrar el modelo se ajustaron las constantes cinéticas de desoxigenación (K_d), reaireación (K_a) y de remoción total de la DBO (K_r), empleando la metodología Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), utilizando el software estadístico Statgraphics mediante la herramienta de simulaciones Monte Carlo.</p> <p>Finalmente se utilizó el programa QUAL2K para llevar a cabo la simulación de la calidad del agua, haciendo uso de los datos tomados en el estero y las constantes calibradas.</p>				
Descripción:					
URI:	<u>(en blanco hasta cuando se dispongan los repositorios)</u>				

Introducción

El agua es un recurso vital utilizado por todo ser viviente en la Tierra, indispensable para el bienestar y la salud humana, así como para la preservación del medio ambiente. El uso de los recursos hídricos va más allá de las necesidades básicas del ser humano, se ha convertido en un bien muy preciado por su escasez, es un sustento de la vida y además el desarrollo económico está sujeto a la disponibilidad de agua (1).

La disponibilidad de agua dulce es uno de los grandes problemas que se plantean hoy en el mundo y en algunos aspectos el principal, porque las dificultades conexas afectan la vida de muchos millones de personas. Durante los próximos 50 años, los problemas relacionados con la falta de agua o la contaminación de masas de agua afectarán prácticamente a todos los habitantes del planeta (2).

El Ecuador es uno de los países con una gran tasa de crecimiento poblacional, y existe una tendencia de concentración urbana cada vez más evidente, este crecimiento a través del tiempo genera la consecuente producción de desechos de variada composición directamente vinculados con el uso dado, pudiendo ser de naturaleza mineral, orgánica y microorganismos patógenos, que contaminan el suelo y finalmente llegan a cursos de agua, contaminando el agua de abastecimiento (3).

Esta situación se da con la complicidad del Estado, organismos nacionales, gobiernos regionales y locales, desde lo público, y usuarios, desde lo privado, quienes de una u otra forma por acción u omisión se han convertido en cómplices de un proceso que tiene entre sus aristas más difíciles: la indiferencia y la invisibilidad del problema mismo. La magnitud del problema, los costos de las soluciones y la falta de una agenda clara de exigencia y cumplimiento, han impedido o han restringido el hacer frente a este duro reto (4).

En Quevedo las cuencas de sus ríos deben asegurar la cantidad y calidad de vida de la población dentro de este sistema territorial, sin embargo esta ciudad no tiene un sistema de tratamientos de aguas residuales, haciendo que los vertidos vayan directamente a los cauces, lo que produce cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (5).

Por ende, este proyecto de investigación busca identificar la calidad de agua del estero “El Limón” en el sector la Baldramina, mediante el uso de un modelo matemático Streeter-Phelps, que brindará información sobre la capacidad de renovación que tiene el sitio en estudio

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problematización

1.1.1. Planteamiento del problema

Desde hace muchos años los ríos han sido utilizados como sumideros para los desechos urbanos, gracias a los volúmenes de agua que transportan y al movimiento de las mismas, los ríos son capaces de regenerarse por sí mismos, neutralizando los efectos de las grandes cantidades de aguas residuales industriales, domésticas, agrícolas, etc. que reciben sin embargo, frecuentemente las descargas de agua contaminada superan la capacidad de auto regeneración y los ríos se deterioran (6).

El cantón Quevedo no es la excepción a esta problemática ambiental, ya que sus fuentes hídricas soportan fuerte impacto de la contaminación, debido a que la disposición final de sus residuos se realiza en un botadero a cielo abierto ubicado en la Vía Babahoyo, los impactos ambientales negativos generados por las actividades son varios entre ellos la contaminación directa del estero Limón y luego el río Quevedo a donde desemboca (5).

Las aguas descargadas desde el botadero contienen elevadas cantidades de materia orgánica que provocan el agotamiento del oxígeno disuelto y que trae como consecuencia la alteración de los ecosistemas, olores desagradables, mal aspecto físico y pérdida de diversidad. En ese contexto es necesario seguir fortaleciendo las leyes y que promuevan un lado ambiental más amable, reduciendo el impacto y a la vez tratar de remediar lo ya causado; en lo que es evidente hacer un estudio de la calidad del agua.

1.1.1.1. Diagnóstico

El estero El Limón, cuya ubicación lo hace pertenecer a la red hídrica del cantón Quevedo, ubicado en la vía San Carlos atraviesa por el sector la Baldramina y es aquí donde se encuentra su principal fuente contaminante, el vertederos de basura a cielo abierto, lugar de recepción del servicio de recolección de basura proveniente del área rural y urbana de Quevedo y de los cantones como Valencia, Mocache, Buena Fe, Quinsaloma y El Empalme.

Los desechos acumulados en el botadero, continúan su proceso de descomposición, las reacciones químicas y biológicas interrelacionadas producen lixiviados que deben ser captados y tratados antes de ser descargados, si no se proporciona el tratamiento adecuado significaría una fuente de contaminación potencial.

Se presume que este es el problema que afecta al estero El Limón, sea por filtración o descarga, los lixiviados que se generan han provocado cambios negativos bastante apreciables a simple vista en la calidad del agua del estero, toma características diferentes entre estas mal olor del agua, coloración, aspecto estético alterado, materia orgánica flotante y tendientes a contaminación alta, cuyo cauce finaliza en la desembocadura en el río Quevedo, y por ende con condiciones negativas de contaminación.

1.1.1.2. Pronóstico

Considerando que el estero El Limón se encuentra altamente contaminado, si no se toman pronto medidas correctivas su contaminación aumentará, por sus características biológicas, físicas y químicas podría llegar a ser un cuerpo de agua de agua con una nula utilidad para las personas y también para los ecosistemas acuáticos por deficiencia de oxígeno disuelto, fundamental para preservar la vida acuática.

Además puede convertirse en una fuente idónea para la propagación de parásitos, bacterias e insectos portadores de enfermedades que pueden afectar a las personas cercanas a este cuerpo de agua, por esto surge la siguiente interrogante:

¿Cuál será la calidad del agua del estero El Limón de la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos, en época lluviosa, si se obtiene un bajo porcentaje de autodepuración de aguas residuales?

1.1.2. Formulación del problema

¿Es eficaz la evaluación y predicción del impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del agua del estero El Limón 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 Limón?

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

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

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

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Modelizar la calidad del agua del estero El Limón de la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos, en la estación lluviosa.

1.2.2. Objetivos específicos

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

1.3. Justificación

A través de los años la contaminación se ha convertido en un problema visible y cotidiano, las actividades industriales de distinto orden y las aguas servidas que se arrojan desde las ciudades sin ningún tratamiento, son las mayores fuentes de contaminación de los recursos hídricos. A excepción de pocas ciudades que disponen de rellenos sanitarios controlados con un adecuado manejo de lixiviados, una de las prácticas comunes es la utilización de quebradas o cauces de ríos, para disposición final de residuos sólidos, sin ningún control para confinar los desechos ni tampoco un manejo adecuado de los lixiviados, que se escurren libremente hacia cuerpos receptores, lo que significa una fuente de contaminación de agua de extrema peligrosidad (3).

La evaluación de la cantidad y calidad de agua disponible es un prerrequisito para el desarrollo y administración del recurso hídrico, sin información sobre el estado del agua resulta imposible la planificación y la gestión del recurso hídrico, es de suma importancia evaluar la contaminación del agua, a definir el grado de contaminación y su consiguiente calidad para que no sea nociva para la salud humana o ambiental, de acuerdo a criterios de referencia y normas (7).

El estero El Limón es un cuerpo de agua altamente contaminado por las actividades humanas, por ello es importante incrementar y fomentar el estudio de la calidad del agua para generar información oportuna sobre su estado; la utilización de herramientas en modelos matemáticos es de gran utilidad para determinar el grado de renovación que tiene el cuerpo de agua, ofreciendo datos confiables que a la vez contribuyan a la búsqueda de soluciones con la finalidad de recuperar y conservar los recursos hídricos.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA
INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Calidad del agua

La calidad del agua hace referencia a las características físicas químicas y biológicas y se puede evaluar a partir de estas variables de manera grupal o individual, los parámetros fisicoquímicos aportan información de las especies químicas presentes en el agua y sus características físicas, mientras que los biológicos aportan información de la vida acuática (8).

El índice de calidad del agua se desarrolla como una expresión simple en la unión de diferentes parámetros que reflejan el estado consecuente de la calidad del agua, también siendo favorable en su fácil lectura en contraste a una larga lista de valores numéricos que representen el cuerpo de agua. Las aguas de buena calidad pueden anidar una gran diversidad especies y son apropiadas para recreación y potabilización (9).

2.1.2. Contaminación del agua

Se entiende por contaminación del agua a la acción o al efecto de introducir algún material o inducir condiciones sobre el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación a sus usos posteriores o sus servicios ambientales (10).

El agua es un recurso natural renovable, sin embargo puede llegar a estar contaminada por las actividades antropogénicas que dejar de ser útil para las necesidades y se convierte en nociva (9).

El hombre debe disponer de agua natural y limpia para proteger su salud. El agua se considera contaminada cuando su composición o estado no reúne las condiciones requeridas para los usos a los que se hubiera destinado en su estado natural. En condiciones normales disminuye la posibilidad de contraer enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea, la disentería y las enfermedades diarreicas; esta última es la principal causa de mortalidad de los niños de 1 a 4 años (10).

El crecimiento de la industrialización, de la urbanización y de la población humana acrecienta los problemas de contaminación y en consecuencia el suministro de agua potable y el tratamiento de las aguas cloacales (10).

El agua es el elemento vital para la alimentación, higiene y actividades del ser humano, la agricultura y la industria. Por eso, las exigencias higiénicas son más rigurosas con respecto a las aguas destinadas al consumo de la población, exigencias que están siendo cada vez menos satisfechas por su contaminación, lo que reduce la cantidad y calidad del agua disponible, como también sus fuentes naturales (10).

2.1.2.1. Tipos de contaminación

Atendiendo al modo en el que la contaminación se produce, podemos distinguir entre contaminación difusa y contaminación puntual:

2.1.2.2. Fuentes puntuales

Es la descarga de agentes contaminantes en lugares específicos en los cuerpos de aguas superficiales, su detección y eliminación pueden ser más sencillos, un ejemplo de contaminación puntual sería el vertido de aguas residuales industriales o domésticas a través de tuberías o de alcantarillas (7).

1.1.1.2 Fuentes difusas

Es aquella que no se localiza en un solo sitio de descarga. Tal es el caso de la contaminación agrícola y ganadera, que transporta contaminantes a lo largo de los ríos y en áreas de grandes superficies. La contaminación difusa es difícil de controlar ya que sus causantes se encuentran dispersos en grandes extensiones (7).

2.1.3. Origen de la contaminación

En función del origen del vertido, también existen diferentes tipos de contaminación de aguas:

2.1.3.1. Natural

Dependiendo de los terrenos que atraviesa el agua puede contener componentes de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo (Ej. Sales minerales, calcio, magnesio, hierro etc.). Aunque pueden ser nocivos para la salud, en general son sustancias que se pueden identificar fácilmente y eliminar (11).

La contaminación de las aguas se da por causas naturales por contacto con el medio que las rodea, está dependiendo su origen o causa puede ser perjudicial para la salud, pero pueden ser tratadas para su descontaminación (11).

2.1.3.2. Antropogénico

La contaminación artificial es la que mayor impacto ambiental produce, se da: “Como consecuencia de las actividades humanas. El desarrollo industrial ha provocado la presencia de ciertos componentes que son peligrosos para el medio ambiente y para los organismos y difíciles de eliminar” (11).

A partir de la revolución industrial, la contaminación se incremento de manera desmedida, llegando en la actualidad a niveles extremos, haciendo que sean de preocupación mundial, plasmada en normativa internacional para que esta industrialización se realice sin afectar tanto el medio ambiente y los ecosistemas (11).

2.1.3.3. Urbano o doméstico

La contaminación de aguas de origen urbano se puede decir que es esencialmente de tipo orgánica y biológica, cuyo origen es debido a la existencia de fosas sépticas, pozos negros, alcantarillado, y vertederos, entre otros. Además de los anteriores contaminantes se debe añadir la presencia de productos químicos de tipo doméstico (detergentes, plaguicidas) y los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (12).

2.1.3.4. Actividad productiva agrícola y ganadera

Las actividades agrícolas contaminan el agua con nutrientes, pesticidas, sedimentos, minerales y patógenos que provienen de los agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes químicos) y de la aplicación de estiércoles a los cultivos. El agua de riego constituye el medio más eficiente de transporte de contaminantes agrícolas hacia los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, a los cuales llega por procesos de escorrentía, lixiviación, filtración y deposición atmosférica (13). Esta contaminación se caracteriza por ser dispersa y por tanto es más difícil de controlar (7).

2.1.3.5. Otras

Otras fuentes de contaminación de origen Antropogénico son:

- ❖ Los vertederos de residuos, tanto urbanos como industriales
- ❖ La contaminación por restos de combustibles, como lubricantes, anticongelantes, asfaltos, todos ellos derivados de las infraestructuras y el empleo del automóvil
- ❖ La contaminación del agua por fugas en conducciones y depósitos de carácter industrial (10).

2.1.4. Efectos de la contaminación del agua

Los efectos de la contaminación son muy diversos y dependen de los elementos contaminantes. Entre los efectos más comunes podemos citar las afectaciones a la salud humana con el incremento de enfermedades, la afectación a la salud ambiental con la ruptura del equilibrio ecológico, la disminución y/o desaparición de la vida acuática, el deterioro de la calidad del agua para diferentes fines (consumo humano, agrícola, recreativo entre otros) (7).

2.1.5. Parámetros de la calidad del agua

A continuación se presentan los indicadores que se requieren para evaluar los índices de calidad de agua:

2.1.5.1. Parámetros físicos

2.1.5.1.1. Temperatura

Se entiende por temperatura a la energía cinética de las partículas de una sustancia, que en nuestro caso es el agua. La temperatura de una corriente varía de acuerdo con las estaciones del año y según sea el valor de ella se producen variaciones en el plancton (todos los microorganismos vivos que se encuentran en suspensión) del río (14).

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles (6).

2.1.5.1.2. Sabor

Indica también el grado de normalidad del agua –sin embargo puede no tener ningún sabor y estar contaminada. Con el olor constituye el primer motivo para aceptar o rechazar el agua. No debe ser desagradable para el consumidor (7).

2.1.5.1.3. Olor

Los olores del agua se deben a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica o de sustancias en suspensión, y por lo tanto vale describir el olor del agua. Un agua normal tiene un olor fresco, soportable o ningún olor. En cambio, aguas en estado de septicidad tienen olores desagradables, como a huevo podrido que indica la presencia de ácido sulfhídrico desde la reducción de sulfitos y sulfatos (7).

2.1.5.1.4. Color

Se debe a la existencia de sustancias disueltas en el agua, de naturaleza orgánica, relacionadas con el humus del suelo (compuestos responsables del color llamados por consiguiente sustancias húmicas), con contaminación de efluentes industriales, u otra (7).

2.1.5.1.5. Turbidez

Es un estimador simple de los sólidos en suspensión. Se aplica a las aguas que contienen materia en suspensión en tal medida que interfiere con el paso de la luz a través del agua. A mayor penetración de la luz solar en la columna de agua, es menor la cantidad de sólidos o partículas en suspensión en la columna de agua y viceversa, está relacionado con el uso del suelo, tipo de suelos, cobertura del suelo, y periodos de muestreos, entre otros (15).

2.1.5.1.6. Sólidos

Están constituidos por la materia flotante (plásticos, madera, vegetales, animales, cadáveres, otros), material sedimentable, coloidal y en suspensión. Este parámetro es de mayor importancia, sirve para el dimensionamiento y control de unidades de tratamiento (7).

2.1.5.1.7. Conductividad eléctrica

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas así como de la temperatura de medición. Cuanto mayor sea la concentración de iones mayor será la conductividad (6).

2.1.5.2. Parámetros químicos

En cuanto a las características químicas las enumera y describe de la siguiente forma:

2.1.5.2.1. pH

El pH es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia, controla muchas reacciones químicas el rango de pH para la vida biológica es muy estrecho y crítico, se considera como un rango adecuado un valor comprendido entre 6 y 8 (7).

2.1.5.2.2. Alcalinidad

Es la medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Por lo general está presente en las aguas naturales como equilibrio de carbonatos y bicarbonatos con el ácido carbónico (7).

2.1.5.2.3. Dureza

Se define como la suma de los cationes polivalentes expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio. Los más comunes son de calcio y de magnesio, está ligada a otros parámetros como el pH y la alcalinidad (7).

2.1.5.2.4. Oxígeno disuelto

Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua pueden indicar contaminación (materia orgánica y/o actividad bacteriana). Se prefiere agua con una concentración de oxígeno cercano al punto de saturación (7).

2.1.5.2.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se define como la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para estabilizar la materia orgánica carbonosa que existe en una muestra. La cantidad de oxígeno consumida es proporcional (de primer orden) a la materia orgánica metabolizada: cuanto mayor es el grado de contaminación orgánica, mayor es el valor de la DBO. Este ensayo se hace en un tiempo de 5 días y a temperatura normalizada de 20°C. De acuerdo a la normatividad actual, la DBO debería llegar a valores entre 20 y 30 mg/L (7).

2.2. Modelos de calidad del agua

“Un modelo es una representación formal de la realidad que pretendemos describir, analizar y comprender. Los modelos de calidad de agua son relaciones matemáticas que posibilitan la compresión y cuantificación de las relaciones causa-efecto de los procesos físicos, químicos y biológicos de los compuestos descargados en los cuerpos de agua

receptores, tales como ríos, lagos y estuarios. Más importante aún, estos modelos pueden ser utilizados en la evaluación de las distintas alternativas para mejorar la calidad del agua” (16).

2.2.1. Modelo de Streeter-Phelps

En los Estados Unidos el mayor esfuerzo para la evaluación de la calidad del agua comenzó en 1912, cuando al Servicio de Salud Pública se le encomendó por parte del congreso la dirección de los trabajos y estudio sobre el saneamiento y aguas residuales, incluyendo la contaminación directa o indirecta, en los ríos navegables y lagos de Estados Unidos; los estudios en el río Ohio realizados entre 1914 y 1916, permitieron la realización del fundamental trabajo de Harold Streeter y Earle Phelps sobre modelización matemática del OD, el trabajo incluía la aplicación de una sencilla formulación matemática de los principales procesos asociados con el oxígeno disuelto en un río (17).

El modelo de Streeter y Phelps consiste en un modelo matemático que relaciona los dos principales mecanismos que definen el oxígeno disuelto en un cauce de agua superficial que recibe la descarga de aguas residuales, estas son la descomposición de materia orgánica, y aireación de oxígeno. Este modelo ha sido adaptado tanto para fuentes puntuales como para fuentes difusas o dispersas, el modelo requiere de datos hidráulicos y calidad del agua para su realización, los hidráulicos son área, profundidad o calado, caudal y la velocidad del río, y los datos sobre calidad son temperatura, Coliformes, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y oxígeno disuelto (OD) (18).

2.2.2. Programa QUAL-2K

El modelo dinámico unidimensional Qual2k, simula la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, asume zonas anóxicas y tramos longitudinalmente heterogéneos, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas. La EPA, (U.S. Environmental Protection Agency), lo aprobó en el 2007, se realizaron una serie de simulaciones en el arroyo “Southampton” Condado de Montgomery y Bucks, en Pennsylvania, USA en el 2008 (19).

El modelo presenta características útiles para la simulación de los ríos y quebradas de montaña, a continuación se detallan algunas de sus cualidades (19).

- Modelación en una sola dimensión (1D), en estado estacionario y con flujo no uniforme.

- Simula el cauce bien mezclado lateral y verticalmente.
- Simula el ingreso de fuentes puntuales y difusas.
- Simula las concesiones de agua como salidas puntuales y difusas.
- Simula la diagénesis y el flujo hiporreico.
- Permite la discretización espacial con tramos de diferentes longitudes.
- Simula las dos formas de oxidación de la materia orgánica carbonosa: rápida (DBOC5) y lenta (DBOC20 o DBOCultima).
- Simula la anoxia.
- Simula las bacterias (Coliformes totales o fecales)

2.2.3. Programa Water Quality Analysis Modeling System (WASP)

El modelo WASP desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos nos permite analizar y predecir las respuestas de calidad de agua a los fenómenos naturales y a la contaminación artificial que sufren los cuerpos de agua. Es un modelo que permite simular el comportamiento dinámico de un sistema acuático, incluyendo la columna de agua y los bentos. Este modelo permite analizar sistemas en 1, 2 y 3 dimensiones y para un variado número de contaminantes (20).

Los tres componentes del modelo son: WASP para el transporte de masas; EUTRO de oxígeno disuelto, nutrientes y cinéticas de algas; y TOXI para sustancias tóxicas. WASP es capaz de realizar un análisis en tiempo variable o estado estacionario y en una, dos o tres dimensiones. Además las nuevas versiones poseen un módulo para análisis de mercurio y de calor (20).

2.2.4. Calibración de modelo de la 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 (21).

2.3. Marco referencial

Pazmiño, Zambrano, & Hevert llevaron a cabo el estudio del impacto de la descarga de aguas residuales en el comportamiento del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el estero Aguas Claras del cantón Quevedo, la simulación fue efectuada en tres tramos de la corriente, por medio del modelo de Streeter-Phelps y el programa QUAL2K. Los modelos se calibraron ajustando las constantes de reaeración (K_a), desoxigenación (K_d) y remoción total (K_r), empleando la metodología GLUE (Estimación de la probabilidad de incertidumbre generalizada), a través de simulaciones de Monte Carlo. El análisis de rendimiento determinó valores promedio del coeficiente de determinación R^2 y del coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,99, revelando un buen ajuste del modelo de Streeter-Phelps. El ajuste para QUAL2K fue sensiblemente inferior. El estudio sugiere una importante capacidad de autodepuración del estero por los altos valores de K_a y K_r (22).

Por otro lado Urrego realizó la determinación del comportamiento del oxígeno disuelto en la cuenca alta del río Tunjuelo en Colombia, el cual es uno de los ríos más extensos que atraviesa cinco localidades de la ciudad de Bogotá, desde los cerros orientales al vertimiento de sus aguas en el río Bogotá. La cuenca presenta problemas ambientales asociados a la contaminación por el vertimiento de aguas residuales, domésticas e industriales, en su recorrido. En este proyecto de investigación se determina el comportamiento del Oxígeno Disuelto (OD) en el cuerpo de la cuenca alta del agua del río Tunjuelo aplicando la ecuación de Streeter-Phelps. Como primera medida se hallan los valores de las constantes (K_1) y (K_2) usando las ecuaciones Streeter-Phelps, tomando los datos e información publicada por la Secretaria Distrital de Ambiente, la Universidad de los Andes y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. De acuerdo a datos resultantes se operan las ecuaciones matemáticas para generar la curva SAG y los valores característicos para calibrar el modelo QUAL2K. Se analizan las curvas resultantes en términos de calidad del agua (OD y DBO) y evidencia las concentraciones máximas obtenidas y las máximo permitidas, para la creación de escenarios que permitan la recuperación del río (23)

Para la modelización de la calidad del agua del Estero Macache en el cantón Quevedo de la Provincia de Los Ríos, Pazmiño y Vélez basaron su estudio en el modelo de Streeter-Phelps. La investigación se efectuó a través de la determinación de las características

hidromorfológicas (caudal en l/s). Así como, la estimación de 6 parámetros fisicoquímicos requeridos para el modelo matemático oxígeno disuelto (OD), demanda Bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura, pH, conductividad y turbidez. El diseño de la investigación consistió en monitorear cada quince días la calidad del agua durante el mes de diciembre del 2016 y enero del 2017. Obtenidos los resultados de caudal y concentraciones, se realizó la calibración del modelo de Streeter y Phelps con el método manual (ensayo y error) y del método automático, a través de la Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) (24).

Se realizó la simulación matemática de Streeter y Phelp, para conocer la capacidad de asimilación con la que cuenta el río Tejo ante las cargas contaminantes que son vertidas en este, como también el comportamiento que presenta el cauce con respecto a la concentración de oxígeno disuelto desde el vertimiento final (las ferias) hasta la confluencia del río tejo con el río algodonal (25).

También Pazmiño realizó el estudio del comportamiento del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el estero Atascoso, principal tributario del río Quevedo, para lo cual se cumplieron cuatro objetivos específicos: la determinación de las hidrodinámica y geometría característica del estero, la medición de las concentraciones de oxígeno disuelto y DBO, la aplicación del modelo de Streeter-Phelps, y la simulación de la calidad del agua con el programa QUAL2K de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Así, con datos de campo relacionados con la hidrodinámica y características fisicoquímicas del estero, se realizó la calibración del modelo de Streeter -Phelps tanto en la estación seca como en la lluviosa. La metodología de calibración empleada fue una combinación del método manual (ensayo y error) y del método automático, a través de la Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE). Luego, el modelo calibrado se validó con los datos registrados en un evento de máxima precipitación. Los resultados revelan que la constante de reaireación desempeña un papel fundamental en el comportamiento del oxígeno disuelto en el estero Atascoso, pues sus altos valores registrados determinan una gran capacidad de autodepuración de la corriente en los primeros tramos. Asimismo, la variación de la DBO se ve afectada de manera importante por el fenómeno de la sedimentación de materia orgánica, que se evidencia también en los altos valores calculados para la constante de remoción total de la DBO, k_r , de modo que se comprobó que, a pesar de las descargas de aguas servidas al estero, por tratarse de una corriente muy somera, en el Atascoso los niveles de DBO bajan

significativamente desde la cabecera producto del fenómeno descrito. Finalmente, el rendimiento del modelo de Streeter-Phelps para ajustar los valores de OD y DBO medidos en el campo, fue óptimo, tal como lo indican los valores del coeficiente de determinación y del índice de Nash- Sutcliffe, que se utilizaron como medidas de bondad del modelo. Por el contrario, en la simulación con QUAL2K no se obtuvo un buen ajuste, debido a la carencia de datos históricos sobre una mayor cantidad de parámetros requeridos. No obstante, el comportamiento modelizado del OD tuvo resultados cercanos a los determinados con Streeter-Phelps (26).

En otras investigaciones del Río Almendares realizadas por Domínguez, Borroto, y Hernández se exhibe un notable deterioro en la calidad de sus aguas. La modelación matemática es empleada a escala mundial en la evaluación del impacto, en la calidad del agua, de sistemas de tratamiento de efluentes industriales y urbanos y en general del manejo de los recursos hídricos. Los modelos son herramientas usadas en la planificación y evaluación de estrategias de saneamiento. En el trabajo se emplea para estos fines, el modelo de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de Streeter y Phelps. Este modelo unidimensional de estado permanente fue calibrado y validado anteriormente por los autores. El modelo conceptual o físico implícito en el modelo matemático divide en 11 segmentos a la sección comprendida entre el punto donde la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) “María del Carmen” vierte al río y el Puente del “Bosque de la Habana”. En los límites de cada segmento se consideran constantes los parámetros morfológicos e hidrodinámicos del río. Con ayuda del modelo se valora la influencia en el OD de la DBO de las descargas puntuales y dispersas que el río recibe en la sección estudiada. Así mismo se estudia la influencia del caudal base y del OD con que el Almendares arriba a la sección modelada. Finalmente se exploran tres estrategias de saneamiento de la zona que combinan acciones sobre los residuales que recibe y el caudal base (27).

Se obtuvo también resultados de Pazmiño y Toapanta que realizaron su investigación con el objetivo de modelizar la calidad del agua evaluando el comportamiento o variabilidad del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno en el estero El Limón en la época seca. Se realizó la modelización y calibración utilizando las expresiones matemáticas establecidas en el modelo de Streeter-Phelps, usando los datos que se obtuvieron, durante la fase de campo, en los meses de julio a octubre. La calibración del

modelo 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), a través de simulaciones Monte Carlo. Finalmente se realizó el análisis de rendimiento, donde se determinó el error estadístico entre los valores medidos en el campo con los valores predichos para el OD y DBO, se utilizó las ecuaciones de Nash-Sutcliffe y del coeficiente de determinación (R^2), que registraron un ajuste bueno para OD y DBO. En la aplicación del modelo QUAL2K, el resultado del análisis de rendimiento no fue tan favorable para la DBO debido a la falta de información necesaria para realizar un ajuste óptimo entre los valores registrados y los predichos por el modelo (28).

De acuerdo al estudio de la calidad de agua realizado en el Río Ndarugu por los autores Nyadawa, Hadgu, Mwangi, Kibetu y Mehari en el año 2014, se observó que el modelo del QUAL2K representaba satisfactoriamente los datos de campo, en este estudio se calibró el QUAL2K para confirmar los datos del monitoreo de campo que se realizó en el invierno del año 2009 y en la primavera del año 2010. Se evaluó el rendimiento del mismo utilizando estadísticas basadas en el coeficiente de correlación y el error estándar. De tal manera los resultados generados por el modelo QUAL2K mostraron una correlación entre los valores simulados y observados para todos los parámetros, mostrando un alto coeficiente de correlación y errores estándar más bajos, lo que nos muestra que este modelo es perfectamente confiable (29).

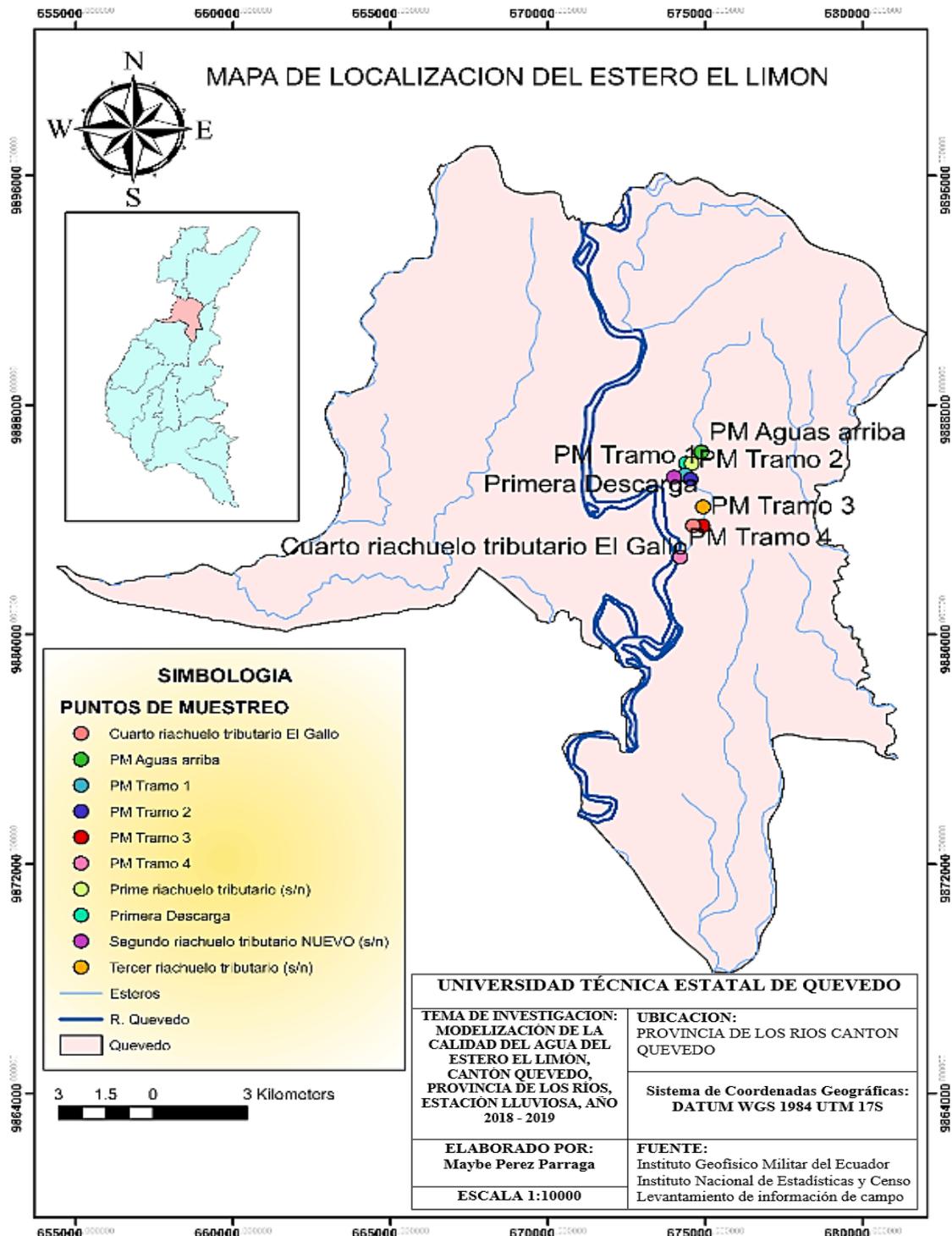
En el estudio de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay en la ciudad de Cuenca realizado por Cajas, se presenta una modelación de los parámetros más importantes de calidad de agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Coliformes y Oxígeno Disuelto (OD). Se utilizó un modelo matemático en Excel. Se realizaron dos muestreos en diferentes épocas del año (lluvia y sequía). El modelo matemático desarrollado, se basa en la ecuación de Streeter & Phelps: el mismo que ha permitido obtener el transporte de contaminantes puntuales a sitios de monitoreo continuo. Este modelo ha sido ya calibrado y verificado en estudios anteriores de manera que se pueda obtener valores confiables. Finalmente se obtuvieron valores de contaminación difusa de las principales variables de calidad de agua en el Río Tomebamba antes y después de la zona urbana de la ciudad de Cuenca. Con este proyecto se podrá tener una primera aproximación de valores de contaminación difusa en el río (18).

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización.

La investigación fue realizada en el estero “El Limón” perteneciente al Cantón Quevedo Provincia de Los Ríos, el estero inicia en el sector la Baldramina ubicado en la vía a Cañalito dentro de la hacienda El Bosque, continúa su recorrido hacia la Vía San Carlos y finaliza en la desembocadura al Río Quevedo.

Figura 1. Mapa de localización del lugar de estudio



3.1.1. Condiciones edafoclimáticas.

3.1.1.1. Altitud.

La altitud promedio de la superficie del cantón Quevedo es de 80 m.s.n.m. La mayor parte de la superficie del cantón se asienta sobre la llanura antigua de deposición, con superficies planas o ligeramente onduladas (5 –40 %). Además, se distinguen valles fluviales en donde se diferencian a lo largo de los ríos terrazas altas localmente colgantes y a lo largo principalmente del río Quevedo, y cauces abandonados (5).

En el territorio del cantón Quevedo predomina el ecosistema del Bosque Tropical Húmedo. Uno de los agentes que interviene en su formación es el clima Tropical Monzónico con la temporada de calor y lluvias fuertes que dura desde diciembre a mayo y la época seca en el período desde junio a diciembre (5).

3.1.2. Temperatura.

La temperatura promedio es de 25°C. La curva de distribución de la temperatura media multianual presenta su máximo en los meses de marzo-abril y su mínimo en los meses de julio-agosto. También es de carácter modal (5).

3.1.3. Precipitación.

La precipitación varía entre 1750 mm y 2500 mm. La curva de distribución anual de la precipitación es de carácter modal con un máximo en el mes de febrero y un mínimo en el mes de agosto. El flujo anual de la precipitación ocurre dentro de los siguientes términos: el 85-90% del total anual ocurre durante la época lluviosa, mientras que el 10-15% restante durante la época seca (5).

Durante los meses de lluvia el sol brilla con mayor intensidad, sin embargo la luminosidad varía entre 1,5 y 2,4 horas; mientras que la nubosidad por lo general alcanza valores altos como de 7 y 8 octavos (5).

3.1.4. Suelo

Los suelos de la zona son fértiles con buen drenaje interno, lo que explica su predominante uso agrícola para gran variedad de cultivos tanto de exportación, como de consumo. El principal tipo de suelo es derivado de cenizas volcánicas recientes con

texturas desde franco arenoso hasta arcillosa lo que explica su fácil erosión. A nivel de orden pertenecen a los Andisoles a la serie Pichilingue (5).

La erosión y pérdida de fertilidad son algunos de los problemas serios para el cantón donde más de 80% de la superficie tiene el uso agrícola. De esta más de 50% posee riesgo de erosión alta y 15% riesgo de erosión muy alto debido a varios factores: textura media y gruesa de los suelos, pendientes mayores a 10° y prácticas inadecuadas de uso (5).

3.2. Tipo de investigación.

3.2.1. Investigación exploratoria

Los estudios exploratorios se efectúan normalmente cuando el objetivo es examinar un tema o un problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes (30).

El objetivo de una investigación exploratoria es, como su nombre lo indica, examinar o explorar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado nunca antes. Por lo tanto, sirve para familiarizarse con fenómenos relativamente desconocidos, poco estudiados o novedosos, permitiendo identificar conceptos o variables promisorias, e incluso identificar relaciones potenciales entre ellas (31).

La investigación exploratoria fue aplicada en la investigación para reconocer la situación actual del campo en estudio es decir el estero el Limón, fue así que se pudieron identificar las descargas, se establecieron los tramos, y se reconocieron los puntos idóneos para realizar los aforos, toma de datos in-situ y muestreos.

3.3. Métodos de investigación.

3.3.1. Método analítico.

Es aquel, que distingue las partes de un todo y procede a la revisión ordenada de cada uno de los elementos por separado. Este método es útil cuando se llevan a cabo trabajos de investigación documental, que consiste en revisar en forma separada todo el acopio del material necesario para la investigación (32).

Con la ayuda de este método se pudo determinar las características hidromorfológicas del estero El Limón y a la vez se pudieron determinar las concentraciones que presentan los parámetros físicos y químicos para la utilización del modelo matemático.

3.3.2. Método inductivo.

Es el razonamiento mediante el cual, a partir del análisis de hechos singulares, se pretende llegar a leyes. Es decir, se parte del análisis de ejemplos concretos que se descomponen en partes para posteriormente llegar a una conclusión. En ello se asemeja al método analítico descrito con anterioridad. En suma las investigaciones científicas representan la síntesis de estudios y de investigaciones a lo largo de las cuales se van estableciendo conclusiones generales sobre determinados conocimientos (33).

Con este método se pudo conocer el comportamiento de las variables en la aplicación del modelo y describir la realidad en la que se encuentra el estero El Limón.

3.4. Fuentes de recopilación de información

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron fuentes para el aporte de información las mismas que se describen a continuación:

- Fuentes primarias: Entre las fuentes primarias destacan la obtención de muestras de agua del estero El Limón y de los parámetros físico-químicos que se utilizaron en la aplicación del modelo matemático de Streeter-Phelps.
- Fuentes secundarias: Como fuentes de información secundaria se utilizaron libros, artículos científicos, revistas científicas, normativa ecuatoriana y documentos en línea.

3.5. Diseño de la investigación

3.5.1. Determinación de las características hidrodinámicas del estero El Limón.

El cuerpo de agua en estudio, fue segmentado en un número determinado de tramos, los cuales constituyeron las unidades de modelización del cauce, incluyendo los puntos de muestreo, uno por cada tramo. 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 (34).

En cada una de las unidades de modelización se realizaron aforos quincenales, durante la estación lluviosa, en los meses de Febrero, Marzo y Abril del año 2019, logrando un total de seis campañas. Para la realización de los aforos en cada unidad de modelización se utilizó el método del flotador, en el que se determina el área de la sección transversal de la corriente, insertando dos estacas en el cauce con una longitud de 6 a 8m según las condiciones hidrodinámicas del punto de estudio (34).

Para determinar la velocidad del caudal, utilizó una pelota ligera, hojas o ramas halladas en sitio de estudio, con la ayuda de un cronometro se tomó el cálculo que necesitó el objeto para hacer su recorrido desde la sección superior hasta la sección inferior. De modo que el caudal en cada unidad de modelización se obtuvo multiplicando el área del cauce, por la velocidad de la corriente (34).

$$Q = A \times V$$

El área de la sección transversal fue calculada mediante la siguiente integral definida (34).

$$\int_{x_0}^{x_f} f(z) dz$$

donde, los límites inferior y superior de la integral (x_0 y x_f) son el inicio y el final de la anchura del cauce; y $f(z)$ es la curva resultante del ajuste de los diferentes datos de la profundidad que se midió en las secciones transversales de los tramos a modelados, o por regresión polinómica o por el método de interpolación de Newton (34).

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

Paralelamente a la realización de los aforos, se recolectaron muestras de aguas in situ en los 10 puntos de muestreo que fueron previamente identificados, es decir, aguas arriba, los cuatro tramos, la descarga principal y los cuatro tributarios. Siguiendo los criterios establecidos en la normativa INEN 2176:1998, INEN 2226:2000 e INEN 2169:1998, sobre manejo y conservación de muestras, técnicas de muestreo, y diseño de programas de muestreos. Además se realizaron análisis de parámetros físico-químicos básicos en los 10 puntos de estudio cada 15 días, durante los meses de Febrero, Marzo y Abril, obteniendo un total de 6 repeticiones, los parámetros que se analizaron fueron: oxígeno

disuelto (OD), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), y temperatura del agua ($^{\circ}$ T) (35) (36).

Las muestras de agua para el análisis de la DBO fueron llevadas en un periodo de 8 horas para ser analizadas al laboratorio de suelos y aguas 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 Milwaukee MW600 e instrumentos portátiles digitales marca Biocharge.

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

Tabla 1. Equipos utilizados para la medición de parámetros físicos y químicos básicos

Parámetro	Unidad de medida	Equipo de medición
Oxígeno disuelto	mg/l	Milwaukee MW 600.
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/O ₂ /l	Cabina de incubación OxiTop® Box
Temperatura	$^{\circ}$ C	Termómetro portátil Biocharge.
Conductividad eléctrica	μ S/cm	Equipo portátil Biocharge.
PH	-	Equipo portátil Biocharge

3.5.2.1. Recolección de muestras de agua.

Para las mediciones de oxígeno disuelto, temperatura, conductividad eléctrica, pH se realizó el procedimiento in situ en los diferentes puntos de muestro. Para toma la muestra de agua para el análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fue utilizado un envase de plástico de 1 litro con resistencia a entrada de la luz, el envase debe estar estéril y ser prelavado en el sitio de estudio, la muestra fue tomada a la mitad del cauce sumergiendo la botella hasta llenarla completamente, la botellas debe estar rotuladas con el distintivo del punto de muestreo, posteriormente son llevadas al laboratorio para realizar el análisis.

Tabla 2. Modelo de preservación de la muestra

Parámetro	Envase	Tamaño mínimo de muestra	Tipo de muestra	Preservación	Tiempo máximo de conservación Recomendado/Regulado
Demanda bioquímica de oxígeno	P o V (es preferible vidrio para concentraciones bajas de DBO)	250 ml	p, c	Refrigerar entre 2°C y 5°C, guardar en la oscuridad	24 horas

P = envase de plástico (polietileno o equivalente); V = envase de vidrio; p = puntual; c = compuesta

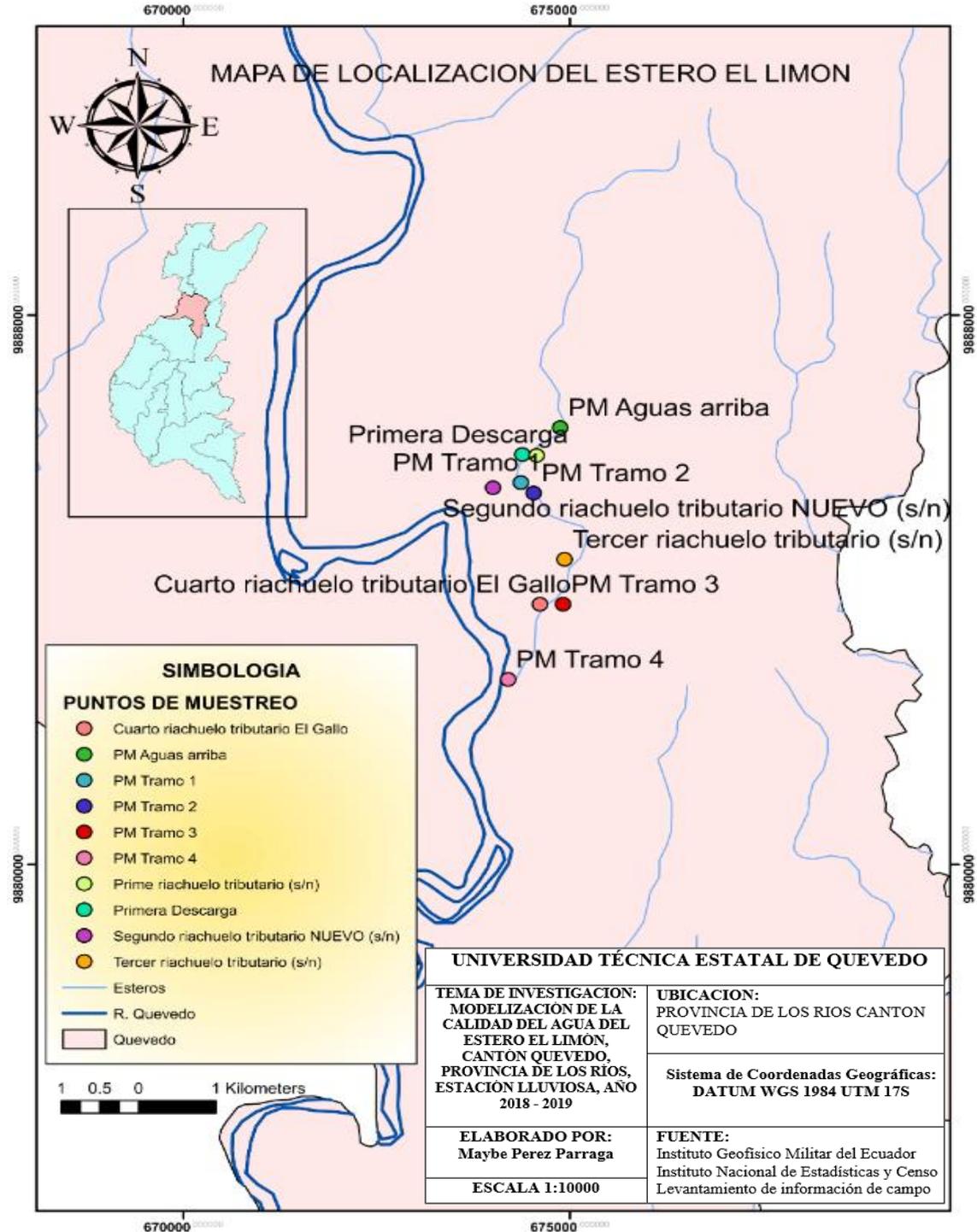
3.5.2.2. Identificación puntos de muestreo.

Para la modelización de la calidad del agua se realizó un recorrido de reconocimiento del estero El Limón previo al inicio de la fase de campo, en el que se estableció el inicio del estero o aguas arriba en la vía a Cañalito, seguido se encuentra el primer tramo en el que existe un riachuelo tributario y una descarga continua de lixiviados provenientes de botadero municipal, el segundo tramo cuenta con un riachuelo tributario el mismo que solo existe solo en época lluviosa, el tercer tramo cuenta con su riachuelo tributario, y el tramo cuatro inicia en el riachuelo tributario El Gallo y finaliza en la desembocadura del estero en el Rio Quevedo ubicado en la Vía a San Carlos, en total se establecieron diez puntos de muestreo, que se encuentran ubicados en las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 3. Coordenadas UTM de los puntos de Monitoreo.

Puntos de monitoreo	COORDENADAS UTM DATUM WGS84 ZONA 17 SUR	
	LONGITUD E	LATITUD N
Aguas arriba	674434	9886343
Descarga 1	674385	9885969
Tributario 1	674570	9885954
Tramo 1	674082	9885506
Tributario 2	674006	9885485
Tramo 2	674046	9885354
Tributario 3	674789	9884022
Tramo 3	674690	9884415
Tributario 4	674550	9883791
Tramo 4	673967	9882481

Figura 2. Mapa de localización del lugar de estudio.



3.5.3. Modelizar la calidad del agua en el estero El Limón con el modelo matemático de Streeter-Phelps.

La modelización matemática de la calidad del agua se llevó a cabo con la utilización de las ecuaciones del modelo de Streeter-Phelps, mediante el cual se obtuvieron perfiles tanto del OD y de la DBO, que describieron el comportamiento de tales variables en cada uno de los tramos en que se dividió es estero el Limón. Cabe señalar que, para efectos de

la modelización, se utilizaron los valores medios calculados para las variables hidrodinámicas y fisicoquímicas, en la estación lluviosa. El referido modelo matemático se expresa como (37) (34):

$$D_x = D_o(e^{-k_a t}) + \frac{k_d L_o}{k_a - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_a t})$$

donde, D_x es el déficit de oxígeno disuelto a cualquier distancia aguas debajo de la corriente, D_o es el déficit inicial de oxígeno disuelto, L_o es la demanda bioquímica última de la corriente, k_d es la constante de desoxigenación, k_a es la constante de reaeración, y t es el tiempo de viaje de la corriente de agua (37).

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

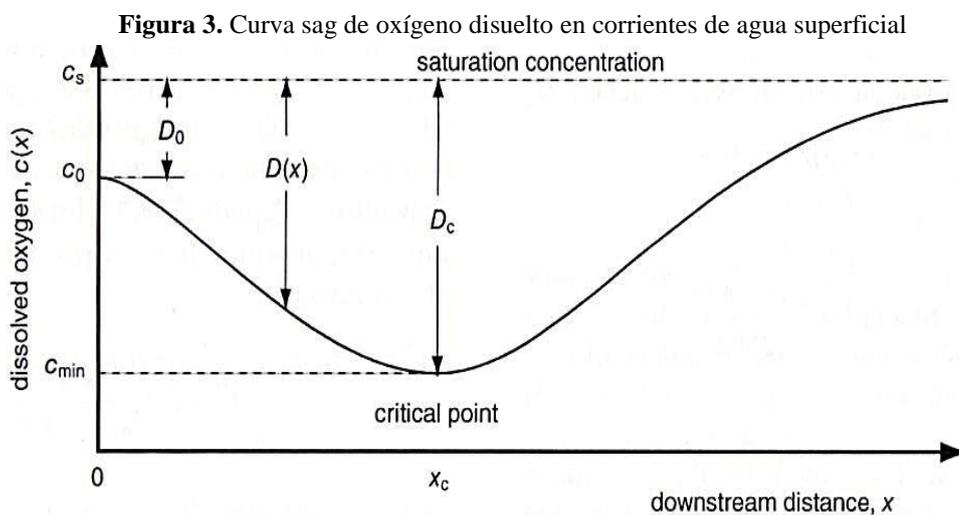
$$L = L_o e^{-k t}$$

El oxígeno disuelto en cada tramo fue calculado mediante la siguiente expresión (34):

$$OD_x = OD_{sat} - D_x$$

donde, OD_{sat} es el oxígeno disuelto de saturación y D_x es el déficit de oxígeno disuelto a cualquier distancia.

De modo que al final se pudieron obtener los perfiles de oxígeno disuelto para describir la curva sag, que es la variación del OD a cierta distancia representada en la figura 3 correspondiente (34):



Fuente: Sierra, 2011.

Además, las constantes de desoxigenación fueron estimadas a través del método de Thomas, y las constantes de reaireación mediante alguna de las siguientes fórmulas empíricas (tabla 4):

Tabla 4. 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

Fuente: Chapra, 2008, p. 378-379.

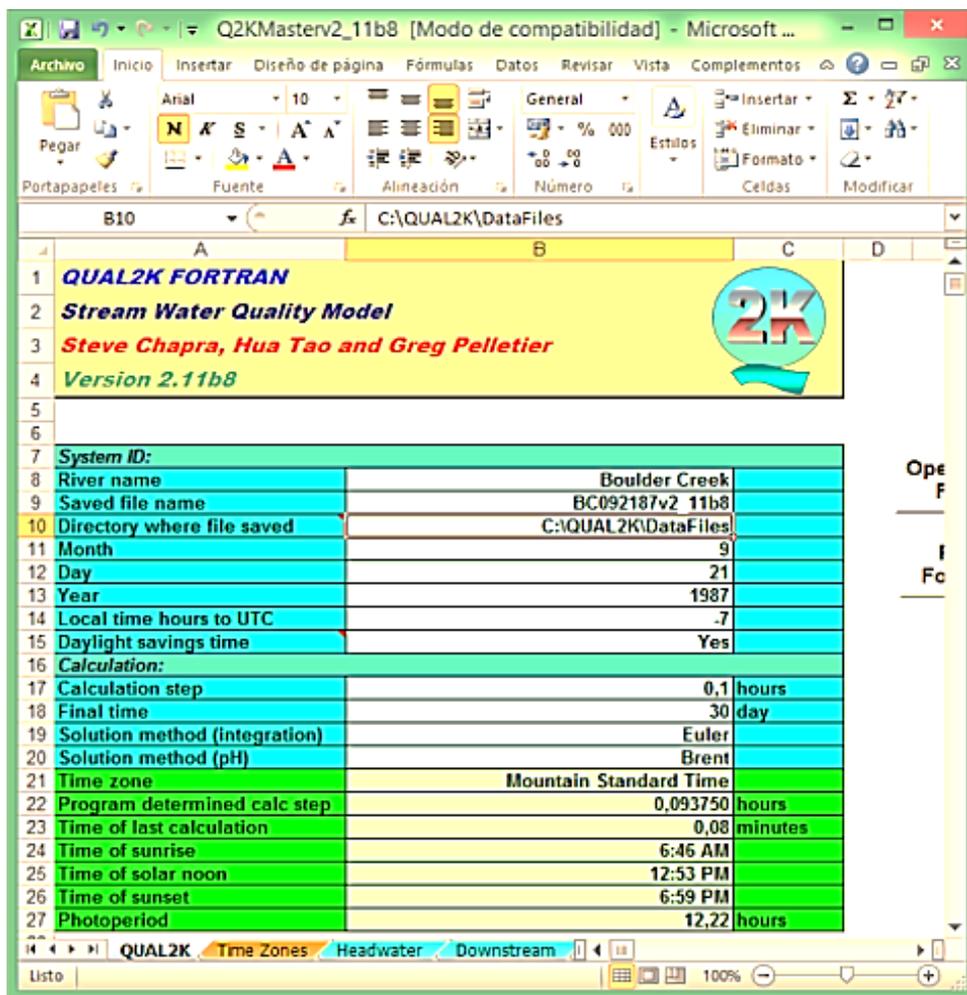
Asimismo, se efectuó la calibración del modelo de Streeter-Phelps, ajustando las constantes cinéticas de reaireación K_a , desoxigenación K_d y de remoción total de la DBO K_r . Este proceso de calibración paramétrica se realizó mediante una combinación del método manual, o de ensayo y error, y el método 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, suponer una distribución de probabilidad uniforme de sus posibles valores, y luego, mediante simulaciones de Monte Carlo, se obtuvieron 10000 posibles combinaciones de los parámetros a calibrar, en función de los cuales se adquieren respuestas de las variables modelizadas. De este modo, y minimizando el estadístico la función objetivo, se obtuvo los valores calibrados de las constantes cinéticas (37).

La validación del modelo se desarrolló siguiendo las instrucciones de Sierra (2011), que consiste en 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 (34).

3.5.4. Simular con programas de computadora la calidad del agua del estero El Limón.

Finalmente, fue utilizado el software de modelización de la calidad del agua superficial QUAL2K, versión 2.12, (ver figura 4), desarrollado por la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), para realizar la simulación computacional del comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el estero El Limón.

Figura 4. QUAL2K



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, 2015

3.6. Instrumentos de investigación

3.6.1. Hojas de cálculo para caudales

Para realizar el cálculo de los caudales de cada uno de los diez puntos de muestreo, es decir cada uno de los tramos, aguas arriba y tributarios fue utilizado como herramienta

hojas estadísticas, donde se ingresaron los datos que fueron tomados en la fase de campo, durante las 6 campañas realizadas en el lapso de 3 meses.

3.6.2. Hojas de calibración de Stacgraphics.

Para calibrar las constantes cinéticas fue utilizado el programa de Stacgraphics, en donde se ingresaron los datos de las características hidromorfológicas, parámetros como DBO, oxígeno disuelto y temperatura de los diez puntos de muestreo, y mediante la opción de Simulación de Monte Carlo, se realizaron simulaciones, las que arrojaron datos predichos casi exactos o iguales a los medidos en el campo.

3.6.3. Hojas del modelo de Streeter-Phelps.

La hoja de cálculo para realizar la modelización fue elaborada a base de las ecuaciones de Streeter-Phelps, aplicando las fórmulas empíricas para la obtención de las constantes cinéticas de reaireación K_a , desoxigenación K_d y de remoción total K_r , de la DBO; se ingresaron los valores y variables para hacer funcionar el modelo, y así se obtuvieron los perfiles de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno, para poder determinar la calidad del agua del estero el Limón.

3.7. Tratamiento de datos.

3.7.1. Análisis de rendimiento.

Para verificar el error estadístico existente entre los valores obtenidos en el campo y los obtenidos en el modelo matemático se llevó a cabo el análisis de rendimiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y del Oxígeno Disuelto.

El análisis de rendimiento del OD y DBO se realizó para medir la bondad del ajuste entre los valores obtenidos en el campo con los predichos por el modelo matemático, el rendimiento del modelo, se determinó mediante dos medidas de bondad del ajuste: el coeficiente de determinación R^2 y el índice de rendimiento de Nash-Sutcliffe (NSE) como se observa en la tabla 5 (38).

Tabla 5. Análisis de rendimiento

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

Fuente: Chin DA. Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes in the Water Environment; 2013

3.8. Recursos materiales y equipos

3.8.1. Materiales y equipos

En la tabla 6 se detallan los materiales y equipos utilizados en el desarrollo de la investigación, tanto para fase de campo como laboratorio y oficina, además de software y otras bases de datos que fueron utilizadas para realizar la modelización,

Tabla 6. Materiales y equipos utilizados en la investigación

1.- De campo	2.- Equipos
Flexómetro	Equipo portátil para pH, Biocharge
Piola número	Equipo portátil para T° y CE, Biocharge
Estacas de madera	Equipo portátil para OD, Milwaukee MW600
Libreta de campo	Cabina de incubación OxiTop® Box
Botas	Cámara fotográfica
Guantes	GPS
Mascarillas	
Botellas de plástico de 1l	
Balde de 4 l	
Hielera	
Bolsas con hielo	
Cronometro	
3.- De oficina	4.- Software
Computadora	Microsoft Excel
Útiles de oficina	ArcGis 10.1
Pendrive	Stacgraphic
	QUAL2K

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

4.1.1. Características hidromorfológicas del estero El Limón

Para identificar las características hidromorfológicas se estimaron en cada unidad de la modelización: el caudal, la velocidad de corriente, profundidad, el área de sección transversal y ancho del cauce.

4.1.1.1. Caudal

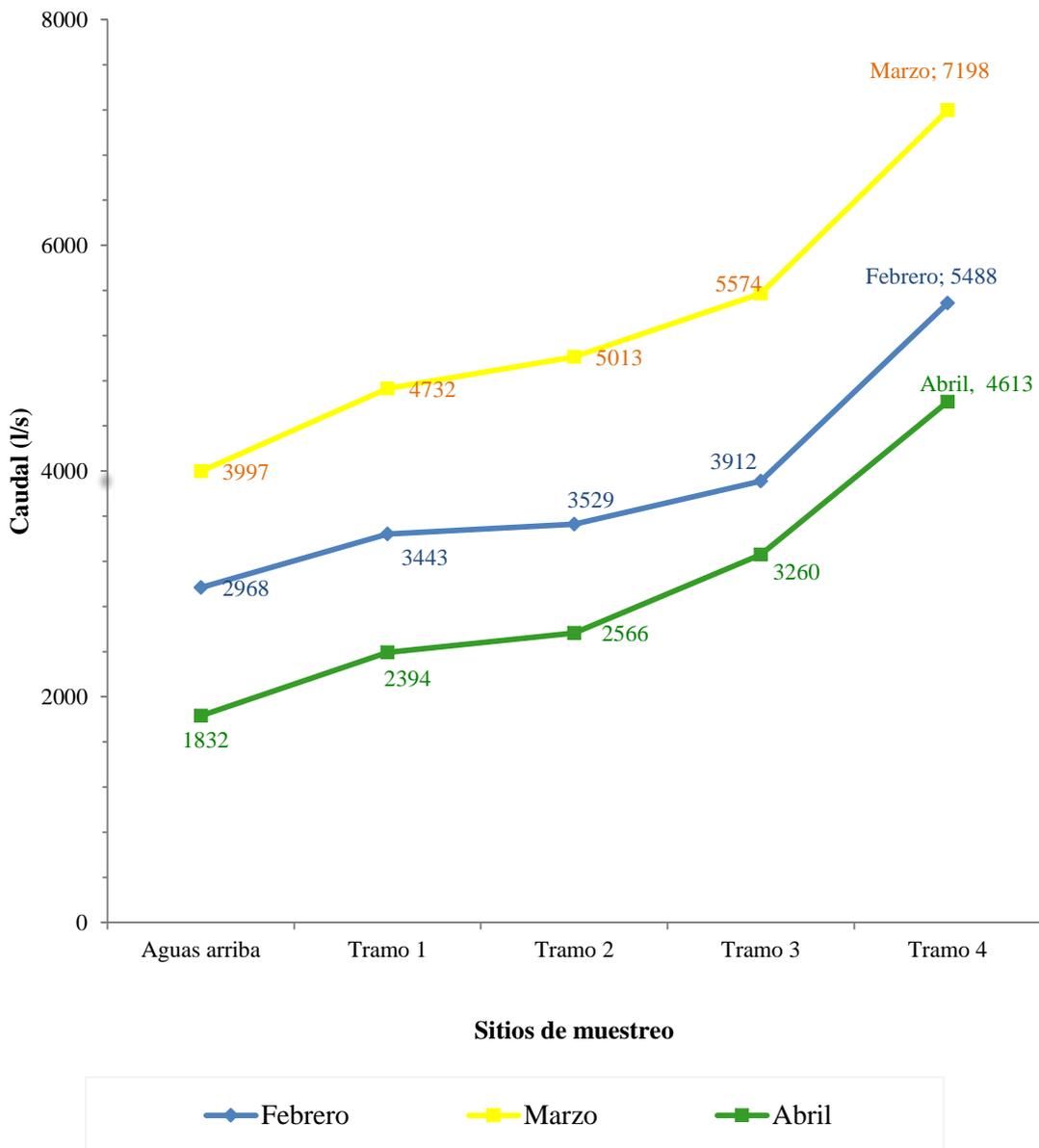
Los valores de caudal que fueron medidos en la fase de campo, se tomaron en seis campañas durante los meses de Febrero, Marzo y Abril, cada 15 días en la época lluviosa del año. Valores que son necesarios para la modelización del estero, los mismos que son recopilados en la siguiente tabla.

Tabla 7. Caudales medidos en litros/segundo (l/s) de la estación lluviosa.

<i>Fecha de campaña</i>	<i>Aguas arriba</i>	<i>Des-carga</i>	<i>Trib. 1</i>	<i>Tramo 1</i>	<i>Trib. 2</i>	<i>Tramo 2</i>	<i>Trib. 3</i>	<i>Tramo 3</i>	<i>Trib. 4</i>	<i>Tramo 4</i>
08-Febr-19	4726	38	561	5325	94	5419	584	5748	1772	7520
22-Febr-19	1211	36	315	1561	76	1639	189	2076	1379	3455
08-Mar-19	2545	28	800	3373	279	3645	690	4440	1409	5849
22-Mar-19	5448	26	616	6090	124	6381	327	6709	1839	8548
05-Abr-19	786	23	518	1327	98	1468	523	2243	1358	3602
19-Abr-19	2877	37	547	3461	199	3664	627	4277	1520	5625

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 a Abril. El tramo que registró en cada campaña el mayor caudal fue tramo cuatro, registrando 8548 l/s en la campaña más caudalosa realizada el 22 de marzo, el tributario El Gallo es uno de los tributarios más caudalosos y su contribución es bastante significativa llegando a ser hasta de 1839 l/s.

Gráfico 1. Promedio de la variación de la corriente principal del estero El Limón



En el gráfico 1 se observa la variación del caudal del estero El Limón en los meses que se efectuó el estudio, Febrero, Marzo y Abril. El mes más caudaloso fue Marzo, dando promedios de 3997 l/s en aguas arriba, 4732 l/s en el tramo 1, 5013 l/s en el tramo 2, 5574 l/s en el tramo 3 y 7198 l/s en el tramo 4, el mes menos caudaloso fue Abril. El tramo 4 es el que registra los mayores caudales en todas las campañas, esto se debe al aporte de caudal que realizan la descarga y cada tributario

4.1.1.2. Velocidad de corriente

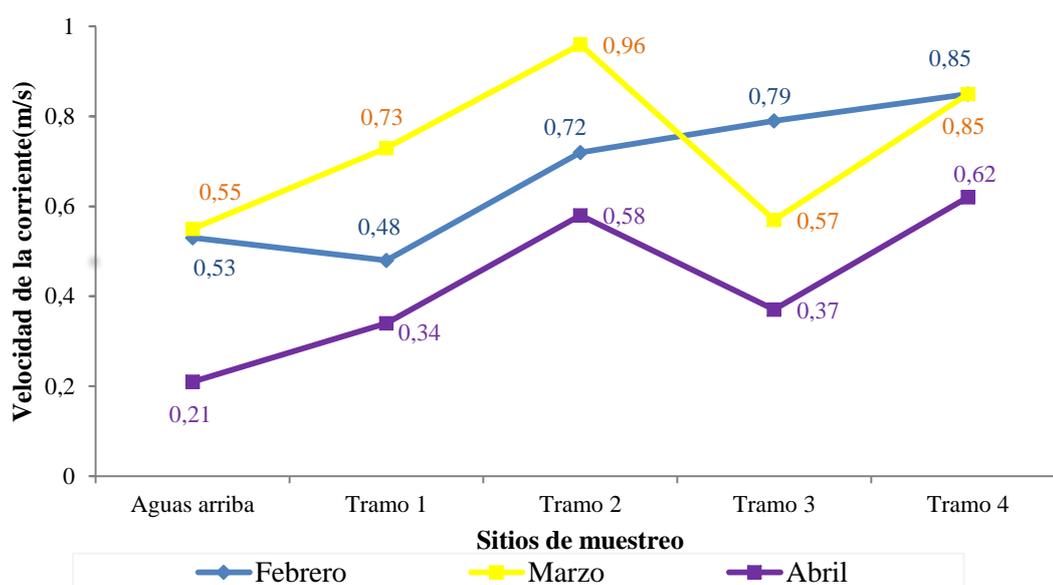
En la tabla 8 se observan los valores de la velocidad de corriente, los mismos que se obtuvieron en la fase de campo con ayuda del flotador.

Tabla 8. Velocidad de la corriente en metros/segundo (m/s) del estero El Limón.

Fecha de campaña	Aguas arriba	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
08-Febr-19	0.60	0.60	0.90	1.08	1.00
22-Febr-19	0.45	0.35	0.54	0.50	0.70
08-Mar-19	0.27	0.50	0.90	0.55	0.70
22-Mar-19	0.82	0.95	1.1	0.59	1.00
05-Abr-19	0.17	0.30	0.42	0.37	0.62
19-Abr-19	0.25	0.37	0.74	0.37	0.63

La tabla 8 muestra las velocidades de la corriente donde se puede notar que la corriente más lenta de la época lluviosa registrada durante las seis campañas es la del 05 de Abril donde el punto de muestreo aguas arriba obtuvo el valor más bajo de 0.17 m/s, seguido del tramo uno que registró valores de 0.30 l/s, el tramo dos 0.42 l/s, el tramo tres 0.37 l/s y el tramo cuatro 0.62 m/s; mientras que el valor más alto de la velocidad de la corriente se registró el 22 de marzo con valores de 0.82 l/s en el punto de muestreo aguas arriba, 0.95 m/s en el tramo uno, 1.1 m/s en el tramo dos, 0.59 m/s en el tramo tres, y 1.0 m/s en el tramo cuatro.

Gráfico 2. Velocidad de la corriente del estero El Limón en metros/segundo (m/s).



En el grafico 2 se observa la variación de la velocidad de la corriente, donde se evidencia que el mes de Marzo es el que presenta los valores más altos de velocidad en todo el estero, siendo aguas arriba el de menor velocidad con valores promedios de 0.55 m/s, y el tramo dos el de mayor velocidad para este mes con valores de 0.96m/s, Abril es el mes donde se presentan los valores más bajos de velocidad de la corriente en todo el estero, principalmente en los puntos de muestreo aguas arriba y tramo 1 con valores de 0.21m/s y 0.34 m/s respectivamente.

4.1.1.3. Profundidad del cauce

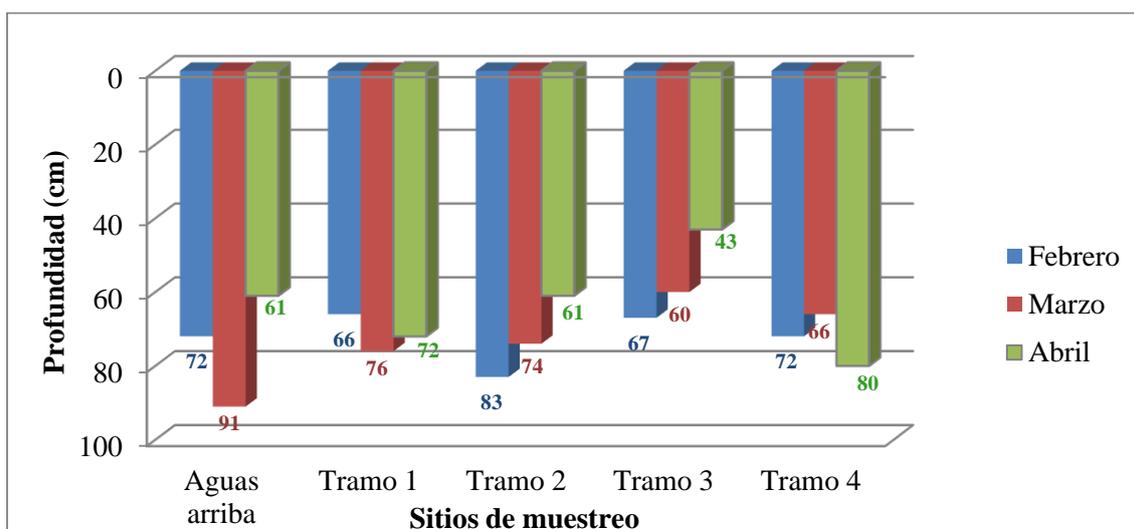
La profundidad del cauce se obtuvo tomando los valores medidos de profundidad en el centro de las secciones 1 y 2, y finalmente, sacando el promedio. A continuación se presentan los valores de las profundidades del cauce:

Tabla 9. Profundidad del cauce del estero El Limón en metros (m).

Fecha de campaña	Aguas arriba	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
<i>08-Febr-19</i>	0.89	0.84	0.97	0.77	0.68
<i>22-Febr-19</i>	0.55	0.48	0.68	0.57	0.75
<i>08-Mar-19</i>	0.87	0.67	0.55	0.53	0.64
<i>22-Mar-19</i>	0.96	0.84	0.94	0.67	0.68
<i>05-Abr-19</i>	0.42	0.48	0.53	0.36	0.69
<i>19-Abr-19</i>	0.80	0.96	0.69	0.50	0.90

En la tabla 9 se presentan las profundidades del cauce del estero El Limón, en los meses de Febrero, Marzo y Abril durante 6 campañas. La mayor profundidad se registra en el mes de Febrero en el tramo 2 con total de 0.97 m, seguido de aguas arriba y el tramo 2 con una profundidad de 0,96m y 0.94 respectivamente en el mes de Marzo, el punto de muestreo de menor profundidad es el del tramo 3 con un valor de 0.36 m en la campaña llevada a cabo el 05 de abril.

Gráfico 3. Variación de la profundidad en el estero El Limón en centímetros (cm).



En el gráfico 3 se observa que la mayor profundidad evidenciada en el estero se encuentra en las aguas arriba en el mes de Marzo con un promedio de 91 cm y la que presenta menor profundidad es en Abril con 43 cm en el tramo 3.

4.1.2. Caracterizar la calidad del agua del estero El Limón

4.1.2.1. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto fue medido durante las seis campañas en cada uno de los puntos establecidos, a continuación se presentan los valores de oxígeno disuelto.

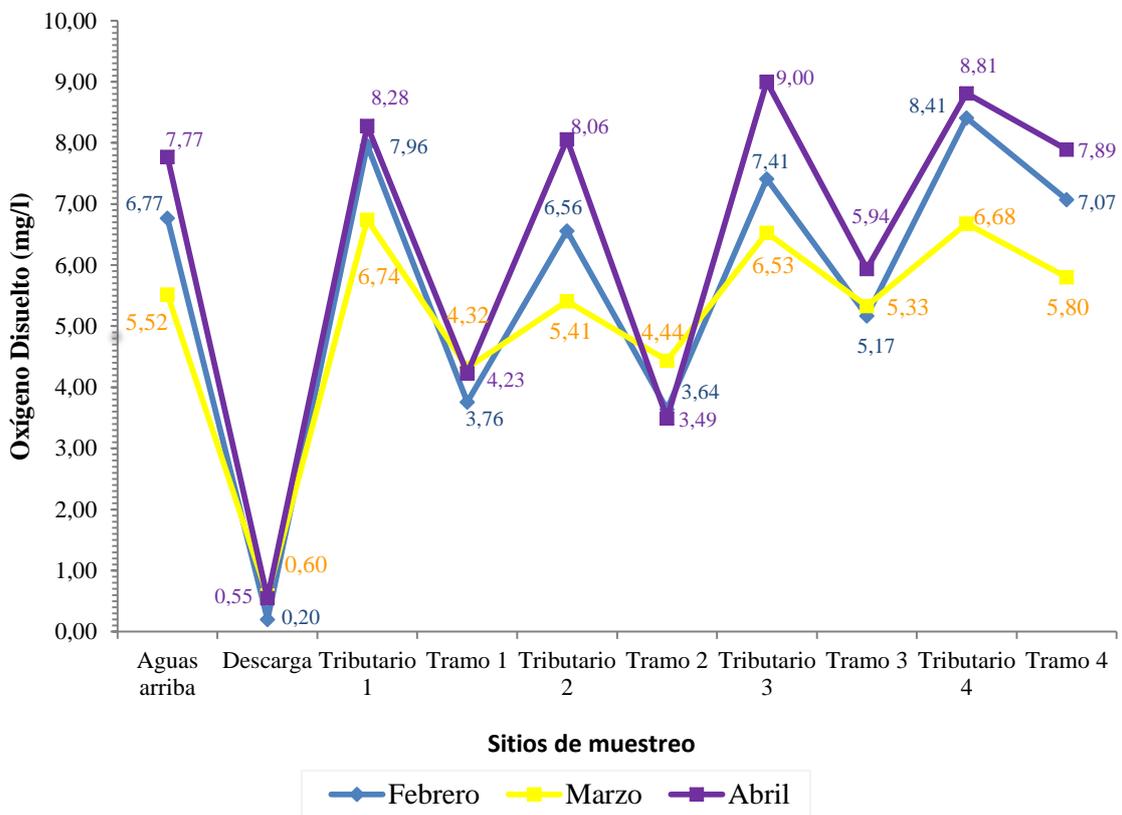
Tabla 10. Valores de oxígeno disuelto en miligramos/litro (mg/l) para los diez puntos de muestreo.

Fecha de campaña	Aguas arriba	Des-carga	Trib. 1	Tramo 1	Trib. 2	Tramo 2	Trib. 3	Tramo 3	Trib. 4	Tramo 4
08-Febr-19	7.80	0.10	8.65	3.19	7.30	3.83	8.20	6.00	10.19	8.00
22-Febr-19	5.73	0.30	7.26	4.30	5.80	3.44	6.60	4.32	6.61	6.12
08-Mar-19	5.75	0.50	7.28	4.49	5.60	4.62	6.65	5.56	6.24	6.38
22-Mar-19	5.29	0.70	6.2	4.15	5.21	4.25	6.40	5.09	7.12	5.21
05-Abr-19	7.81	0.45	8.66	3.21	7.31	3.84	8.21	6.01	10.21	8.02
19-Abr-19	7.73	0.65	7.9	5.25	8.8	3.14	9.78	5.86	7.4	7.76

En la tabla 10 se muestran los valores de oxígeno disuelto, el punto de muestreo aguas arriba siempre presentó valores mayores a 5 mg/l, llegando al valor máximo de 7.81 mg/l

en abril que fue la campaña que presentó el nivel de oxígeno disuelto más elevado en la mayoría de los puntos de muestreo, se observa que los niveles más bajos de oxígeno disuelto se presentan en el tramo 1 y 2 llegando a tener valores de 3.14 y 3.19 mg/l en el tramo 1 y 2 para las campañas del 8 de febrero y 19 de abril respectivamente (se encuentra por debajo del estándar ambiental que es 5 mg/l para la conservación de la vida acuática) debido a la influencia de la descarga del botadero de basura la misma que presenta condiciones anaerobias con valores de oxígeno disuelto cercanos a cero y uno, a partir del tramo 3 los valores de oxígeno aumentan progresivamente llegando a 8.02 m/l en el tramo 4 debido al aporte de caudal y oxigenación de los tributarios además de la distancia existente entre cada tramo..

Gráfico 4. Promedios del OD en el estero El Limón en miligramos/litro (mg/l).



De acuerdo al gráfico 4 el comportamiento del oxígeno disuelto de la descarga en todos los meses es menor de 0.60 mg/l presentando condiciones anaerobias, esta descarga provoca que los tramos 1 y 2 presenten niveles de oxígeno por debajo del estándar ambiental (5 mg/l, establecido en el anexo 1, del libro VI De La Calidad Ambiental, del TULSMA), llegando a tener en el mes de abril valores de 3.76 mg/l en el tramo 1 y 3.49 mg/l en el tramo 2; sin embargo los afluentes tributarios presentan condiciones de oxígeno

disuelto altos y grandes caudales lo que permite que los tramos 3 y 4 aumenten la concentración de oxígeno disuelto alcanzando el valor establecido en la normativa ambiental y finalice en su desembocadura con valores de 7.89 en el mes de abril, seguido de 7.7 mg/l en el mes de febrero y 5.80 mg/l en el mes de marzo.

4.1.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

En la tabla 11 se presenta los valores de los resultados de los análisis de laboratorio para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en cada punto de muestreo del estero El Limón, las muestras de agua fueron analizadas por el autor en el laboratorio suelos y aguas de la universidad de Quevedo, a excepción de la descarga que su DBO₅ fue analizado por una ocasión en el laboratorio químico Marcos.

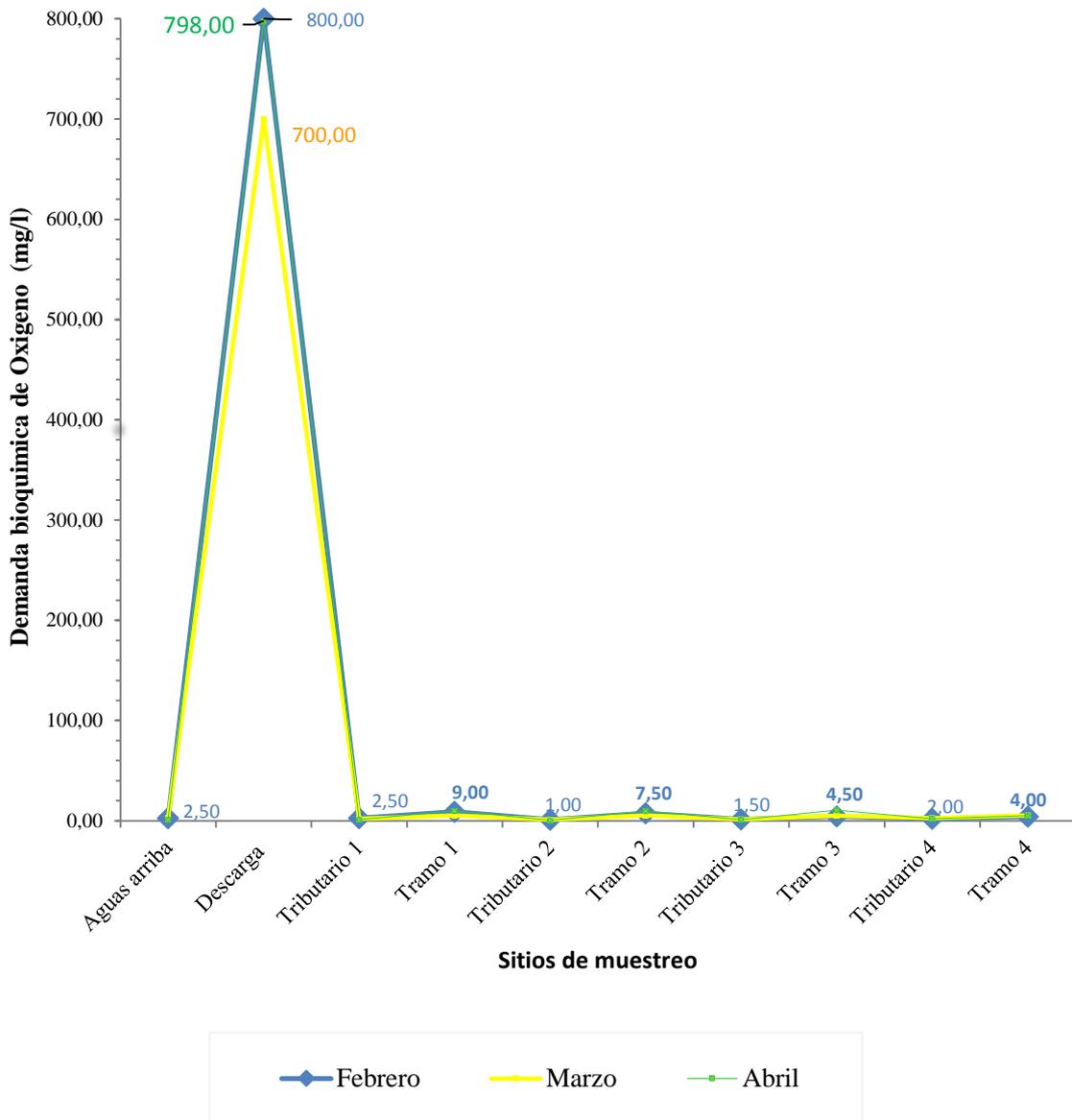
Tabla 11. Valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) del estero Limón en mg/l.

<i>Fecha de campaña</i>	<i>Aguas arriba</i>	<i>Des-carga</i>	<i>Trib. 1</i>	<i>Tramo 1</i>	<i>Trib. 2</i>	<i>Tramo 2</i>	<i>Trib. 3</i>	<i>Tramo 3</i>	<i>Trib. 4</i>	<i>Tramo 4</i>
08-Febr-19	3	800	2	11	1	10	2	5	2	5
22-Febr-19	2	800	3	7	1	5	1	4	2	3
08-Mar-19	3	700	1	6	1	6	2	7	3	6
22-Mar-19	2	700	3	5	1	5	1	3	2	5
05-Abr-19	2	798	1	13	1	12	1	15	2	7
19-Abr-19	2	798	1	7	0	7	1	6	2	3

Como se observa en la tabla 11, las concentraciones más altas de la DBO₅ se determinaron en la descarga principal con valores máximos de 800 mg/l y mínimos de 700 mg/l en los meses de febrero y marzo presentando valores mayores al 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 a cuerpos de agua dulce.

Los tramos 1, 2 y 3 son los principales afectados por la descarga del vertedero, por lo cual se registran los valores más elevados de DBO₅ con concentraciones máximas de 15 mg/l, en el tramo 3, seguidas de 13mg/l y 12 mg/l en el tramo 1 y 2 el 5 de abril, sin embargo el estero cuenta con aportaciones de esteros tributarios con grandes caudales y muy bajas concentraciones de DBO₅ con valores mínimos de 1 mg/l y máximos de 3 mg/l.

Gráfico 5. Promedios de la DBO₅ en el estero El Limón.



Como podemos observar en el gráfico 5, la DBO₅ de la descarga es la que sobresale entre todos los valores, ya que el valor máximo es de 798 mg/l en el mes de abril, lo que provoca que los tramos 1, 2 y 3 tengan los valores más altos de DBO₅ en la corriente principal del estero. La DBO₅ de la descarga se mantiene casi con los mismos valores, a excepción del mes de Marzo que la DBO₅ es relativamente más baja, con un valor de 700 mg/l.

4.1.2.3. pH

Los valores del potencial de hidrógeno fueron medidos en cada uno de los diez puntos establecidos para la investigación, los mismos que se muestran en la siguiente tabla 12.

Tabla 12. Valores de pH en el estero El Limón

<i>Fecha de campaña</i>	<i>Aguas arriba</i>	<i>Des-carga</i>	<i>Trib. 1</i>	<i>Tramo 1</i>	<i>Trib. 2</i>	<i>Tramo 2</i>	<i>Trib. 3</i>	<i>Tramo 3</i>	<i>Trib. 4</i>	<i>Tramo 4</i>
08-Febr-19	7.3	8.2	7.1	7.2	7.4	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1
22-Febr-19	7.3	8.2	7.3	7.4	7.2	7.1	7.4	7.5	7.6	7.5
08-Mar-19	7.6	8	7.3	7.5	7.3	7.6	7.4	7.6	7.7	7.6
22-Mar-19	7.3	8.2	7.4	7.5	7.5	7.7	7.5	7.5	7.6	7.5
05-Abr-19	7.7	8.1	7.6	7.7	7.8	7.7	7.8	7.8	7.9	7.8
19-Abr-19	7.6	8.3	7.2	7.4	7.7	7.6	7.7	7.5	7.8	7.8

Los valores presentados en la tabla 12 reflejan que el estero posee un potencial de hidrógeno dentro de un rango de 6,5 a 9 siendo un pH parcialmente neutro, establecido en el Registro Oficial 061, reforma del libro VI del TULSMA en la tabla 2 de Criterios de calidad para la conservación de la vida acuática. Las mediciones que reflejan los valores de pH más altos de 8,3 son los de la descarga del botadero de basura.

Gráfico 6. Promedios del pH del estero El Limón



En el gráfico 6, se puede observar que el promedio del pH en cada uno de los tramos y aguas arriba tiene muy poca variabilidad en sus valores, solo el mes de Febrero sería el mes con el pH más bajo, sin embargo se encuentran dentro del rango establecido en el Registro oficial 061, en la tabla 2 de Criterios de calidad de agua dulce.

4.1.2.4. Conductividad eléctrica

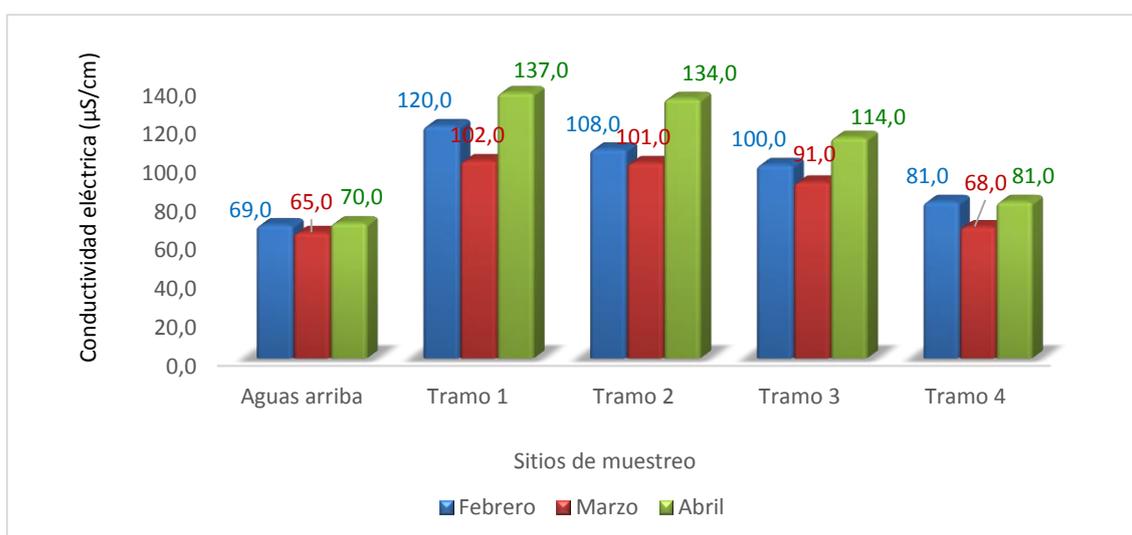
En la siguiente tabla 13, se mostraran los valores de conductividad electrica que se obtuvieron en la corriente del estero limón, por medio del equipo portátil.

Tabla 13. Conductividad eléctrica en el estero El Limón en microsiemens/centimetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Fecha de campaña	Aguas arriba	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
08-Febr-19	68	115	98	89	74
22-Febr-19	70	125	118	111	87
08-Mar-19	67	108	105	96	66
22-Mar-19	62	95	96	86	70
05-Abr-19	71	149	146	123	84
19-Abr-19	69	124	121	105	77

En la tabla 13 se observan los valores de conductividad eléctrica medidos en los puntos de muestreo aguas arriba, y los cuatro tramos, donde los mayores valores se encuentran en el tramo 1 del estero, llegando a tener un valor de $149 \mu\text{S}/\text{cm}$ en el mes de Abril, mientras que el punto que muestra valores más bajos es aguas arriba, donde el menor valor es $68 \mu\text{S}/\text{cm}$ en el mes de Febrero.

Gráfico 7. Variación de la conductividad en microsiemens/centimetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$)



En el gráfico 7, se observa el comportamiento de la conductividad en el estero El Limón, mostrando que el tramo 1 y 2 son los que tienen valores mayores a $101 \mu\text{S}/\text{cm}$, el valor

más alto se encuentra en el tramo 1 con 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el mes de Marzo. Mientras que los valores más bajos se registran en aguas arriba, en el mes de Marzo con 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

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)

Para la modelización de la calidad del agua se llevó a cabo el cálculo de la constante de reaireación (k_a), cuyos valores preliminares se obtuvieron mediante 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). La tabla 14 muestra tanto los valores preliminares de origen empírico, como los resultantes del proceso de calibración del modelo de Streeter-Phelps:

Tabla 14. Resultados de los valores calculados y calibrados de la constante de reaireación (K_a)

Meses	Tramo 1		Tramo 2		Tramo 3		Tramo 4	
	K_a calculada	K_a calibrada						
Febrero	5.065	0.549	5.693	1.667	8.281	117.080	8.112	19.364
Marzo	6.304	0.136	8.823	0.837	6.909	11.272	9.103	0.060
Abril	3.208	0.112	7.095	0.117	7.124	106.010	5.221	142.042

Se puede observar en la tabla 14, que los valores más bajos de la constante de reaireación calculada con la ecuación de Lanbeing y Durum, se dan en el tramo 1, así mismo las constantes calibradas tienden a ser mucho menor que las calculadas, lo cual se le atribuye a que el estero en esos tramos tiene menor velocidad, disminuyendo el proceso natural de reaireación. En el tramo 3 y 4 las constantes calculadas y calibradas aumentan a diferencia de los 2 primeros tramos, y las constantes calibradas tienden a ser mayores que las calculadas.

4.1.3.1.2. Constante de desoxigenación (K_d)

A continuación, se presentan valores de la constante de desoxigenación (K_d), tanto los calculados con la fórmula empírica de Hydrosience como los resultantes de la calibración del modelo de Streeter-Phelps:

Tabla 15. Valores calculados y calibrados de la constante de desoxigenación (K_d)

Meses	Tramo 1		Tramo 2		Tramo 3		Tramo 4	
	K_d calculada	K_d calibrada						
Febrero	0.728	8.360	0.659	12.151	0.723	0.801	0.701	0.469
Marzo	0.668	7.975	0.712	0.378	0.777	0.101	0.749	0.045
Abril	0.706	6.987	0.759	7.890	0.884	0.145	0.675	0.286

Como se observa en la tabla 15 los valores calculados y calibrados, los más altos de oxidación de materia orgánica (K_d) se dan en el tramo 1 y 2, esto es un indicativo que en dichos tramos hay un proceso mayor de presencia y descomposición de materia orgánica, mientras que el tramo 4 presenta los valores menores de desoxigenación.

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 (2011), 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 16. Resultados de los valores calculados y calibrados de la constante de remoción total (k_r)

Meses	Tramo 1		Tramo 2		Tramo 3		Tramo 4	
	K_r calculada	K_r calibrada						
Febrero	30.269	13.841	11.526	16.942	-3.538	1.000	4.401	0.509
Marzo	-13.467	9.975	-1.553	3.995	-6.790	0.499	-4.797	0.052
Abril	-2.663	7.992	2.830	7.999	-3.052	0.188	0.343	0.301

En la tabla 16, se observa que los valores más altos de K_r se presentaron en el mes de febrero, experimentando una significativa reducción en el proceso de remoción en el tramo 3, y finalmente, disminuyendo hasta valores inferiores a $0,5 \text{ d}^{-1}$ en el tramo cuatro.

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

A continuación se detalla el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en base a los datos obtenidos en la fase de campo y monitoreo en los puntos de estudio del estero, todos estos valores serán detallados por meses, los cuales son Febrero, Marzo y Abril.

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

Tabla 17. Características de aguas arriba, tributarios y descarga principal

	Q (m ³ /s)	DBO (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Corrientes aguas arriba	2.968	2.4	6.77	27.10
Descarga RS	0.037	1176	0.20	31.25
Tributario 1	0.438	3.0	7.96	26.85
Tributario 2	0.085	1.2	6.56	27.40
Tributario 3	0.337	2.4	7.41	26.45
Tributario 4	1.576	2.4	6.61	27.65

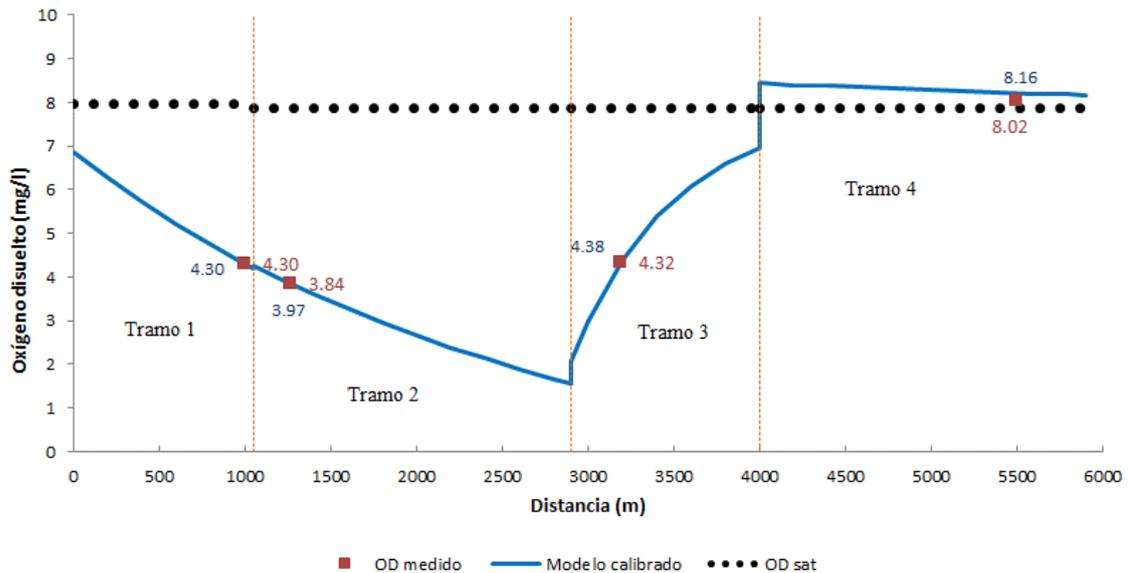
En la tabla 17 se muestran los valores de entrada para el mes de febrero, obtenidos en los puntos de muestreo de aguas arriba, descarga principal y cada uno de los tributarios que sirvieron en la aplicación del modelo matemático Streeter-Phelp para la obtención de la temperatura del agua (T_0), la DBO última inicial (L_0), el oxígeno disuelto inicial (OD_0), el oxígeno saturado, y el déficit inicial de oxígeno en el agua (D_0) para cada tramo

Tabla 18. Condiciones iniciales de los tramos

Tramo	L_0 (mg/l)	OD_0 (mg/l)	T_0 (°C)	OD_{SAT} (mg/l)	D_0 (mg/l)
1	15.09	6.85	27.11	7.95	1.10
2	10.40	4.25	27.79	7.86	3.61
3	5.95	2.06	27.67	7.87	5.81
4	4.85	8.44	27.75	7.86	-0.58

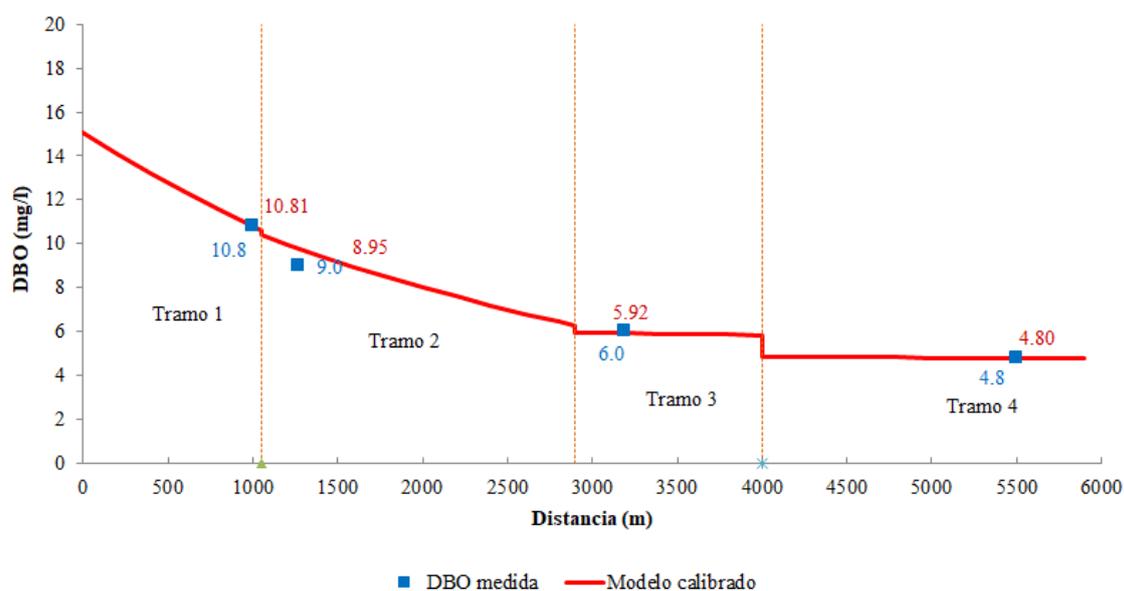
En la tabla 18 se presentan variables de la DBO última inicial (L_0), oxígeno disuelto inicial (OD_0), temperatura del agua (T_0), oxígeno saturado (OD_{SAT}), y el déficit inicial de oxígeno en el agua (D_0), los cuales fueron empleados por el modelo matemático de Streeter-Phelps para obtener los perfiles de oxígeno disuelto y de la demanda bioquímica de oxígeno, tanto del ajuste inicial como del modelo calibrado.

Gráfico 8. Perfil de la OD del mes de Febrero en miligramos/litro (mg/l)



El gráfico 8 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de febrero incluyendo el valor de saturación del oxígeno, podemos observar el comportamiento de OD, donde aguas arriba tiene valores de a 6.85 mg/l, mientras que en el tramo 1 y 2 se ve claramente como decayendo debido el impacto que ejerce la descarga del vertedero de desechos sólidos en la calidad del agua del estero El Limón, provocando el descenso del nivel de oxígeno disuelto desde el inicio del tramo 1 alcanzando un valor crítico 1.55 mg/l al final del tramo dos, a los tres kilómetros de distancia aguas abajo. No obstante, gracias al aporte del tercer riachuelo tributario y del estero El Gallo, la concentración del oxígeno disuelto se recupera, llegando a tener valores muy cercanos al de saturación al final del tramo tres y a lo largo del cuarto tramo hasta la desembocadura en el río Quevedo.

Gráfico 9. Perfil de la DBO del mes de Febrero en miligramos/litro (mg/l).



El gráfico 9 de acuerdo con el perfil del mes de febrero mostró, un sostenido descenso desde la concentración inicial de la mezcla al inicio del tramo uno (15.09 mg/l que no es tan alta en comparación con los valores obtenidos en la estación seca), hasta la desembocadura del estero en el río Quevedo, adonde llega con valores cercanos a los 5 mg/l, poniendo en evidencia la gran capacidad de autodepuración de la corriente.

Tabla 19. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
OD	0.087	0.033	0.025	2.342
DBO	0.060	8.118	1.270	0.003

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 donde se observa que el ajuste tanto para el OD como para la DBO, tuvo errores menores al 10 %, tal como lo sugiere la literatura especializada, siendo el error más alto de 8.12 % para la DBO en el tramo 2 y para el OD 2.34% en el tramo 4.

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

Tabla 20. Características de aguas arriba, tributarios y descarga principal en el mes de Marzo

	Q (m ³ /s)	DBO última (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Corrientes aguas arriba	3.397	3	5.52	26.6
Descarga RS	0.027	1029	0.6	30.55
Tributario 1	0.708	3.6	6.74	26.25
Tributario 2	0.201	1.2	5.41	26.7
Tributario 3	0.509	2.4	6.53	26.75
Tributario 4	1.624	3.6	6.68	27.85

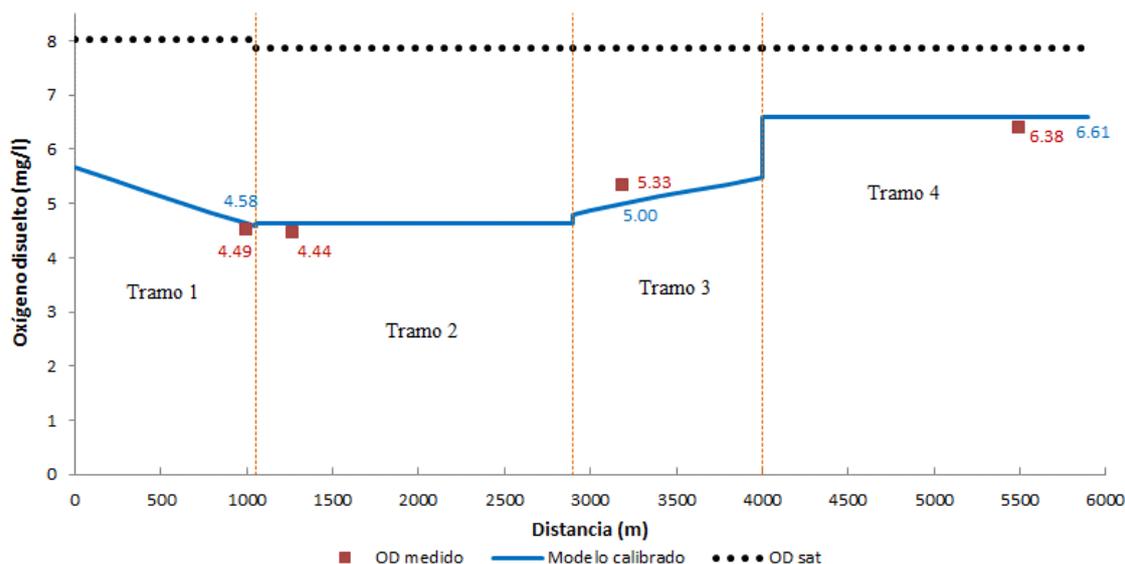
En la tabla 20 se presentan los valores de entrada empleados en la modelización del OD y la DBO con Streeter-Phelps, para el mes de Marzo.

Tabla 21. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de Marzo

Tramo	L_o (mg/l)	OD₀ (mg/l)	T_o (°C)	OD_{SAT} (mg/l)	D_o (mg/l)
1	8.94	5.67	26.57	8.03	2.36
2	7.31	4.62	27.70	7.87	3.25
3	6.29	4.80	27.61	7.88	3.08
4	5.62	6.61	27.73	7.87	1.26

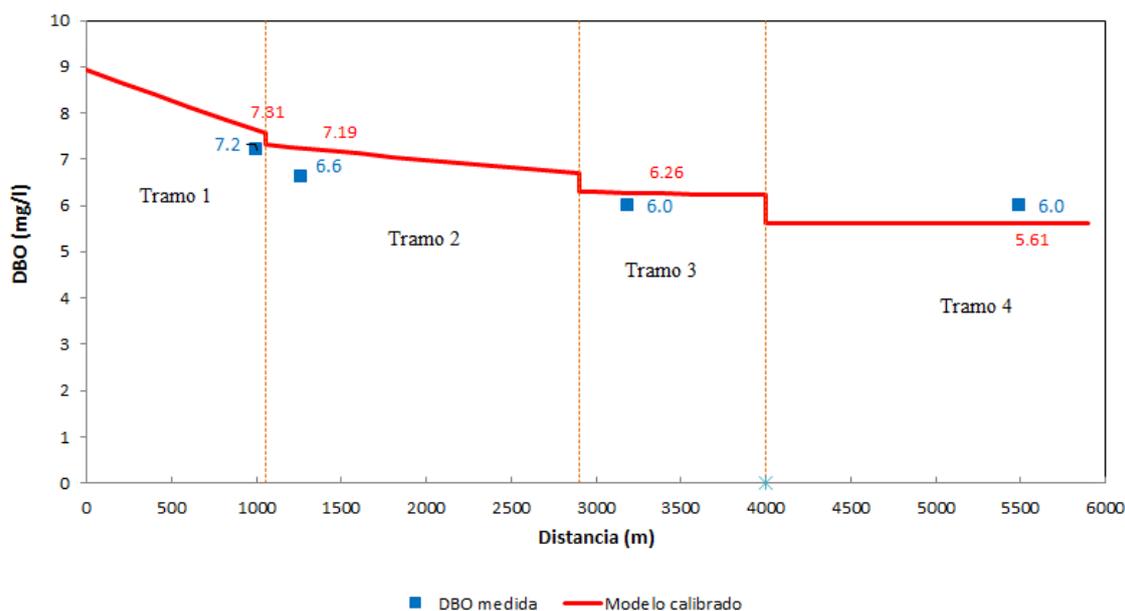
La tabla 21, muestra las condiciones iniciales en el mes de Marzo, necesarias para la el modelo, con estos datos se aplicó el modelo matemático y se obtuvieron los perfiles de OD y de la DBO,, tanto del ajuste inicial como del modelo calibrado.

Gráfico 10. Perfil del OD del mes de Marzo en miligramos/litro (mg/l)



El gráfico 8 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de Marzo y el valor de saturación del oxígeno, podemos observar la variación del comportamiento del OD, donde a inicios del primer tramo tiene valores mayores de 5.7 mg/l, a medida que la corriente avanza aguas abajo por el tramo 1 se evidencia el decaimiento del oxígeno debido el impacto que ejerce la descarga del vertedero de desechos, alcanzando el valor mínimo de 4.62 al final del tramo 1 e inicios del tramo 2, dicho valor se mantiene constante hasta inicios del tramo 3 a los 3 km de distancia aguas abajo, donde los valores de oxígeno aumentan progresivamente gracias al aporte del tercer riachuelo tributario y del estero El Gallo, el estero logra oxigenarse y mejorar su DBO y OD, llegando a tener los valores más altos en el tramo 4 hasta la desembocadura al río Quevedo, valores que son muy cercanos al de saturación.

Gráfico 11. Perfil de DBO del mes de Marzo en miligramos/litro (mg/l)



En el siguiente gráfico 11, se observa el perfil de la DBO del mes de Marzo, donde se muestra que el punto con mayor concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno se encuentra a inicios del tramo uno con un valor de 8.94 mg/l (bajos en comparación con los valores obtenidos en la estación seca) y disminuye a lo largo del tramo, en el segundo tramo hay descenso de la curva alcanzando el valor de 6.69 mg/l, en el tramo 3 desciende a 6.22 para finalizar con una concentración de DBO de 5.61 en la desembocadura ubicada en el tramo 4.

Tabla 22. Error relativo del OD y la DBO del mes de Marzo, en %

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
OD	3.038	0.000	1.935	3.427
DBO	5.664	8.751	4.345	6.875

La tabla 22 muestra los valores del error relativo entre los valores observados en campo y los valores arrojados por el modelo calibrado, donde se observa que el ajuste tanto para el OD como para la DBO, tuvo errores menores al 10 %, tal como lo sugiere la literatura especializada, siendo el error más alto de 8.751 % para la DBO en el tramo 2 y 3.43% para el OD en el tramo 4.

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

Tabla 23. Características de la cabecera, descarga y tributarios en el mes de Abril

	Q (m ³ /s)	DBO última (mg/l)	OD (mg/l)	T (°C)
Corrientes aguas arriba	1.832	2.4	7.77	27.45
Descarga RS	0.030	1173.06	0.55	30.05
Tributario 1	0.533	1.2	8.28	26.5
Tributario 2	0.148	1.2	8.06	26.7
Tributario 3	0.575	1.2	9	26.3
Tributario 4	1.439	2.4	8.81	27.2

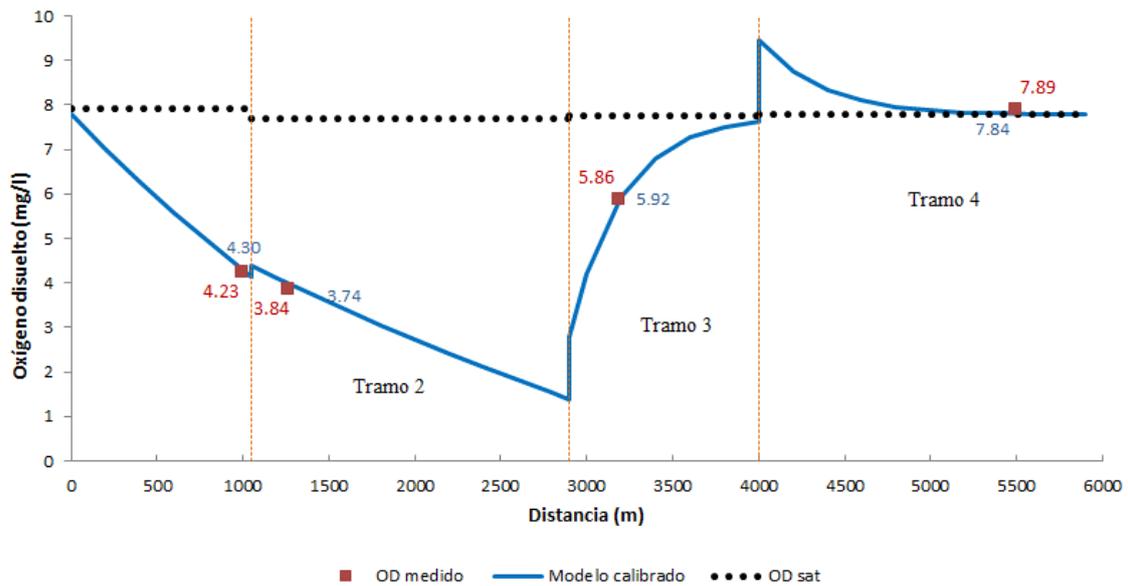
En la tabla 23, se observa los valores de entrada que se utilizaron para aplicar la modelización del OD y la DBO para el mes Abril, donde se observa que gracias a los tributarios y sus condiciones idóneas, la corriente principal puede reoxigenarse y llegar al tramo 4 con una DBO baja en comparación con los tramo 1 y 2 que se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Condiciones iniciales de cada tramo en el mes de Abril

Tramos	L _o (mg/l)	OD ₀ (mg/l)	T _o (°C)	OD _{SAT} (mg/l)	D _o (mg/l)
1	16.80	7.79	27.27	7.93	0.14
2	11.96	4.38	28.92	7.70	3.32
3	7.48	2.79	28.44	7.77	4.98
4	5.84	9.45	28.38	7.78	-1.67

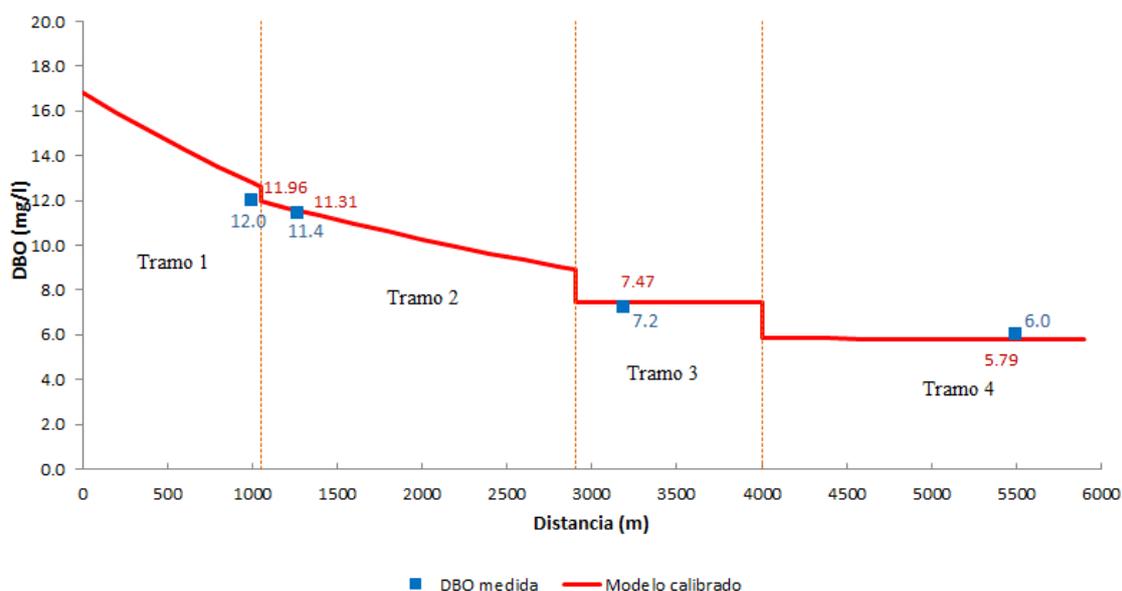
En la tabla 24, se observa las condiciones iniciales del mes de Abril, estas condiciones son calculadas por medio del modelo y permiten obtener el perfil de OD y DBO ultima.

Gráfico 12. Perfil del OD del mes de Abril en miligramos/litro (mg/l)



El gráfico 12 muestra el perfil del oxígeno disuelto en el mes de Abril, incluyendo el valor de saturación del oxígeno, el perfil de la figura pone de relieve el impacto que ejerce la descarga del vertedero de desechos sólidos en la calidad del agua del estero El Limón, provocando el descenso del nivel de oxígeno disuelto hasta un valor crítico 1.38 mg/l al final del tramo dos, a los tres kilómetros de distancia aguas abajo. No obstante, gracias al aporte del tercer riachuelo tributario y del estero El Gallo, la concentración del oxígeno disuelto se recupera, llegando a tener valores muy cercanos al de saturación al final del tramo tres y a lo largo del cuarto tramo hasta la desembocadura en el río Quevedo.

Gráfico 13. Perfil de DBO del mes de Abril en miligramos/litro (mg/l)



De acuerdo con el perfil del mes de Abril, la DBO mostró un sostenido descenso desde la concentración inicial de la mezcla al inicio del tramo uno (16.80 mg/l, que no es tan alta en comparación con los valores obtenidos en la estación seca), hasta la desembocadura del estero en el río Quevedo, donde llega con valores cercanos a los 6 mg/l, poniendo en evidencia la gran capacidad de autodepuración de la corriente.

Tabla 25. Error relativo del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica del mes de Abril en %

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
OD	1.611	3.390	0.002	0.002
DBO	6.237	1.276	3.579	3.608

En la tabla 25, se observa los resultados que dio el cálculo del error relativo entre los valores observados en el campo y los arrojados por el modelo calibrado para el OD y DBO última del mes de Abril. Los errores más elevados son los del tramo 1 y 2 que tienen valores de 6.24% para el tramo uno de la DBO y 3.40% en el OD para el tramo 2, ningún error sobrepasa el límite que es 10%.

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, es decir de Febrero a Abril. La relación entre los

valores observados y los predichos por el modelo, debe estar lo más cerca de 1,0, tanto el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe como en el coeficiente de determinación. los tres meses presentan valores muy cerca de 1,00 lo que significa que los valores medidos y los predichos coinciden tuvieron un ajuste óptimo.

Tabla 26. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto al OD

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	4.30	4.49	4.23	4.34	0.323	0.927
	Predicción	4.30	4.63	4.30	4.41		
T2	Medición	3.84	4.44	3.84	4.04	0.795	0.976
	Predicción	3.84	4.62	3.97	4.14		
T3	Medición	4.32	5.33	5.86	5.17	0.906	0.937
	Predicción	4.32	4.99	5.86	5.06		
T4	Medición	8.02	6.38	7.89	7.43	0.946	0.986
	Predicción	8.21	6.61	7.89	7.57		
Media	Medición	5.12	5.16	5.46			
	Predicción	5.17	5.21	5.51			
Error	NSE	0.997	0.811	0.978			
	R2	1.000	0.922	1.000			

La tabla 27, muestra los valores del análisis de rendimiento para la DBO, donde hay valores de coincidencia mayores de 0,228 en cuanto a meses, así mismo el valor mínimo de 0,909 se obtuvo en los tramos en el coeficiente de determinación.

Tabla 27. Rendimiento del modelo de Streeter-Phelps con respecto a la DBO.

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	10.80	7.20	12.00	10.00	0.934	0.978
	Predicción	10.81	7.63	12.80	10.41		
T2	Medición	9.00	6.60	11.40	9.00	0.911	0.989
	Predicción	9.78	7.23	11.55	9.52		
T3	Medición	6.00	6.60	7.20	6.60	0.739	0.909
	Predicción	5.92	6.27	7.47	6.55		
T4	Medición	4.80	6.00	6.00	5.60	-4.589	0.991
	Predicción	4.80	7.47	7.79	6.69		
Media	Medición	7.65	6.60	9.15			
	Predicción	7.83	7.15	9.90			
Error	NSE	0.391	0.116	0.333			
	R2	0.974	0.228	0.965			

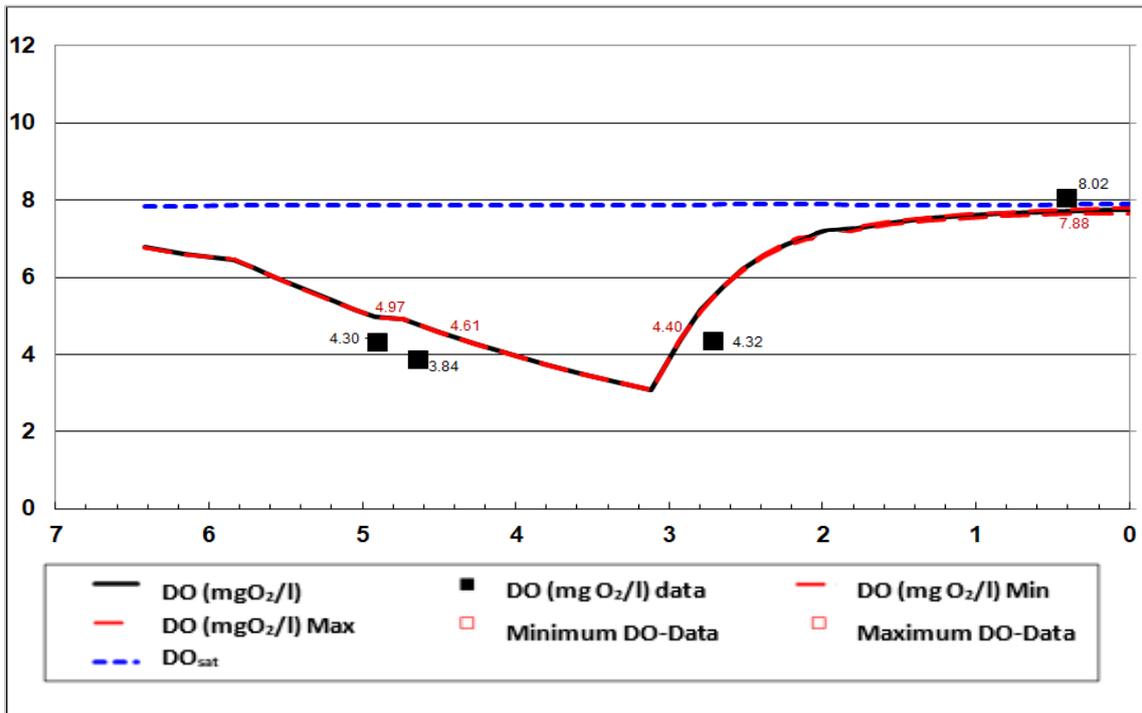
4.1.4. Simulación de la calidad del agua del estero El Limón con QUAL2K

Para realizar la simulación de la calidad del agua del estero El Limón se utilizaron los valores obtenidos de las constantes cinéticas K_a (reaireación), K_d (desoxigenación) y K_r (remoción total), que se obtuvieron en la calibración del modelo matemático de Streeter-Phelps, también se utilizó los valores de las características hidromorfológicas del estero, las mismas que se utilizaron el modelo para cada mes. Luego de ingresar los datos se hace correr el programa, de esta manera se obtiene los gráficos que más adelante se mostraran, por último, se agregan los datos de distancia, OD y DBO para que salgan los puntos predichos por el programa y los observados en campo.

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

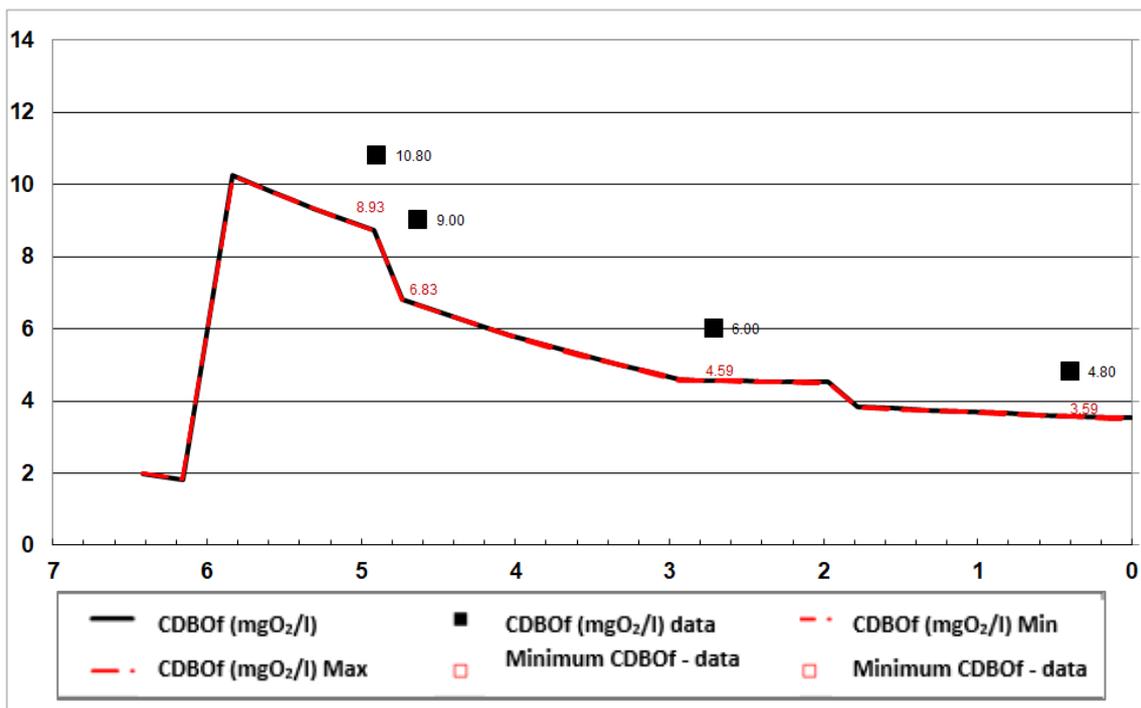
A continuación, se presenta los gráficos del mes de Febrero que se obtuvo por medio del software QUAL2K.

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



El gráfico 14 muestra que en el programa Qual2k existió un óptimo ajuste en relación al OD en todos los tramos de la corriente principal del estero El Limón en el mes de Febrero, acercándose lo suficiente los valores medidos en el campo con los valores predichos por el modelo.

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

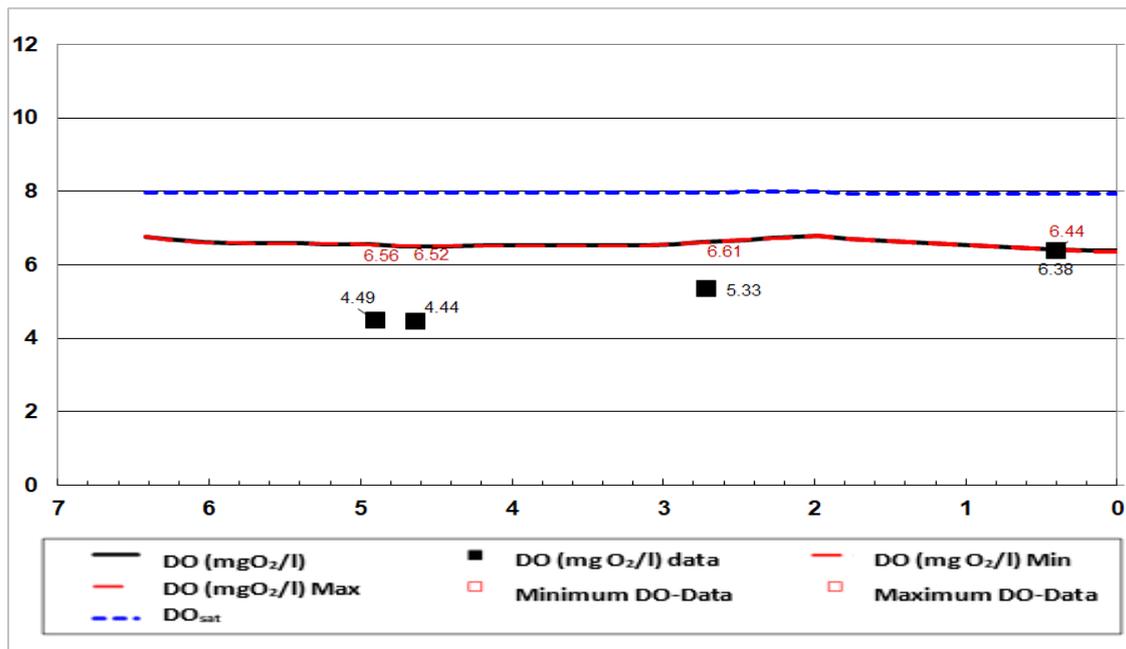


El grafico 15 muestra también un ajuste óptimo del programa QUAL2K con relación a la DBO, con valores predichos por el modelo que presentan poca diferencia con los valores medidos en los puntos de muestreo de los cuatro tramos de la corriente principal del estero El Limón en el mes de Febrero.

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

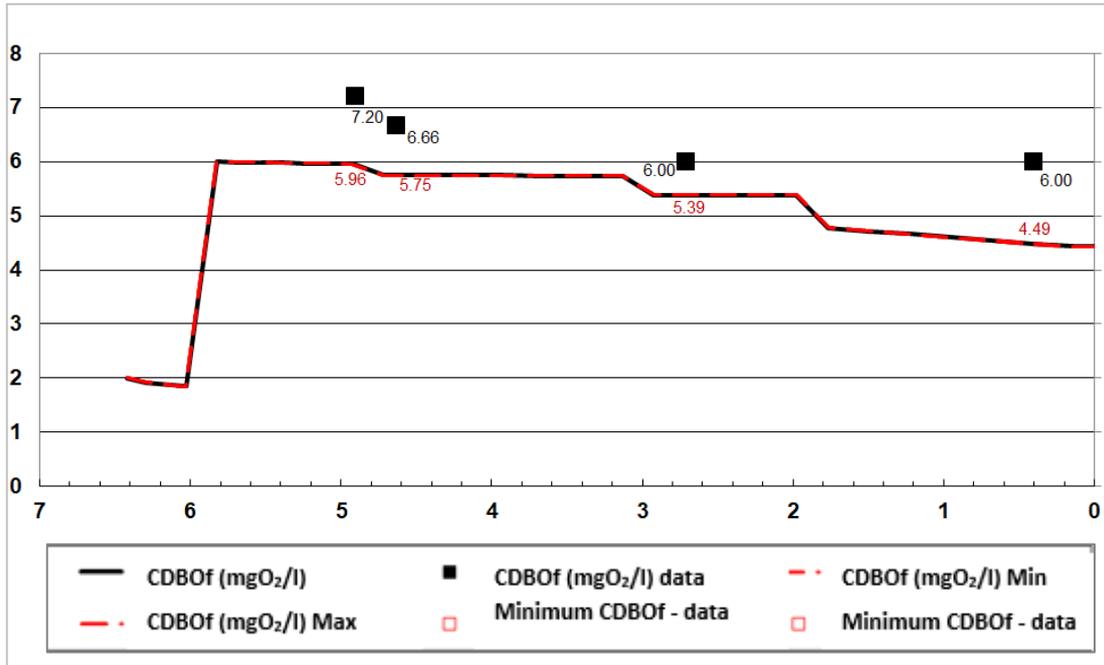
A continuación, se observa el grafico 16 y 17, de la simulación del mes de Marzo con el software QUAL2K.

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



El grafico 16 muestra que en el programa QUAL2K no existió un óptimo ajuste en relación al OD en los tramos 1, 2, y 3 ya que los valores predichos por el modelo se alejan un poco de los valores medidos en el campo en el mes de Marzo, solo en el tramo 4 se presentó un ajuste optimo entre los valores medidos en el campo con la predicción del modelo

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

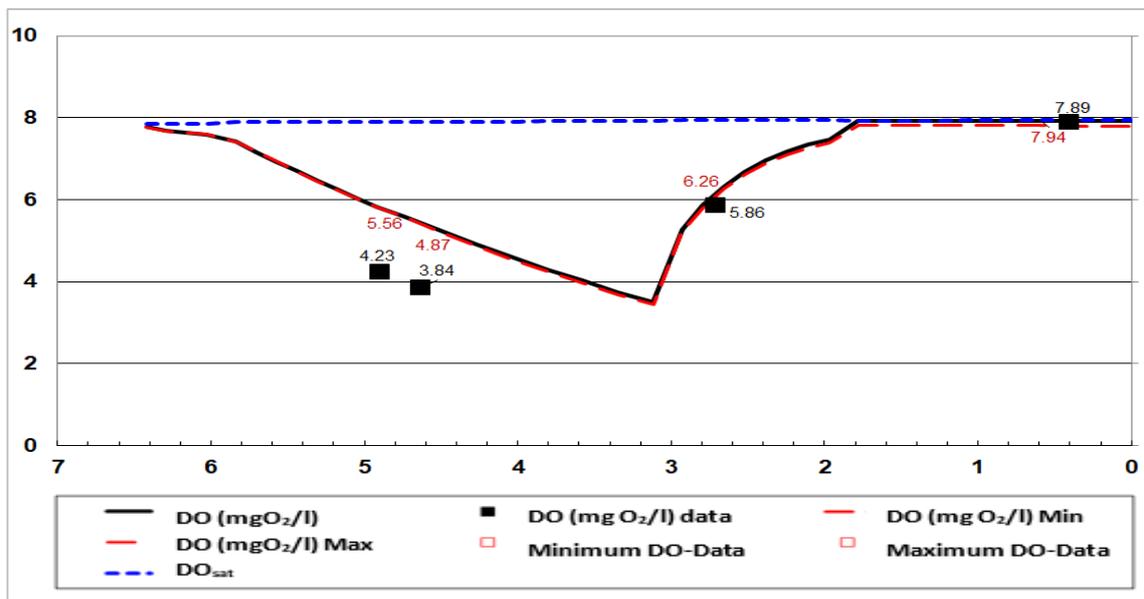


El gráfico 17 muestra un ajuste óptimo del programa QUAL2K para la DBO del mes de Marzo, con valores predichos por el modelo que presentan poca diferencia con los valores medidos en los puntos de muestreo de los cuatro tramos de la corriente principal del estero El Limón.

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

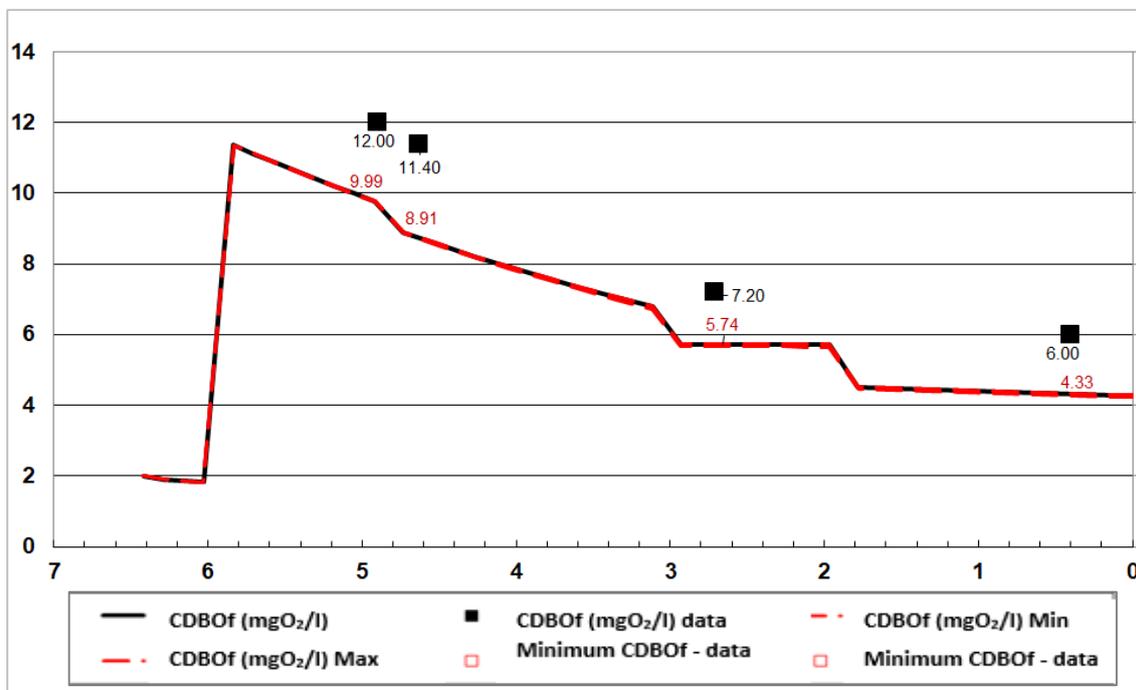
A continuación, se muestra en los gráficos 18 y 19 la simulación de la OD y DBO del mes de Abril.

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



El grafico 18 muestra que en el programa Qual2k existió un óptimo ajuste en relación al OD en todos los tramos de la corriente principal del estero El Limón, acercándose lo suficiente los valores medidos en el campo con los valores predichos por el modelo

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



El grafico 19 muestra que hubo un ajuste óptimo del programa QUAL2K con relación a la DBO, con valores predichos por el modelo que presentan poca diferencia con los valores medidos en los puntos de muestreo de los cuatro tramos de la corriente principal del estero El Limón en el mes de Abril.

4.1.4.4. Análisis de rendimiento

La tabla 28 muestra el análisis de rendimiento para el OD de los valores observados y los predichos en el tramo uno, dos, tres y cuatro durante los tres meses de estudio. Los valores registrados que presenta el coeficiente determinación, son los más cercanos a un ajuste óptimo de 1,00.

Tabla 28. Rendimiento del modelo de QUAL2K con respecto al OD

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	4.30	4.49	4.23	4.34	0.323	0.9
	Predicción	4.30	4.63	4.30	4.41		
T2	Medición	3.84	4.44	3.84	4.04	0.795	0.976
	Predicción	3.84	4.62	3.97	4.14		
T3	Medición	4.32	5.33	5.86	5.17	0.906	0.937
	Predicción	4.32	4.99	5.86	5.06		
T4	Medición	8.02	6.38	7.89	7.43	0.946	0.986
	Predicción	8.21	6.61	7.89	7.57		
Media	Medición	5.12	5.16	5.46			
	Predicción	5.17	5.21	5.51			
Error	NSE	0.997	0.811	0.978			
	R2	1.000	0.922	1.000			

La tabla 29 muestra el análisis de rendimiento para la DBO de los valores observados y los predichos en el tramo uno, dos, tres y cuatro durante los tres meses de estudio. Los valores registrados que presenta el coeficiente determinación, son los cercanos a uno considerando que existió un ajuste óptimo.

Tabla 29. Rendimiento del modelo de QUAL2K con respecto a la DBO.

Tramo	Origen datos	Meses			Media	Error	
		FEB	MAR	ABR		NSE	R2
T1	Medición	10.80	7.20	12.00	10.00	0.934	0.978
	Predicción	10.81	7.63	12.80	10.41		
T2	Medición	9.00	6.60	11.40	9.00	0.911	0.989
	Predicción	9.78	7.23	11.55	9.52		
T3	Medición	6.00	6.60	7.20	6.60	0.739	0.909
	Predicción	5.92	6.27	7.47	6.55		
T4	Medición	4.80	6.00	6.00	5.60	-4.589	0.991
	Predicción	4.80	7.47	7.79	6.69		
Media	Medición	7.65	6.60	9.15			
	Predicción	7.83	7.15	9.90			
Error	NSE	0.391	0.116	0.333			
	R2	0.983	0.011	0.944			

4.2. Discusión de resultados

El estero el limón en estación lluviosa presentó diferencias de caudales en cada uno de los meses evaluados, además se comprobó el incremento de caudal tramo a tramo lo cual se debe al importante aporte hídrico de los afluentes tributarios. La velocidad de la corriente fue aumentando progresivamente en los tramos 1, 2 y 4; sin embargo, el tramo tres se caracterizó por tener las corrientes más lentas. Similares comportamientos se determinaron en el estero Atascoso, y en estero el limón en estación seca, caracterizados por el incremento del caudal desde el primero hasta el último tramo, debido a las aportaciones de riachuelos y descargas, así como también a la ausencia de extracciones de caudales. En este contexto, en las citadas investigaciones la velocidad en los dos primeros tramos es similar, pero en el tercero desciende debido a que, tal como ocurre en el estero El Limón en la época lluviosa, la profundidad y el ancho de cauce aumentan mucho en comparación con los tramos anteriores (26) (28).

El impacto de la carga orgánica que llega al estero en el tramo 1 proviene del lixiviado generado en el vertedero municipal de Quevedo, dicha carga orgánica se hace evidente en las bajas concentraciones de oxígeno disuelto observadas en los puntos de muestreo del primer y segundo tramo, a partir del tramo 3 el oxígeno disuelto empieza a aumentar progresivamente, esto se debe al caudal significativo con valores bajos de DBO y altos en OD que aportan los riachuelos tributarios a la corriente principal, además de la capacidad de autodepuración que presentan las redes hídricas. Similares características fueron presentadas en la investigación realizada al mismo estero en la época seca, ya que por la carga orgánica generada en el vertedero se produce el decaimiento de los valores de oxígeno disuelto en el primer y segundo tramo, sin embargo por el aporte de los esteros tributarios y la distancia que recorre el estero desde la descarga principal se evidencia un notable aumento en la concentración de oxígeno disuelto a partir de los 3000 m, llegando con valores mayores a 5 mg/l al último tramo. Un esquema parecido fue determinado en el estudio del comportamiento del oxígeno disuelto en la cuenca alta del Río Tunjuelo, donde se obtuvo en los perfiles del OD una disminución progresiva hasta el km 6 y una recuperación importante a partir del km 12 (28) (23).

La aplicación del modelo matemático Streeter-Phelps demuestra que el oxígeno disuelto se expone a un decaimiento progresivo, alcanzando el valor más bajo con condiciones anaerobias al final del segundo tramo del estero, sin embargo también se refleja la

tendencia de una rápida recuperación del OD a partir de su unión con el tercer riachuelo, adicional el aporte del tributario el Gallo permite que las condiciones sean aún más favorables para el tramo 4 llegando a su desembocadura al río Quevedo con valores de OD de hasta 8.16 mg/l; por otra parte la DBO presenta los valores más elevados al inicio del tramo 1 y disminuye a lo largo de cada tramo hasta llegar a la desembocadura, estas condiciones se presentan durante los tres meses de estudio. El análisis de rendimiento del modelo calibrado de Streeter-Phelps establece un ajuste óptimo entre las concentraciones medidas y las predichas, con valores del coeficiente de determinación de hasta 0.997 en el índice de Nash-Sutcliffe. En correspondencia con estos resultados, Pazmiño, Zambrano y Coello, calibraron el modelo de Streeter-Phelps en la corriente del estero Aguas Claras, 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 que el modelo se ajusta con alto rendimiento estadístico a las condiciones de variación del oxígeno disuelto en los esteros (22).

El programa QUAL2K presenta un ajuste óptimo entre los valores predichos y los tomados en el campo en relación al OD ya que sus valores son muy cercanos con resultados de 1.00 a 9.22 en el coeficiente de determinación y de 0.391 a 0.116 para el índice de Nash-Sutcliffe, de Febrero a Abril; asimismo, en los tramos valores de 0,90 a 0,976 y de 0,323 a 0,795, para el coeficiente de determinación y el índice de Nash-Sutcliffe, respectivamente. Por el contrario, el ajuste del parámetro DBO, obtuvo un ajuste ligeramente inferior con respecto al OD de acuerdo a los valores de coeficiente de determinación. Resultados similares se encontraron en investigaciones como la llevada a cabo por Hadgu et al., en el año 2014, quienes aplicaron el modelo de calidad del agua QUAL2K para modelar la dispersión de contaminantes en el río Ndarugu, en Kenya, en el cual evaluaron el rendimiento del modelo, en relación al OD y DBO para el coeficiente de determinación, los resultados de calibración y validación son aceptables como tal, el rendimiento de QUAL2k se considera también aceptable (29).

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las características hidrodinámicas del estero El Limón están definidas por caudales variables en cada campaña realizada en la época lluviosa. Los mayores caudales se registraron en el mes de marzo, obteniendo promedios de caudales que van desde 3997 l/s aguas arriba, 4732 l/s en el tramo 1, 5013 l/s en el tramo 2, 5574 l/s en el tramo 3, el tramo que está cerca a la desembocadura es el tramo 4 con un caudal de hasta 7198 l/s siendo el más caudaloso en todo el estero, el incremento de caudal en cada tramo se debe a los aportes de caudal de los tributarios.
- Con respecto a la velocidad del estero se determinó que disminuye significativamente en el tramo 3, llegando a tener velocidades de 0.37m/s en el mes menos caudaloso (abril) y 0.57m/s en el mes de mayor caudal (marzo), esta velocidad se encuentra influenciada por el ancho del cauce pues en el tramo 3 es mayor al valor medido en los tramos anteriores, el tramo cuatro presenta velocidades aún más altas a pesar de que el ancho del estero es mayor, dicho acontecimiento se debe a la notable pendiente existente en este punto.
- El pH se mantuvo en valores de 7.1 a 8 en los tramos 1,2,3, y 4; el valor máximo se registró en la descarga del botadero de basura con 8.3, sin embargo ninguno de los valores de pH están fuera del límite establecido en la normativa del libro VI del TULSMA de Calidad Ambiental que es de 6.5 a 9.
- Los parámetros que están fuera de los límites para la conservación de la vida acuática, son el OD y la DBO, en el tramo uno y dos ya que presenta promedios de OD medido en el campo con valores que descienden hasta 3,30mg/l, por lo que están por debajo del estándar ambiental que de 5 mg/l, establecido en el anexo 1, del libro VI De La Calidad Ambiental, del TULSMA. Cabe destacar, que el oxígeno disuelto medido a partir del tramo tres es más elevado debido a que los tributarios contribuyen de manera significativa en la re-oxigenación de la corriente principal.
- La DBO más significativa medida en el campo, es la de la Descarga de lixiviado del botadero de basura con una concentración de 798 mg/l en el mes de abril, que

sobrepasa el estándar ambiental de 100mg/l para la descarga en cuerpos de agua dulce, establecido en el anexo 1, del libro VI de Calidad Ambiental, del TULSMA.

- Las constantes de desoxigenación (K_d) y de remoción de la DBO (K_r) se refleja que en el caso de la primera valores altos en los tramos 1 y 2 condiciones que se dan por degradación bacteriana de la alta materia orgánica que se encuentra presente en los mencionados tramos; y en el caso de la segunda (K_r) que el fenómeno de sedimentación de la materia orgánica es significativa en el tramo 3 por tratarse de una corriente relativamente más lenta.
- La calibración del modelo de Streeter-Phelps predice una variación sin cambios significativos del oxígeno disuelto y la DBO en cada una de las campañas, caracterizada por el descenso del oxígeno disuelto desde el tramo 1 hasta el tramo 2, y su incremento a partir del tramo 3; y en el caso de la DBO su descenso a partir del primer tramo, situación. provocada por la influencia de la gran concentración de materia orgánica proveniente de la descarga del botadero de basura, y su análisis de rendimiento presento un ajuste optimo
- El modelo QUAL2K tuvo un ajuste óptimo en los parámetros de OD y DBO evidenciado en los valores del coeficiente de determinación R^2 , para el OD el cual fue mayor a 0,922 en cada uno de los tres meses que abarcó el proceso de modelización, y mayor a 0,9 en cada uno de los tramos en que se segmentó la corriente de El Limón; y para la DBO el coeficiente de determinación R^2 , fue mayor a 0,011 como valor mínimo y 0.944 como valor máximo en cada uno de los tres meses que abarcó el proceso de modelización, y mayor a 0,909 en cada uno de los tramos.

5.2. Recomendaciones

- Tomando en cuenta el nivel de contaminación crítico que recibe el estero El Limón, se recomienda al departamento de gestión ambiental del GADM de Quevedo elaborar planes de remediación, especialmente implementar una planta de tratamiento físicos-químicos previo al vertimiento de lixiviados que genera el vertedero municipal, siguiendo los parámetros y exigencias establecidos en la normativa vigente para descargas a cuerpos de agua dulce.
- Es importante también tomar medidas de retención de los desechos sólidos, ya que principalmente en los días de mayor precipitación de la época lluviosa se registró en las riveras de todo el estero grandes cantidades de residuos sólidos, que descienden desde el botadero hasta el estero el limón y a su vez son arrastradas por el estero hacia la cuenca del río Quevedo.
- Además es fundamental que se continúen realizando monitoreos periódicos de la calidad del agua a los esteros del cantón Quevedo, principalmente en el estero el Limón, pues presenta grandes y permanentes descargas con concentraciones de contaminación debido a la influencia del lixiviado del botadero de basura.
- Los modelos matemáticos Streeter-Phelps y Qual2k deberían ser aplicados en próximos estudios de calidad del agua, ya que presentan un buen ajuste, y se constituyen en una herramienta eficaz; sin embargo se debería recopilar mayor información sobre los parámetros requeridos por el software QUAL2K, de modo que se consiga obtener mejores valores en su ajuste y se pueda adaptar mejor a las condiciones del estero El Limón.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

6.1. Bibliografía

1. Ministerio de Educacion Gobierno de Chile. El agua recurso vital. Santiago de Chile;; 2013.
2. UNESCO. ¿Hay suficiente agua en el mundo? [Online].: Organizacion Metereologica Mundial; 1997 [cited 2019 Febrero 18. Available from: http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_1/aguamundo.pdf.
3. Isch E. Contaminacion de las aguas y politicas para enfrentarla. Primera ed. Quito-Ecuador: Graphus; 2011.
4. Lloret P. Agua a Fondo. Tercera ed. Quito-Ecuador: FONAG; 2008.
5. SENPLADES. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Quevedo 2012-2016. [Online].; 2012 [cited 16 Febrero 2019. Available from: <https://issuu.com/plandesarrolloquevedo2012/docs/diagnostico/12>.
6. Yáñez E, Vásquez R. Caracterización de los parámetros físicos y químicos de los efluentes de agua al rio Cutuchi en el sector Lasso cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi. Tesis de Grado. Latacunga-Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi; 2015.
7. Foro de los Recursos Hídricos. Guia metodologica de inventarios de los recursos hidricos Quito-Ecuador: Imprimax; 2005.
8. Samboni, N., Carvajal. Y, & Escobar, C. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Vol. 27 (Nº 03), (172-181). México: Red de Revistas Científicas de America Latina y el Caribe, España y Portugal. Ingenieria e Investigacion. 2007 Diciembre; 27(3).
9. Lino, V., Nancy, A., & Daniel, F. El Índice de calidad de agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. (Nº 16). Ciudad La Habana, Cuba. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. 2009.
10. Ibañez G. Elaboracion de un plan de manejo ambiental para la conservacion de la subcuenca del rio San Pablo en el canton La Maná, Provincia de Cotopaxi. Tesis de Grado. Latacunga-Ecuador: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI; 2012.
11. Rodriguez C. Propuesta de modificacion al Art. 107 de la ley 1333 de Medio Ambiente incrementando la sancion de pena privativa de libetad de 3 a 6 años, para brindar mayor proteccion al derecho fundamental al agua. Tesis de Grado. La Paz-Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés; 2016.
12. Candela L. Contaminacion de la aguas subterraneas: tipo domestico e industrial. Madrid-España;; 2002. Report No.: 84-7840-472-4.
13. Perez R, Aguilar A. Agricultura y contaminacion del agua. Coyoacán-México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2002. Report No.: 978-607-02-3550-4.

14. García J. Evaluación y modelación de la calidad del agua del río Zahuapan. Tesis de Grado. Monterrey-México: Universidad Autónoma de Nuevo León; 1999.
15. Casilla S. Evaluación de la calidad del agua en los diferentes puntos de descarga de la cuenca del río Suchez. Tesis de Grado. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano Puno; 2004.
16. Torres F. Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico. Tesis de Grado. Mayagüez-Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico; 2009.
17. Ordoñez J, Palacios Q. Modelo de calidad del agua. Rumichaca, Pasto-Colombia: QHSE Asesorías y Servicios Ambientales SAS; 2017.
18. Cajas V. Estimación de valores de contaminación difusa para el río Tomebamba en zonas periféricas y urbanas - primera aproximación. Tesis de Grado. Cuenca-Ecuador: Universidad de Cuenca; 2015.
19. Perez J. Modelización de la calidad del agua Río Azul, Municipio de Pijao Departamento del Quindío. Armenia-Colombia: Corporación Autónoma Regional de Quindío; 2015.
20. Matovelle C. Modelo matemático de calidad de agua aplicado en la microcuenca del río Tabacay. Revista Killkana Técnica. 2017; 1(1): p. 39-48pp.
21. Castro M. Aplicación del Qual2k en la modelación de la calidad del agua, departamento de Caldas, Colombia. Tesis de Postgrado. Manizales-Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2015.
22. Pazmiño, J; Zambrano, G; Coello, H. Modelización de la calidad del agua del estero aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador. DYNA. 2017; 85(204): p. 12pp.
23. Urrego E. Determinación del comportamiento del oxígeno disuelto en la cuenca alta del río Tunjuelo mediante la utilización de las ecuaciones de Streeter y Phelps. 2017..
24. Pazmiño J, Vélez C. Pazmiño Rodríguez, Julio Vélez Meza, Arturo CrisModelización de la calidad de agua en el segmento norte del estero macache del Cantón Quevedo, Ecuador. Tesis de Grado. Universidad Técnica Estatal de Quevedo; 2017.
25. Orozco G, Castro A, Pallares L. Simulación matemática de calidad de agua en el río Tejo después del vertimiento final del alcantarillado municipal de Ocaña, norte de Santander, empleando Microsoft Excel. Tesis de Grado. Ocaña, Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña; 2016.
26. Pazmiño J. Modelización de la incidencia del Oxígeno Disuelto y la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la calidad del agua del estero Atascoso. Tesis de maestría. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo; 2015.; 2015.

27. Dominguez J, Borroto J, Hernández A. Calibración del modelo de Streeter y Phelps modificado para la planificación de estrategias de saneamiento del Río Almendares. Revista CENIC Ciencias Químicas. 2005; 36.
28. Pazmiño J, Toapanta M. Modelización de la calidad del agua del estero El Limón, Cantón Quevedo, estación seca, Año 2018. Tesis de Grado. Quevedo-Ecuador: Universidad Estatal de Quevedo; 2018.
29. Nyadawa M, Hadgu L, Mwangi J, Kibetu P, Mehari B. Application of Water Quality Model QUAL2K to Model the Dispersion of Pollutants in River Ndarugu Kenya: Computational Water, Energy, and Environmental Engineering; 2014.
30. Hernández R, Fernández C, Baptista P. Metodología de la Investigación. Tercera ed. México: McGraw Hill; 2003.
31. Cazau P. Introducción a la Investigación en Ciencias Sociales. 2006 Marzo..
32. Gutiérrez S, González S. Metodología del trabajo intelectual. 10th ed. México: Esfinge; 1990.
33. Maya E. Métodos y técnicas de Investigación, Una propuesta ágil para la presentación de trabajos científicos en las áreas de arquitectura, urbanismo y disciplinas afines. 2014..
34. Sierra C. Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico. Primera ed. Medellín: Ediciones de la U; 2011.
35. INEN, NTE INEN 2176. Agua. Calidad de agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. Primera ed. Quito, Ecuador; 1998.
36. INEN, NTE INEN 2226. Agua. Calidad del agua. Muestreo. Diseño de los programas de muestreo. Primera ed. Quito, Ecuador; 2000.
37. Chapra S. Surface water-quality modeling. Segunda ed. INC WP, editor.; 2008.
38. Chin D. Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes in the Water Environment. Segunda ed.: John Wiley & Son, Inc; 2013.

CAPÍTULO VII
ANEXOS

7.1. Reporte de laboratorio



PEREZ PARRAGA MAYBE LILIANA
 Representante Legal: PEREZ PARRAGA MAYBE LILIANA
 Dirección: Km 1 1/2 Vía a Pichincha, Tel. 0991515833
 Atención: Ing. Maybe Perez

Guayaquil, 23 DE ABRIL DEL 2019

DATOS DE MUESTREO

Fecha/Hora/Lugar de Muestreo: 2019/04/11 / 09:15 / El Empalme 1.1/2 vía a Pichincha –Manabí
 Fecha/Hora Recepción Muestras: 2019/04/11 / 16:21
 Punto e Identificación de la Muestra: Lixiviado de descarga de botadero de basura (Muestra 2 descarga botadero municipal)

Matriz de la muestra: Agua Residual
 Muestreado Por/Muestreador/Tipo de Muestreo: CLIENTE / CLIENTE / Puntual
 Duración de Muestreo:
 Coordenadas Geográficas: 985969 06743585
 Norma Técnica de muestreo: No Aplica
 Muestreo Actividad Acreditada: Muestreo de Aguas Naturales y Residuales. Parámetros: DBO, DQO, Aceites y Grasas, TPH, Ferroles, ST y SST.

AGREGADOS ORGANICOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	U K-2	MÉTODO	ANALIZADO POR
Demanda Bioquímica de Oxígeno	798	mgO ₂ /l	39,90	PEE-GQM-FQ-05	2019/04/12 LS

SIMBOLOGÍA:

----- No. Aplica
 <L> Menor al Límite Detectable
 N.E. No Efectuado

NOMENCLATURA:

131 Parámetro NO INCLUIDO en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
 171 Parámetro subcontratado NO ACREDITADO, competencia evaluada Cap. 5 Manual de Calidad de GQM
 131 Parámetro acreditado cuyo resultado está FUERA DEL ALCANCE de acreditación.
 141 Parámetro subcontratado ACREDITADO; ver sitio en www.acreditacion.gob.ec

U K-2 Incertidumbre
 E.P.A. Environmental Protection Agency
 S.M. Standard Methods

L.M.P. Límite Máximo Permisible
 P.E.E. Procedimiento específico de Ensayo


 Q.F. FERNANDO MARCÓS V.
 Director Técnico


 Q.F. LAURA YANQUI M.
 Coordinadora de Calidad

IMPORTANTE:

Los resultados de este informe de ensayo sólo son aplicables a las muestras analizadas; PROHIBIDA su reproducción total o parcial sin autorización escrita de GQM.

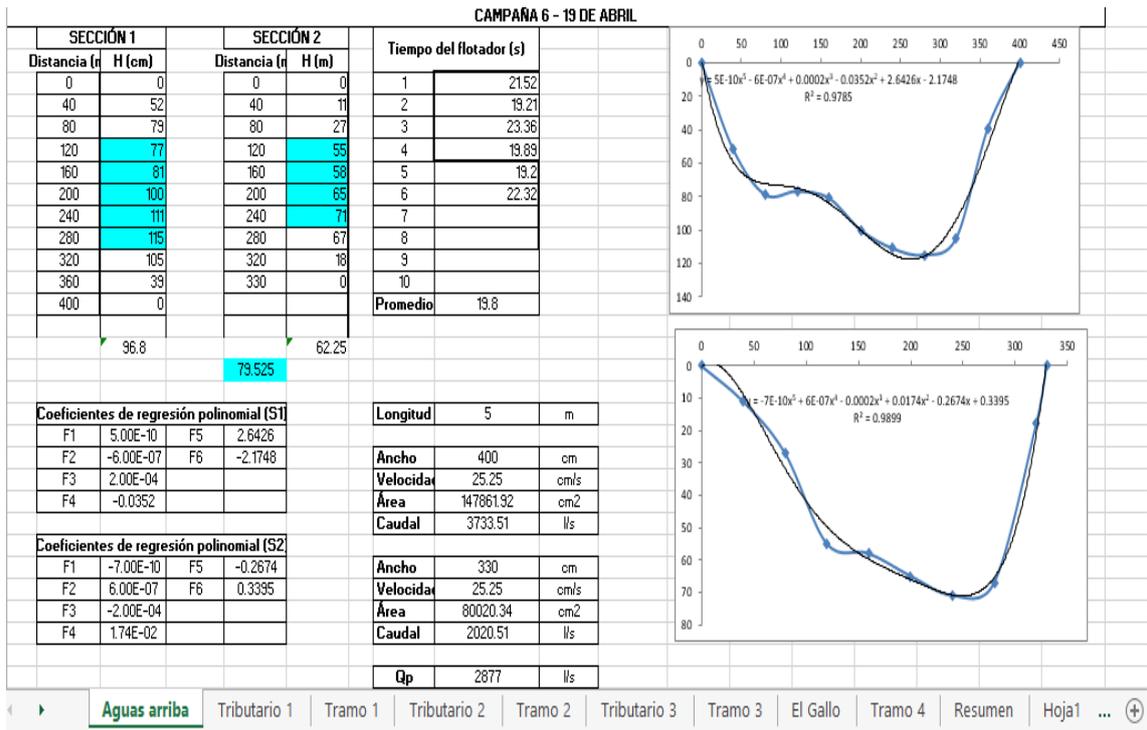
Parque California 2 Local D-41 Km. 11,5 vía a Daule
 042-103390(2) / 042-103825(35) / 0998-286653
www.grupoquimicomarcos.com
 Guayaquil - Ecuador

MC2201-14

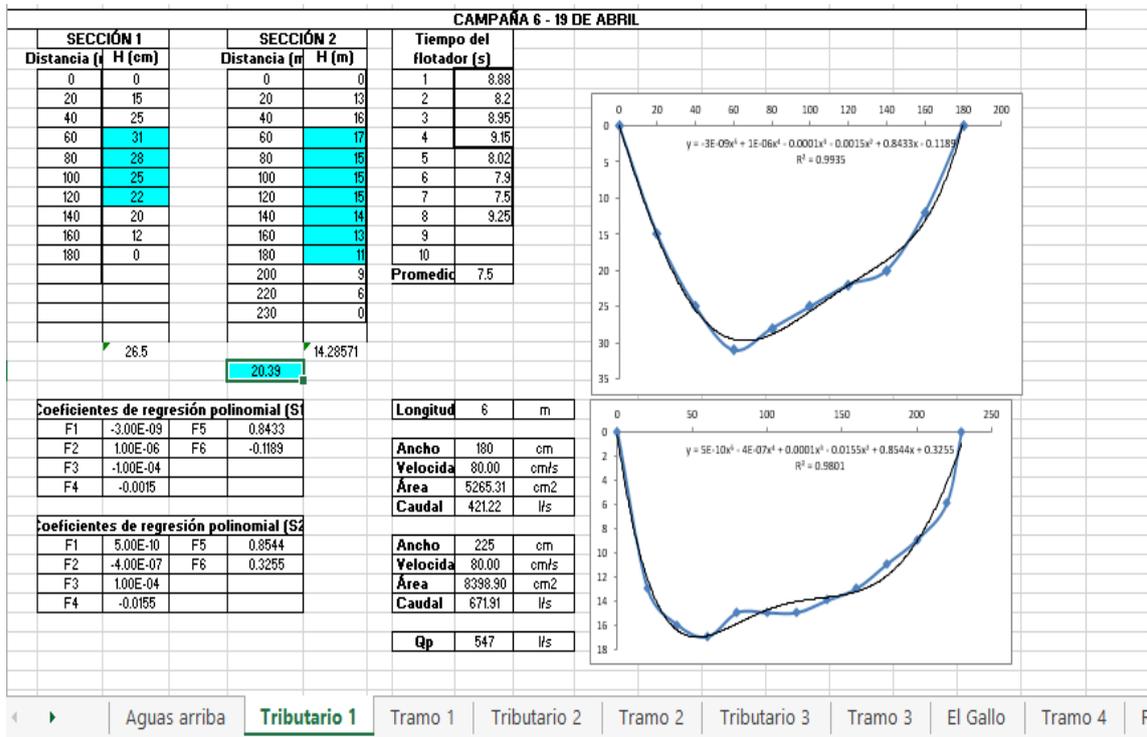
Página 1 de 2

Anexo 1. Reporte del laboratorio químico Marcos de análisis de DBO

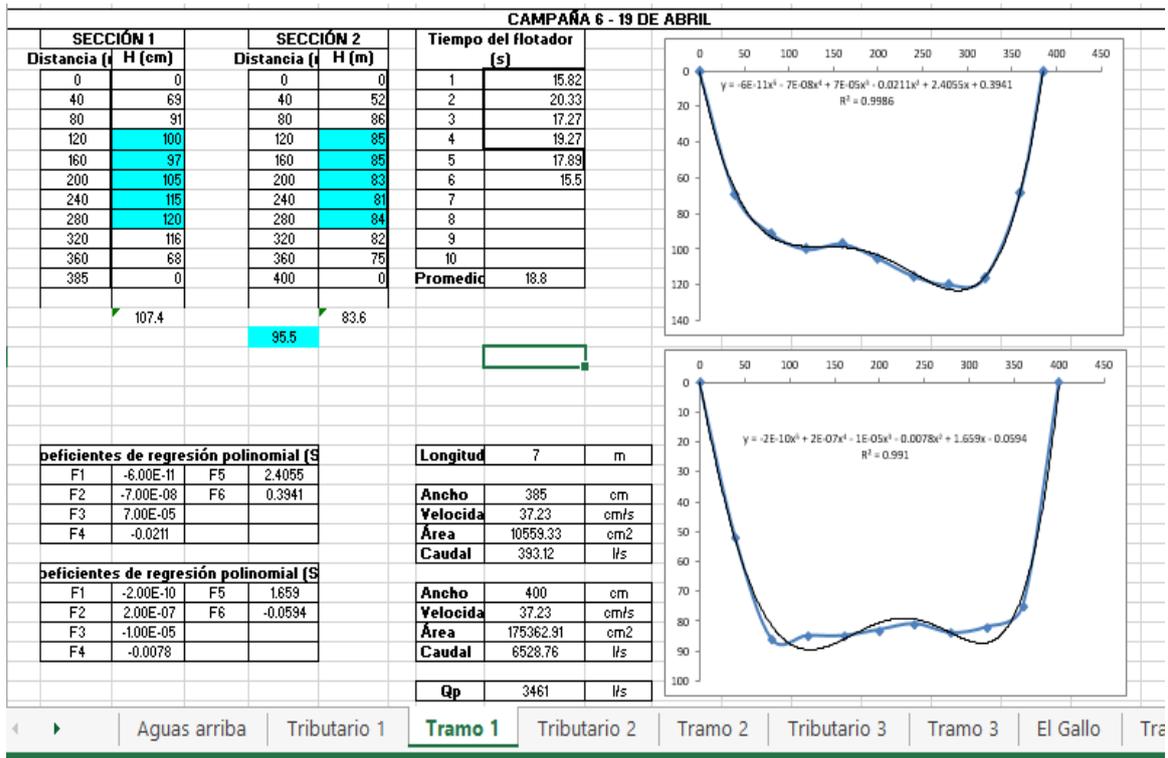
7.2. Hoja de Caudales



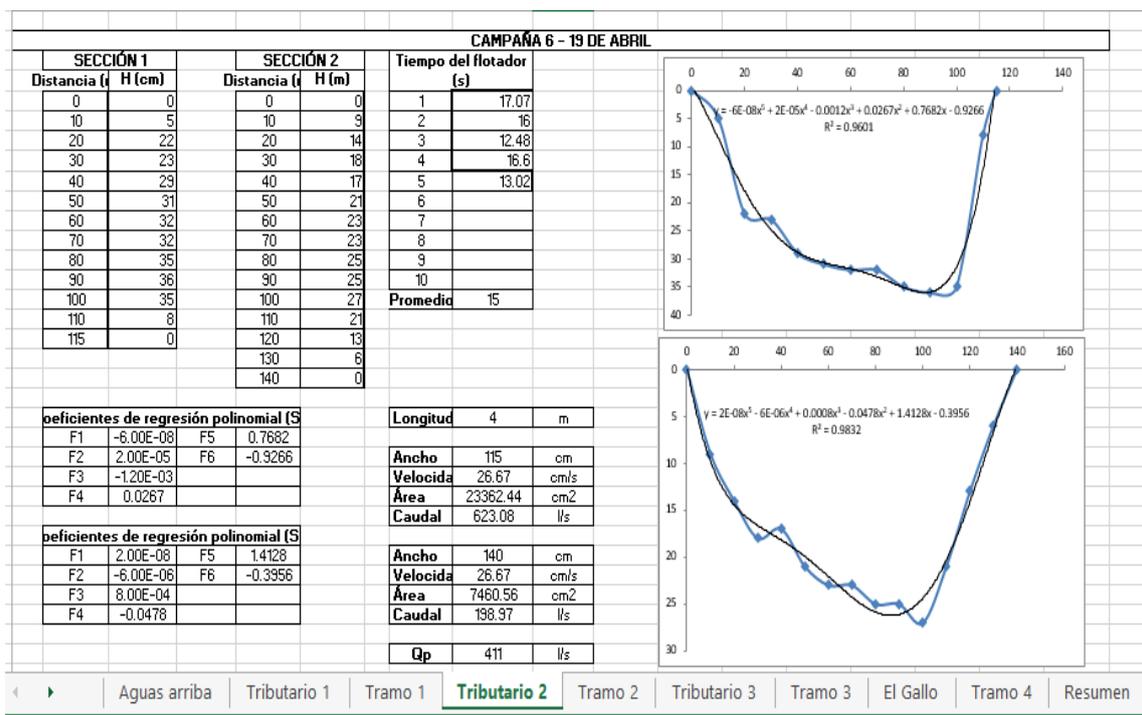
Anexo 2. Caudal aguas arriba, campaña 6.



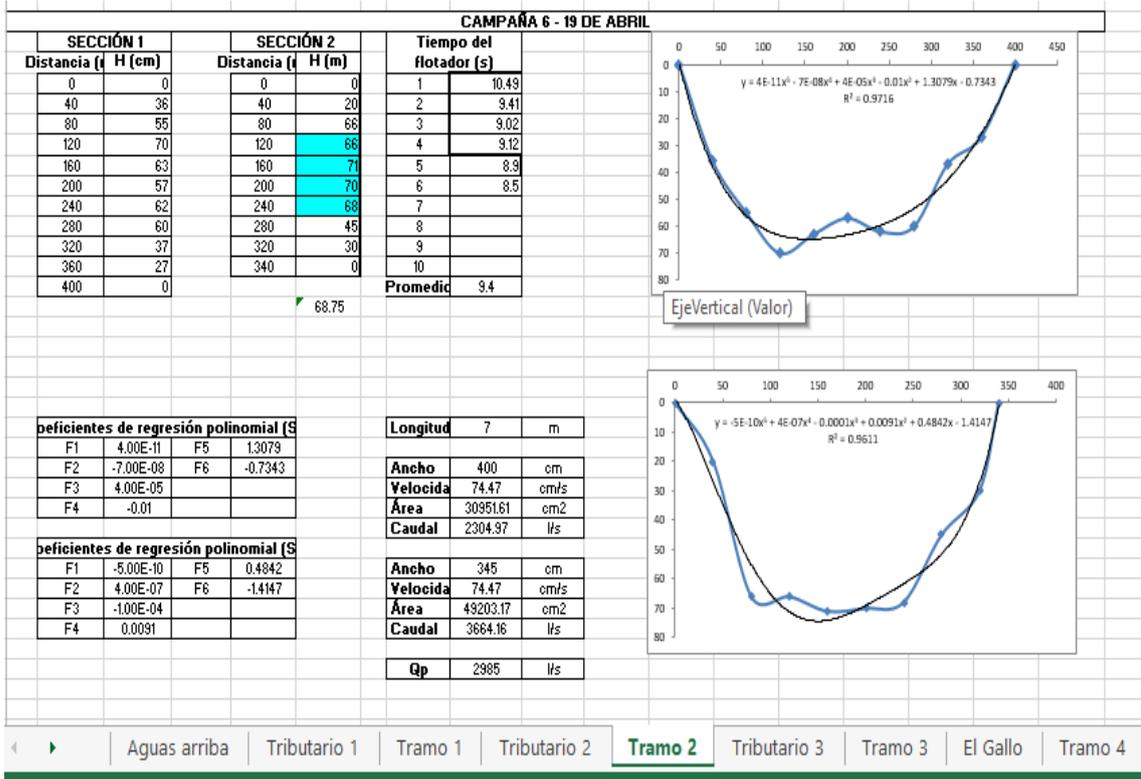
Anexo 3. Caudal tributario 1, campaña 6



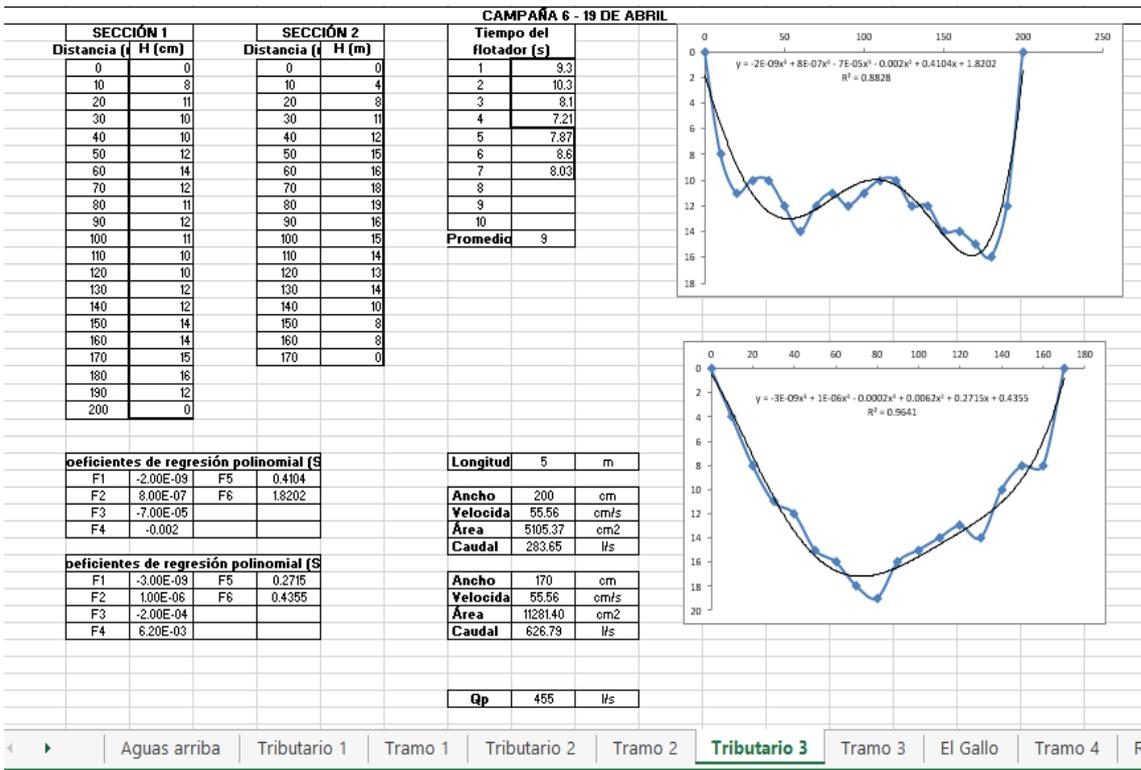
Anexo 4. Caudal tramo 1, campaña 6



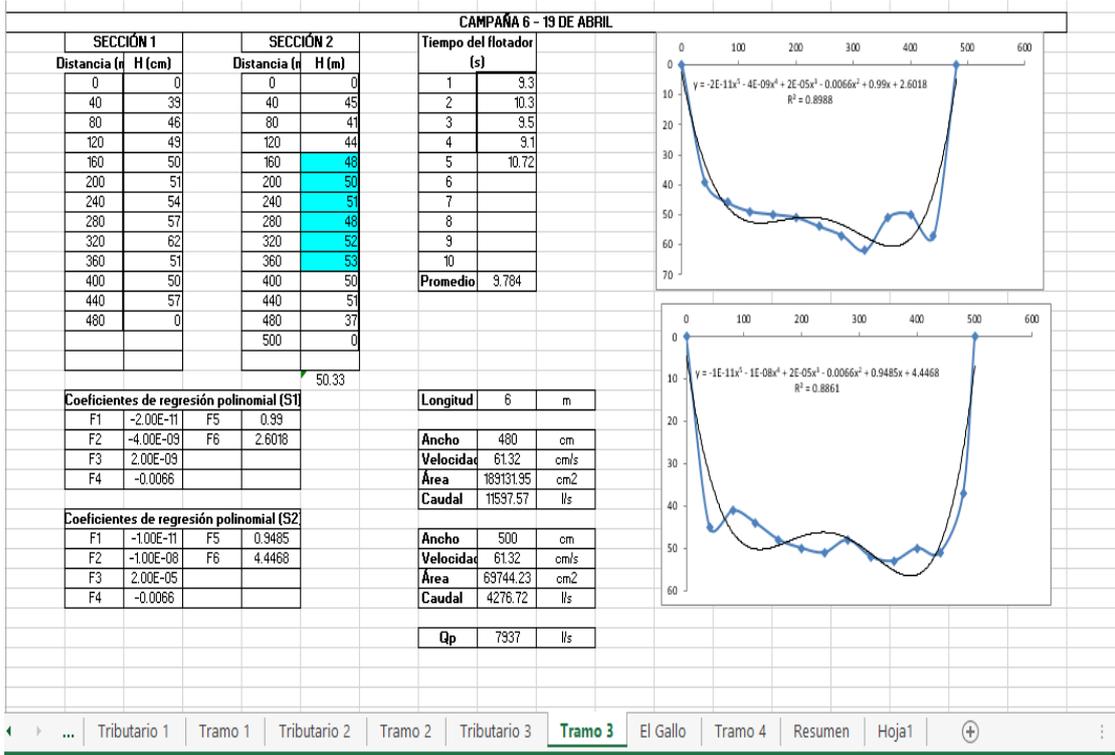
Anexo 5. Caudal tributario 2, campaña 6



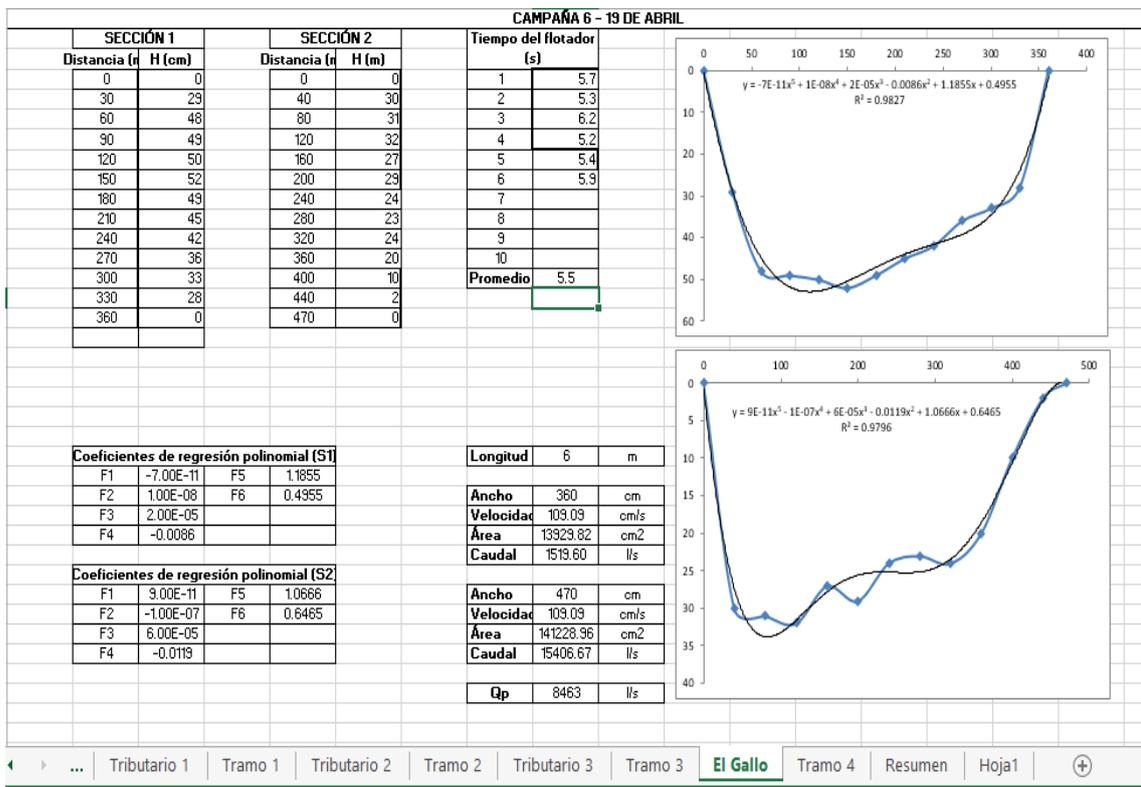
Anexo 6. Caudal tramo 2, campaña 6



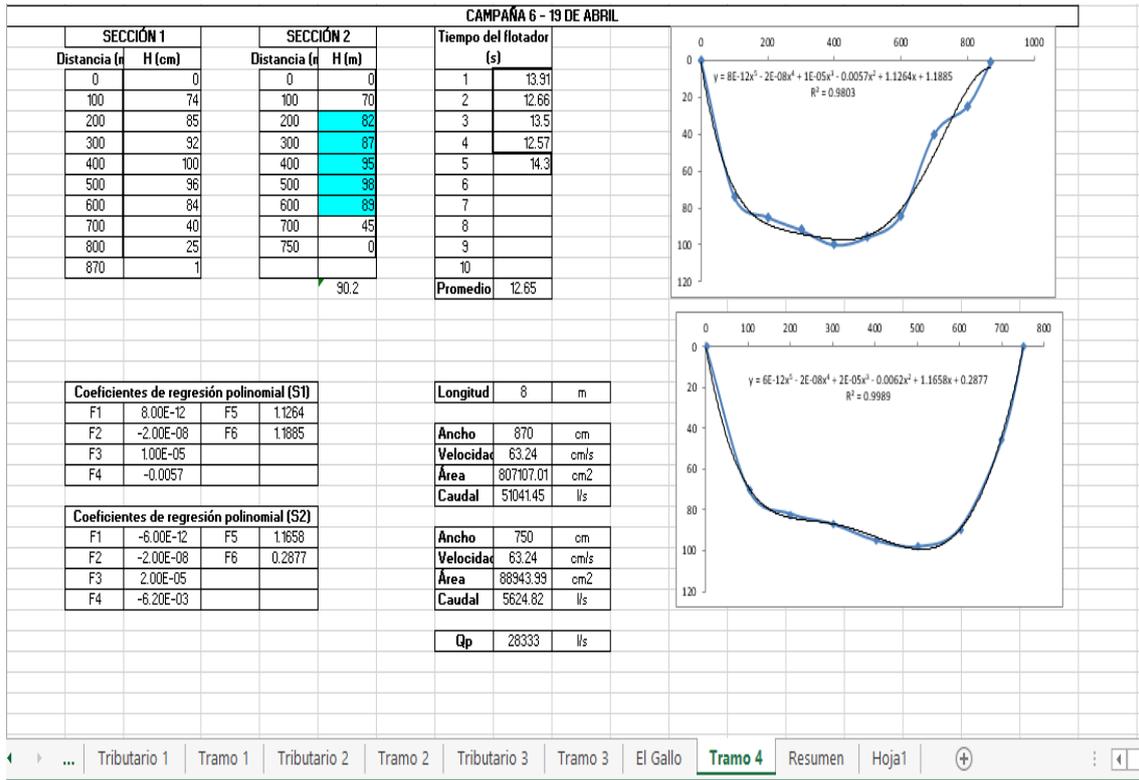
Anexo 7. Caudal tributario 3, campaña 6



Anexo 8. Caudal tramo 3, campaña 6



Anexo 9. Caudal tributario el Gallo, campaña 6



Anexo 10. Caudal tramo 4, campaña 6

7.3. Hoja del Modelo Streeter-Phelps

Streeter-Phelps_Tesis_El Limón.xlsx - Microsoft Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMPLEMENTOS NITRO PRO EQUIPO Maybe Per...

L81

DATOS																	
Corriente aguas arrib			Entrada 1			Entrada 2			Entrada 3			Entrada 4			Entrada 5		
Qr (m3/s)	2.368		Q (m3/s)	0.037		Q (m3/s)	0.438		Qr (m3/s)	0.085		Qr (m3/s)	0.337		Qr (m3/s)	1.576	
DB05	2		DB05	800		DB05	2.5		DB05	1		DB05	2		DB05	2	
DB05u	2.4		DB05u	1176		DB05u	3		DB05u	1.2		DB05u	2.4		DB05u	2.4	
Odr (mg/l)	6.77		Odr (mg/l)	0.2		Odr (mg/l)	7.36		Odr (mg/l)	6.56		Odr (mg/l)	7.41		Odr (mg/l)	6.61	
T (°C)	27.1		T (°C)	31.25		T (°C)	26.85		T (°C)	27.4		T (°C)	26.45		T (°C)	27.65	

Hidrodinámica de la corriente					Valores observados en campo					
Tramo	V (m/s)	H (m)	S (m/m)	Q (l/s)	P. Muestra	x (m)	z (m)	OD (mg/l)	BO5 (mg/l)	BOu (mg/l)
Tramo 1	0.48	0.66	0.002	3443	PM-T1	1000	68	4.30	3.0	10.8
Tramo 2	0.72	0.83	0.001	3529	PM-T2	1270	65	3.84	7.5	9.0
Tramo 3	0.73	0.67	-0.004	3912	PM-T3	3190	60	4.32	5.0	6.0
Tramo 4	0.85	0.72	-0.006	5488	PM-T4	5500	45	8.02	4.0	4.8

Constantes cinéticas de reacción											
Tramo	Constante de aireación				Ka calibrad	Constante de desoxygenación			Constante remoción t		
	ka 20 °C	ka (T)	ka 20 °C	ka (T)		kd a 20 °C	kd (T)	kd calibrad	kr (T)	kr calibrad	
1	5.078	6.011	4.279	5.065	0.549	0.525	0.728	8.360	30.269	13.847	
2	4.340	5.342	4.732	5.633	1.667	0.476	0.659	12.151	11.526	16.942	
3	7.750	9.236	6.903	8.281	117.080	0.522	0.723	0.801	-3.538	1.000	
4	7.394	8.886	6.750	8.112	19.364	0.506	0.701	0.469	4.401	0.509	

Tramo		ER
1	2	0.15
2	3	8.15
3	4	1.30
4		2.35

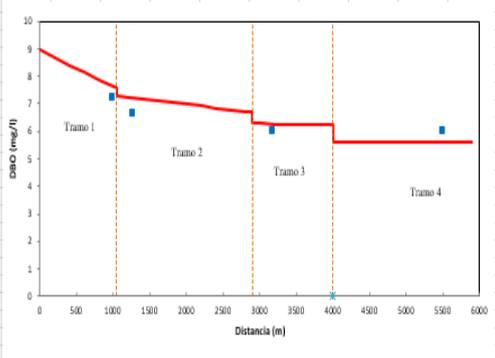
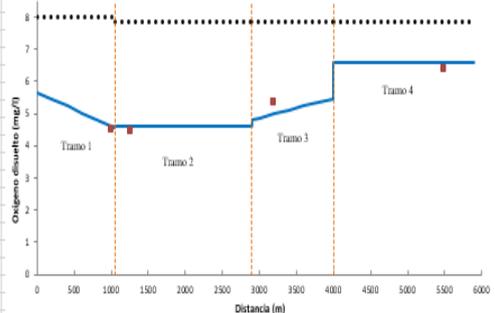
Condiciones iniciales											
Tramo 1			Tramo 2			Tramo 3			Tramo 4		
Lo (mg/l)	Odo (mg/l)	To (°C)	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Lo (mg/l)	Odo (mg/l)	To (°C)	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado
15.09	5.85	27.11	6.87	6.87	10.40	1.87	1.87	27.67	4.85	4.85	4.85
			6.82	6.80	4.25	7.02	6.37	2.06	6.87	6.91	8.44
			27.79						27.75		
			7.86						7.86		
			1.04	1.06	3.61	0.85	0.90	5.81	1.00	0.96	-0.58

Ajuste inicial del modelo						Modelo calibrado								
x (m)	Primer ajuste			Segundo ajuste			x (m)	Modelo calibrado			D (mg/l)	OD (mg/l)	BO (mg/l)	DBO (mg/l)
	D (mg/l)	OD (mg/l)	D (mg/l)	OD (mg/l)	BO (mg/l)	D (mg/l)		OD (mg/l)	BO (mg/l)	DBO (mg/l)				
0	1.10	6.85	1.10	6.85	15.09	0	1.10	6.85	15.09					
200	1.12	6.83	1.12	6.83	13.04	200	1.69	6.27	14.12					
400	1.13	6.82	1.14	6.81	11.27	400	2.23	5.72	13.20					
600	1.13	6.82	1.15	6.80	9.74	600	2.74	5.21	12.35					
800	1.13	6.82	1.15	6.80	8.42	800	3.21	4.74	11.55					
1000	1.13	6.83	1.15	6.80	7.27	1000	3.66	4.30	10.81					
1050	1.13	6.83	1.15	6.80	7.01	1050	3.76	4.19	10.63					
1050	1.13	6.83	1.15	6.80	7.01	1050	3.61	4.25	10.40					
1200	1.12	6.83	1.15	6.81	6.29	1200	3.89	3.97	9.98					
1400	1.11	6.85	1.14	6.81	5.43	1400	4.25	3.61	9.45					
1600	1.09	6.86	1.13	6.82	4.69	1600	4.58	3.27	8.95					
1800	1.08	6.88	1.12	6.83	4.06	1800	4.90	2.96	8.48					
2000	1.06	6.89	1.10	6.85	3.51	2000	5.19	2.66	8.03					
2200	1.04	6.91	1.09	6.86	3.03	2200	5.47	2.39	7.60					
2400	1.02	6.93	1.07	6.88	2.62	2400	5.73	2.13	7.20					
2600	1.00	6.95	1.05	6.90	2.26	2600	5.97	1.88	6.82					
2800	0.98	6.97	1.04	6.92	1.96	2800	6.20	1.66	6.46					
2900	0.97	6.99	1.03	6.93	1.82	2900	6.31	1.55	6.28					
2900	1.04	6.91	1.06	6.80	6.87	2900	5.81	2.06	5.95					
3000	1.03	6.92	1.05	6.81	6.91	3000	4.90	2.97	5.94					
3200	1.02	6.93	1.04	6.82	6.98	3200	3.49	4.38	5.92					
3400	1.00	6.95	1.03	6.83	7.05	3400	2.49	5.38	5.91					
3600	0.99	6.96	1.02	6.84	7.12	3600	1.78	6.09	5.89					
3800	0.98	6.97	1.01	6.85	7.20	3800	1.27	6.60	5.87					
4000	0.97	6.98	1.00	6.86	7.27	4000	0.92	6.95	5.85					
4000	0.85	7.02	0.90	6.97	1.87	4000	-0.58	8.44	4.85					
4200	0.84	7.03	0.89	6.98	1.85	4200	-0.54	8.40	4.84					
4400	0.82	7.05	0.87	7.00	1.83	4400	-0.51	8.37	4.84					
4600	0.80	7.07	0.86	7.01	1.80	4600	-0.48	8.34	4.83					
4800	0.79	7.08	0.84	7.03	1.78	4800	-0.45	8.31	4.82					
5000	0.77	7.10	0.83	7.04	1.76	5000	-0.42	8.28	4.82					
5200	0.76	7.11	0.81	7.06	1.74	5200	-0.39	8.25	4.81					
5400	0.74	7.13	0.80	7.07	1.72	5400	-0.36	8.22	4.80					
5600	0.73	7.14	0.78	7.09	1.70	5600	-0.34	8.20	4.80					
5800	0.71	7.16	0.77	7.10	1.68	5800	-0.32	8.18	4.79					
5900	0.71	7.16	0.76	7.11	1.67	5900	-0.30	8.16	4.79					

Anexo 11. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Febrero

Y50

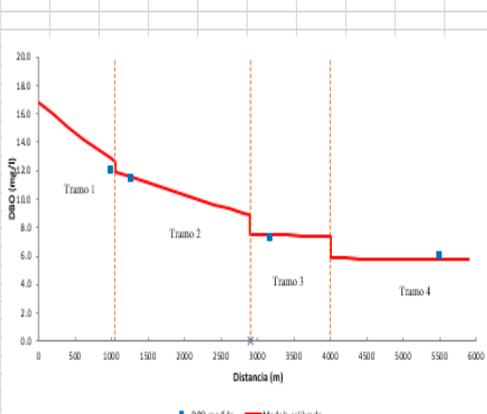
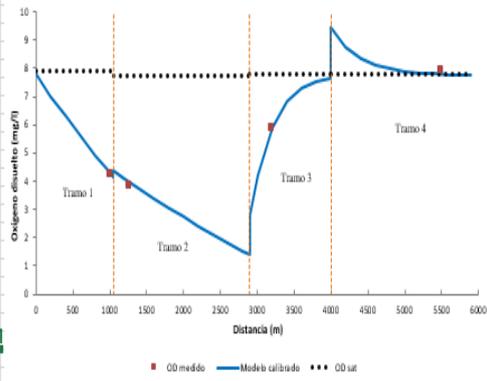
DATOS																	
Corriente aguas arroy			Entrada 1			Entrada 2			Entrada 3			Entrada 4			Entrada 5		
Q (m ³ /s)	3.937		Q (m ³ /s)	0.027		Q (m ³ /s)	0.708		Q (m ³ /s)	0.201		Q (m ³ /s)	0.509		Q (m ³ /s)	1.624	
DBO5	2.3		DBO5	700		DBO5	3.0		DBO5	1		DBO5	2		DBO5	3	
DBO5u	3		DBO5u	1029		DBO5u	3.6		DBO5u	1.2		DBO5u	2.4		DBO5u	3.8	
Od (mg/l)	5.52		Od (mg/l)	0.6		Od (mg/l)	6.74		Od (mg/l)	5.41		Od (mg/l)	6.53		Od (mg/l)	6.68	
T (°C)	26.6		T (°C)	30.55		T (°C)	26.25		T (°C)	26.1		T (°C)	26.75		T (°C)	27.85	
Hydrodinámica de la corriente						Valores observados en campo											
V (m/s)	0.75	H (m)	0.76	S (m/m)	0.002	Q (l/s)	4372	P. Muestra	z (m)	z (m)	OD (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DBO5u (mg/l)				
Tramo 1	0.96	0.74	0.001	5013	PM-T1	1000	66	4.43	6.0	7.2							
Tramo 2	0.85	0.60	-0.004	5574	PM-T2	1270	65	4.44	5.5	6.6							
Tramo 3	0.85	0.66	-0.006	7198	PM-T3	3190	60	5.33	5.0	6.0							
					PM-T4	5500	45	6.38	5.0	6.0							
Constantes cinéticas de reacción																	
Tramo	Constante de reaeración					Constante de desoxygenación					Constante remoción t						
	ka 20 °C	ka (T)	Linquinán	Duran	ka	kd a 20 °C	kd (T)	kd	kr (T)	kr	Tramo	ER					
	Churchill	Linquinán	Duran	calibrado	Hydrocinética	calibrado	Carga	calibrado			1	8.70					
1	5.802	6.780	5.395	6.304	0.136	0.434	0.668	7.375	-15.467	3.375	2	8.75					
2	7.976	6.006	7.350	8.823	0.837	0.500	0.712	0.378	-1.553	3.395	3	6.25					
3	9.392	11.274	5.768	6.909	11.272	0.548	0.777	0.101	-6.790	0.493	4	10.30					
4	8.551	10.242	7.578	9.103	0.060	0.525	0.749	0.045	-4.797	0.052							
Condiciones iniciales																	
Tramo 1			Tramo 2				Tramo 3				Tramo 4						
Lo (mg/l)	8.34		Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado			
Odo (mg/l)	5.67		Odo (mg/l)	5.80	5.78	4.62	Odo (mg/l)	6.02	5.39	4.80	Odo (mg/l)	6.34	5.35	6.61			
To (°C)	26.57		To (°C)	27.70		To (°C)	27.61		To (°C)	27.73		To (°C)	27.73				
OD est (mg)	8.03		OD est (mg)	7.87		OD est (mg)	7.88		OD est (mg)	7.87		OD est (mg)	7.87				
Do (mg/l)	2.36		Do (mg/l)	2.07	2.09	3.25	Do (mg/l)	1.86	1.83	3.08	Do (mg/l)	1.54	1.33	1.26			
Ajuste inicial del modelo																	
z (m)	Primer ajuste					Segundo ajuste											
	D (mg/l)	OD (mg/l)	D (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	D (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	D (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)						
0	2.36	5.67	2.36	5.67	8.34	2.36	5.67	8.34	2.36	5.67	8.34						
200	2.33	5.70	2.33	5.70	9.33	2.33	5.70	9.33	2.33	5.70	9.33						
400	2.30	5.73	2.31	5.72	9.74	2.30	5.73	9.74	2.30	5.73	9.74						
600	2.27	5.76	2.28	5.75	10.16	2.27	5.76	10.16	2.27	5.76	10.16						
800	2.25	5.79	2.26	5.77	10.61	2.25	5.79	10.61	2.25	5.79	10.61						
1000	2.22	5.81	2.24	5.79	11.07	2.22	5.81	11.07	2.22	5.81	11.07						
1050	2.21	5.82	2.23	5.80	11.19	2.21	5.82	11.19	2.21	5.82	11.19						
1050	2.21	5.82	2.23	5.80	11.19	2.21	5.82	11.19	2.21	5.82	11.19						
1200	2.20	5.83	2.22	5.81	11.55	2.20	5.83	11.55	2.20	5.83	11.55						
1400	2.17	5.86	2.20	5.83	12.05	2.17	5.86	12.05	2.17	5.86	12.05						
1600	2.15	5.88	2.18	5.85	12.58	2.15	5.88	12.58	2.15	5.88	12.58						
1800	2.14	5.90	2.16	5.87	13.13	2.14	5.90	13.13	2.14	5.90	13.13						
2000	2.12	5.91	2.15	5.88	13.70	2.12	5.91	13.70	2.12	5.91	13.70						
2200	2.10	5.93	2.14	5.90	14.30	2.10	5.93	14.30	2.10	5.93	14.30						
2400	2.09	5.94	2.12	5.91	14.92	2.09	5.94	14.92	2.09	5.94	14.92						
2600	2.08	5.95	2.11	5.92	15.57	2.08	5.95	15.57	2.08	5.95	15.57						
2800	2.06	5.97	2.11	5.93	16.25	2.06	5.97	16.25	2.06	5.97	16.25						
2900	2.06	5.97	2.10	5.93	16.61	2.06	5.97	16.61	2.06	5.97	16.61						
2900	2.07	5.96	2.09	5.78	10.78	2.07	5.96	10.78	2.07	5.96	10.78						
3000	2.04	5.99	2.08	5.79	10.33	2.04	5.99	10.33	2.04	5.99	10.33						
3200	1.98	6.05	2.05	5.82	11.24	1.98	6.05	11.24	1.98	6.05	11.24						
3400	1.93	6.10	2.03	5.84	11.55	1.93	6.10	11.55	1.93	6.10	11.55						
3600	1.88	6.15	2.01	5.86	11.87	1.88	6.15	11.87	1.88	6.15	11.87						
3800	1.83	6.20	1.99	5.88	12.20	1.83	6.20	12.20	1.83	6.20	12.20						
4000	1.79	6.24	1.98	5.89	12.55	1.79	6.24	12.55	1.79	6.24	12.55						
4000	1.86	6.02	1.89	5.93	15.28	1.86	6.02	15.28	1.86	6.02	15.28						
4200	1.84	6.04	1.88	6.00	15.48	1.84	6.04	15.48	1.84	6.04	15.48						
4400	1.82	6.06	1.86	6.02	15.68	1.82	6.06	15.68	1.82	6.06	15.68						
4600	1.80	6.08	1.85	6.03	15.89	1.80	6.08	15.89	1.80	6.08	15.89						
4800	1.79	6.09	1.84	6.04	16.10	1.79	6.09	16.10	1.79	6.09	16.10						
5000	1.77	6.11	1.82	6.06	16.31	1.77	6.11	16.31	1.77	6.11	16.31						
5200	1.75	6.13	1.81	6.07	16.53	1.75	6.13	16.53	1.75	6.13	16.53						
5400	1.74	6.14	1.80	6.08	16.74	1.74	6.14	16.74	1.74	6.14	16.74						
5600	1.73	6.15	1.79	6.09	16.96	1.73	6.15	16.96	1.73	6.15	16.96						
5800	1.71	6.17	1.78	6.10	17.19	1.71	6.17	17.19	1.71	6.17	17.19						
5900	1.71	6.17	1.78	6.10	17.30	1.71	6.17	17.30	1.71	6.17	17.30						



Anexo 12. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Marzo.

M53

DATOS																	
Corriente aguas arriba			Entrada 1			Entrada 2			Entrada 3			Entrada 4			Entrada 5		
Qr (m ³ /s)	1.832		Q (m ³ /s)	0.030		Q (m ³ /s)	0.533		Qr (m ³ /s)	0.148		Qr (m ³ /s)	0.575		Qr (m ³ /s)	1.439	
DBO5	2		DBO5	798		DBO5	10		DBO5	1		DBO5	1		DBO5	2	
DBO5u	2.4		DBO5u	1173.06		DBO5u	12		DBO5u	1.2		DBO5u	1.2		DBO5u	2.4	
ODr (mg/l)	1.77		OD (mg/l)	0.55		OD (mg/l)	8.28		ODr (mg/l)	8.06		ODr (mg/l)	9		ODr (mg/l)	8.81	
T (°C)	27.45		T (°C)	30.05		T (°C)	26.5		T (°C)	26.7		T (°C)	26.3		T (°C)	27.2	
Hidrodinámica de la corriente						Valores observados en campo											
V (m/s)	H (m)	S (m/m)	Q (l/s)			P. Muestra	x (m)	z (m)	OD (mg/l)	BO5 (mg/l)	BO5u (mg/l)						
Tramo 1	0.34	0.72	0.002	2334		PM-T1	1000	68	4.23	10.0	12.0						
Tramo 2	0.58	0.61	0.001	2566		PM-T2	1270	65	3.84	3.5	11.4						
Tramo 3	0.37	0.43	-0.004	3260		PM-T3	3190	60	5.86	6.0	7.2						
Tramo 4	0.62	0.80	-0.006	4613		PM-T4	5500	45	7.83	5.0	6.0						
Constantes cinéticas de reacción																	
Tramo	Constante de reaireación				Constante de desoxygenación								Tramo	ER			
	ka 20 °C	ka (T)	ka 20 °C	ka (T)	Ka	kd a 20 °C	kd (T)	kd	kr (T)	kr							
	O'Connor/Dobbins	Lonqubini/Dunne			calibrad	Hydroclicene	calibrad	Cargo	calibrad								
1	3.751	4.457	2.700	3.208	0.112	0.506	0.706	6.387	-2.663	7.392	1	7.85					
2	3.216	11.387	5.742	7.035	0.117	0.544	0.753	7.890	2.830	7.393	2	4.67					
3	8.478	10.357	5.832	7.124	106.010	0.633	0.884	0.145	-3.052	0.188	3	3.58					
4	4.523	5.518	4.280	5.221	142.042	0.483	0.675	0.286	0.343	0.301	4	3.61					
Condiciones iniciales																	
Tramo 1			Tramo 2			Tramo 3			Tramo 4								
Lo (mg/l)	16.80		Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado	Ajuste 1	Ajuste 2	Calibrado						
ODO (mg/l)	7.79		ODO (mg/l)	7.44	7.42	4.38	ODO (mg/l)	7.16	7.10	2.79	ODO (mg/l)	5.84	5.84	5.84			
To (°C)	27.27		To (°C)	28.92		To (°C)	28.44		To (°C)	28.38		To (°C)	7.76	7.35	9.45		
OD sat (mg)	7.93		OD sat (mg)	7.70		OD sat (mg)	7.77		OD sat (mg)	7.78		OD sat (mg)	0.01	0.42	-1.67		
Do (mg/l)	0.14		Do (mg/l)	0.26	0.28	3.32	Do (mg/l)	0.61	0.67	4.38	Do (mg/l)	0.01	0.42	-1.67			
Ajuste inicial del modelo																	
x (m)	Primer ajuste				Segundo ajuste				Modelo calibrado								
	D (mg/l)	DD (mg/l)	D (mg/l)	DD (mg/l)	D (mg/l)	DD (mg/l)	D (mg/l)	DD (mg/l)	D (mg/l)	DD (mg/l)	D (mg/l)	DD (mg/l)					
0	0.14	7.79	0.14	7.79	16.80	0	0.14	7.79	16.80	0	0.14	7.79	16.80				
200	0.22	7.71	0.22	7.71	17.11	200	0.32	7.01	15.91	200	0.32	7.01	15.91				
400	0.29	7.64	0.30	7.64	17.42	400	1.65	6.28	15.07	400	1.65	6.28	15.07				
600	0.37	7.56	0.37	7.56	17.74	600	2.35	5.58	14.27	600	2.35	5.58	14.27				
800	0.44	7.49	0.45	7.49	18.06	800	3.01	4.92	13.51	800	3.01	4.92	13.51				
1000	0.51	7.42	0.53	7.40	18.39	1000	3.63	4.30	12.80	1000	3.63	4.30	12.80				
1050	0.53	7.40	0.55	7.38	18.48	1050	3.78	4.15	12.63	1050	3.78	4.15	12.63				
1050	0.53	7.40	0.55	7.38	18.48	1050	3.32	4.38	11.96	1050	3.32	4.38	11.96				
1200	0.53	7.34	0.60	7.33	18.73	1200	3.60	4.10	11.68	1200	3.60	4.10	11.68				
1400	0.66	7.27	0.68	7.25	19.07	1400	3.96	3.74	11.31	1400	3.96	3.74	11.31				
1600	0.73	7.20	0.76	7.17	19.42	1600	4.31	3.39	10.95	1600	4.31	3.39	10.95				
1800	0.80	7.13	0.83	7.10	19.78	1800	4.65	3.06	10.61	1800	4.65	3.06	10.61				
2000	0.87	7.06	0.91	7.02	20.14	2000	4.97	2.73	10.28	2000	4.97	2.73	10.28				
2200	0.94	6.99	0.93	6.94	20.51	2200	5.29	2.41	9.95	2200	5.29	2.41	9.95				
2400	1.01	6.92	1.06	6.87	20.88	2400	5.59	2.11	9.64	2400	5.59	2.11	9.64				
2600	1.08	6.85	1.14	6.79	21.26	2600	5.89	1.81	9.34	2600	5.89	1.81	9.34				
2800	1.15	6.78	1.22	6.71	21.65	2800	6.18	1.52	9.05	2800	6.18	1.52	9.05				
2900	1.18	6.75	1.26	6.67	21.85	2900	6.32	1.38	8.90	2900	6.32	1.38	8.90				
2900	0.26	7.67	0.28	7.42	17.47	2900	4.38	2.79	7.48	2900	4.38	2.79	7.48				
3000	0.30	7.63	0.32	7.38	17.64	3000	3.58	4.19	7.48	3000	3.58	4.19	7.48				
3200	0.38	7.55	0.41	7.29	17.98	3200	1.85	5.92	7.47	3200	1.85	5.92	7.47				
3400	0.45	7.48	0.49	7.21	18.32	3400	0.96	6.81	7.46	3400	0.96	6.81	7.46				
3600	0.52	7.41	0.57	7.13	18.68	3600	0.50	7.27	7.45	3600	0.50	7.27	7.45				
3800	0.53	7.34	0.64	7.06	19.04	3800	0.26	7.51	7.44	3800	0.26	7.51	7.44				
4000	0.66	7.27	0.72	6.98	19.40	4000	0.14	7.63	7.43	4000	0.14	7.63	7.43				
4000	0.61	7.16	0.67	7.10	18.04	4000	-1.67	9.45	5.84	4000	-1.67	9.45	5.84				
4200	0.64	7.13	0.70	7.07	18.02	4200	-0.98	8.76	5.83	4200	-0.98	8.76	5.83				
4400	0.67	7.10	0.73	7.04	17.99	4400	-0.57	8.35	5.83	4400	-0.57	8.35	5.83				
4600	0.70	7.07	0.76	7.01	17.97	4600	-0.33	8.11	5.82	4600	-0.33	8.11	5.82				
4800	0.73	7.04	0.79	6.98	17.95	4800	-0.19	7.97	5.81	4800	-0.19	7.97	5.81				
5000	0.76	7.01	0.82	6.95	17.92	5000	-0.11	7.83	5.81	5000	-0.11	7.83	5.81				
5200	0.79	6.98	0.85	6.92	17.90	5200	-0.06	7.84	5.80	5200	-0.06	7.84	5.80				
5400	0.82	6.95	0.88	6.89	17.88	5400	-0.03	7.81	5.79	5400	-0.03	7.81	5.79				
5600	0.85	6.92	0.91	6.86	17.86	5600	-0.01	7.79	5.79	5600	-0.01	7.79	5.79				
5800	0.88	6.89	0.93	6.84	17.83	5800	0.00	7.78	5.78	5800	0.00	7.78	5.78				
5900	0.89	6.88	0.95	6.82	17.82	5900	0.00	7.78	5.78	5900	0.00	7.78	5.78				



Anexo 13. Hoja de cálculo del modelo Streeter-Phelps del mes de Abril.

7.4. Hoja de Stacgraphics

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 1.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: 17058

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(0.4,1.0)
kd	UNIFORM(5.0,12.0)
kr	UNIFORM(12.0,20.0)
OD	$7.95 - (1.10 * \text{EXP}(-ka * (1000 / (0.48 * 86400)))) + ((kd * 15.09) / (ka - kr)) * (\text{EXP}(-kr * (1000 / (0.48 * 86400)))) - \text{EXP}(-ka * (1000 / (0.48 * 86400)))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 4.30) / OD) * 100$
DBO	$(15.09 * \text{EXP}(-kr * 1000) / (0.48 * 86400))$
RE_DBO	$\text{ABS}(DBO - 10.8) / DBO * 100$
RE_TOTAL	RE_OD + RE_DBO

El StatAdvisor
 En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para stimar 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.

Anexo 14. Statgraphics mes de Febrero, tramo 1

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 2.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: 17224

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(0.4,2.371)
kd	UNIFORM(1.0,13.0)
kr	UNIFORM(13.0,17.0)
OD	$7.86 - (3.61 * \text{EXP}(-ka * (220 / (0.72 * 86400)))) + ((kd * 10.4) / (ka - kr)) * (\text{EXP}(-kr * (220 / (0.72 * 86400)))) - \text{EXP}(-ka * (220 / (0.72 * 86400)))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 3.84) / OD) * 100$
DBO	$(10.4 * \text{EXP}(-kr * 220) / (0.72 * 86400))$
RE_DBO	$\text{ABS}(DBO - 9) / DBO * 100$
RE_TOTAL	RE_OD + RE_DBO

El StatAdvisor
 En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para stimar 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.

Anexo 15. Statgraphics mes de Febrero, tramo 2.

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 3.sgp

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

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

Simulaciones Monte Carlo

Tamaño de muestra: 10000
 Semilla para el generador de números aleatorios: 17246

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(0.1,120.0)
kd	UNIFORM(0.746,1.0)
kr	UNIFORM(1.0,1.5)
OD	$7.87 - ((5.81 * \text{EXP}(-ka * (290 / (0.79 * 86400)))) + ((kd * 5.95) * (\text{EXP}(-kr * (290 / (0.79 * 86400)))) - \text{EXP}(-ka * (290 / (0.79 * 86400)))))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 4.32) * OD) * 100$
DBO	$(5.95 * \text{EXP}(-kr * 290 / (0.79 * 86400)))$
RE_DBO	$\text{ABS}((DBO - 6) * DBO) * 100$
RE_TOTAL	RE_OD + RE_DBO

El StatAdvisor
 En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para stimar 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.

Anexo 16. Statgraphics mes de Febrero, tramo 3.

STATGRAPHICS Centurion - TRAMO 4.sgp

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

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

Simulaciones Monte Carlo

Tamaño de muestra: 10000
 Semilla para el generador de números aleatorios: 17276

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(0.1,20.0)
kd	UNIFORM(0.1,0.5)
kr	UNIFORM(0.5,1.0)
OD	$7.86 - ((0.58 * \text{EXP}(-ka * (1500 / (0.85 * 86400)))) + ((kd * 4.85) * (\text{EXP}(-kr * (1500 / (0.85 * 86400)))) - \text{EXP}(-ka * (1500 / (0.85 * 86400)))))$
RE_OD	$\text{ABS}((OD - 8.02) * OD) * 100$
DBO	$(4.85 * \text{EXP}(-kr * 1500 / (0.85 * 86400)))$
RE_DBO	$\text{ABS}((DBO - 4.8) * DBO) * 100$
RE_TOTAL	RE_OD + RE_DBO

El StatAdvisor
 En este procedimiento se realiza una simulación Monte Carlo, que puede emplearse para stimar 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.

Anexo 17. Statgraphics mes de Febrero, tramo 4.

7.5. Hoja de QUAL2K

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

System ID:

River name	Estero Limon
Saved file name	FEBRERO CALI
Directory where file saved	:\Users\Usuario\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	0.11 minutes
Time of sunrise	12:10 AM
Time of solar noon	6:14 AM
Time of sunset	12:17 PM
Photoperiod	12.12 hours

Buttons: Open Old File, Run Fortran

Navigation tabs: QUAL2K, Time Zones, Headwater, Downstream, Reach, Reach Rates, Air Temperature

Anexo 18. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Estero Limon (2/8/2019)

Headwater Data:

Number of Headwaters: 1

Headwater 0 (Mainstem)

Headwater label	Reach No	Flow Rate (m ³ /s)	Elevation (m)	Weir				Rating Curves				Manning Formula			
				Weir Type	Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Channel Slope	Manning n	Bot Width (m)
Mainstem headwater	1	2.968	60.000	Sharp	0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0350	3.42

Water Quality Constituents (Units):

Constituent	Units	12:00 a.m.	01:00 a.m.	02:00 a.m.	03:00 a.m.	04:00 a.m.	05:00 a.m.	06:00 a.m.	07:00 a.m.	08:00 a.m.	09:00 a.m.	10:00 a.m.	11:00 a.m.	12:00 p.m.	01:00 p.m.
Temperature	C	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45	27.45
Conductivity	umhos														
Inorganic Solids	mg/DL														
Dissolved Oxygen	mg/L	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77
CBODslow	mgO2/L														
CBODfast	mgO2/L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Organic Nitrogen	ug/NL														
NH4-Nitrogen	ug/NL														
NO3-Nitrogen	ug/NL														
Organic Phosphorus	ug/P/L														
Inorganic Phosphorus (SRP)	ug/P/L														
Phytoplankton	ug/A/L														
Internal Nitrogen (INP)	ug/N/L														
Internal Phosphorus (IPP)	ug/P/L														
Detritus (POM)	mg/D/L														

Buttons: Open Old File, Run Fortran

Navigation tabs: QUAL2K, Time Zones, Headwater, Downstream, Reach, Reach Rates, Air Temperature

Anexo 19. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero

Microsoft Excel - FEBRERO_CALL.xls [Modo de compatibilidad]

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMPLEMENTOS NITRO PRO EQUIPO

B6 : X ✓ fx 5

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Estero_Limon (2/8/2019)
Reach Data:

Open Old File Run Fortran

Reach for diel plot	5						Location		Element	Elevation	
Element for diel plot	1	Reach	Headwater	Reach	Downstream	Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream	
Reach	Downstream	Number	Reach	length	Latitude	Longitude	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)
Label	end of reach label			(km)						Degrees	
Mainstem headwater	Tramo 1	1	Yes	0.52	0.00	0.00	6.420	5.900	2	70.000	62.000
Tramo 1	Tramo 2	2		1.05	0.00	0.00	5.900	4.850	2	62.000	60.000
Tramo 2	Tramo 3	3		1.85	0.00	0.00	4.850	3.000	2	60.000	60.000
Tramo 3	Tramo 4	4		1.10	0.00	0.00	3.000	1.900	2	60.000	56.000
Tramo 4	Desembocadura	5		1.90	0.00	0.00	1.900	0.000	2	56.000	56.000

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature

Anexo 20. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero

Microsoft Excel - FEBRERO_CALL.xls [Modo de compatibilidad]

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMPLEMENTOS NITRO PRO EQUIPO

D37 : X ✓ fx

Open Old File Run Fortran

Tributary No.	Headwater Label	Location km	Point		Temperature		Specific Conductance			Inorganic Suspended Solids			Dissolved Oxygen		
			Abstraction m3%	Inflow m3%	mean °C	range/2 °C	time of max	mean umhos	range/2 umhos	time of max	mean mg/L	range/2 mg/L	time of max	mean mg/L	range/2 mg/L
0	Mainstem headwater	5.90		0.037	31.25										0.20
0	Mainstem headwater	5.90		0.438	26.85										7.96
0	Mainstem headwater	4.85		0.850	27.40										6.66
0	Mainstem headwater	3.00		0.337	26.45										7.41
0	Mainstem headwater	1.90		1.576	27.65										6.61

Cloud Cover Shade Rates Light and Heat Diffuse Sources Point Sources Hydraulics D ...

Anexo 21. Hoja del modelo QUAL2K para el mes de Febrero

7.6. Fotografías



Anexo 22. Aforo en el punto de muestreo tramo uno.



Anexo 23. Toma de datos en la descarga del botadero de basura.



Anexo 24. Aforo en el punto de muestreo tramo uno.



Anexo 25. Toma de muestra de agua en el tributario dos



Anexo 26. Aforo en el punto de muestreo tramo dos.



Anexo 27. Aforo en el tributario tres.



Anexo 28. Toma de muestra de agua en el punto de muestreo tramo tres.



Anexo 29. Aforo en el tributario el Gallo.



Anexo 30. Toma de muestra de agua en el punto de muestreo tramo 4.



Anexo 31. Análisis de muestras en laboratorio de suelos y aguas.