

**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RÍO LA
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RÍO PALO**

**YENNY VIVIANA GUERRERO MARTÍNEZ
CLAUDIA PATRICIA TORRES ORTEGA**

**DIRECTOR
PAULO MAURICIO ESPINOSA
Ingeniero Químico, MSc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN – CAUCA
2010**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	8
1. JUSTIFICACIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA PALO – PAILA.....	12
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES RÍO PALO.....	12
3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES RÍO PAILA.....	13
4. MODELO MATEMATICO QUAL2E Y MODELO QUAL2K.....	16
4.1 MODELO MATEMÁTICO QUAL2E.....	16
4.2 MODELO MATEMÁTICO QUAL2K.....	17
4.2.1 Entradas del Modelo.....	19
4.2.2 Representación funcional del modelo.....	19
4.2.3 Parámetros fisicoquímicos a modelar.....	23
5. MIGRACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL RÍO PALO EN QUAL2K.....	27
5.1 MIGRACIÓN DEL MODELO Q2E A Q2K PARA EL RÍO PALO.....	27
5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	35
5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO.....	48
6. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA PARTE BAJA PARA EL RÍO PAILA A TRAVÉS DEL MODELO Q2K.....	55
7. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS PARA LOS RÍOS PALO Y PAILA PARA LA FORMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AGUA.....	68
7.1 ESCENARIOS DE CALIDAD.....	74
7.1.1 Escenario 1: Disminución de Caudal.....	74
7.1.2 Escenario 2: Disminución de Cargas Contaminantes.....	75
7.1.3 Escenario 3: Aumento de Cargas Contaminante.....	75
8. CONCLUSIONES.....	78
9. RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS.....	84

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Migración Caudal río Palo.....	31
Gráfica 2: Migración OD río Palo.....	31
Gráfica 3: Migración DBO _u río Palo.....	31
Gráfica 4: Correlación de Caudal entre 2E y 2K	33
Gráfica 5: Correlación de Oxígeno Disuelto entre 2E y 2K	33
Gráfica 6: Correlación de DBO _u entre 2E y 2K.....	34
Gráfica 7: Caudal simulado – Calibración río Palo.....	39
Gráfica 8: Velocidad simulada – Calibración río Palo.	39
Gráfica 9: Profundidad simulada – Calibración río Palo.....	40
Gráfica 10: Temperatura simulada – Calibración río Palo.....	41
Gráfica 11: Oxigeno Disuelto simulado – Calibración río Palo.....	42
Gráfica 12: DBO _u rápida simulada – Calibración río Palo.	43
Gráfica 13: Amonio simulado – Calibración río Palo.....	44
Gráfica 14: Nitrato simulado – Calibración río Palo.....	45
Gráfica 15: pH simulado – Calibración río Palo.....	46
Gráfica 16: Correlación de Caudal entre datos de campo y datos simulados - calibración	47
Gráfica 17: Correlación de OD entre datos de campo y datos simulados - calibración	47
Gráfica 18: Correlación de DBO _u para calibración	48
Gráfica 19: Caudal simulado - Validación río Palo.....	49
Gráfica 20: Velocidad simulada - Validación río Palo.....	49
Gráfica 21: Profundidad simulada - Validación río Palo.....	50
Gráfica 22: Temperatura simulada - Validación río Palo.....	50
Gráfica 23: Oxigeno Disuelto simulado - Validación río Palo.....	51
Gráfica 24: DBO _u simulada - Validación río Palo.	51
Gráfica 25: Nitrato simulado - Validación río Palo.....	52
Gráfica 26: Amonio simulado - Validación río Palo.....	52
Gráfica 27: pH simulado - Validación río Palo.....	53
Gráfica 28: Correlación de caudal entre datos de campo y datos simulados - validación	53

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

Gráfica 29: Correlación de OD entre datos de campo y datos simulados - validación	54
Gráfica 30: Correlación de DBO_u entre datos de campo y datos simulados - validación	54
Gráfica 31: Resultados simulación hidráulica preliminar QUAL2K.....	58
Gráfica 32: Caudal simulado - Calibración río Paila.....	61
Gráfica 33: Velocidad simulada - Calibración río Paila.	62
Gráfica 34: Profundidad simulada - Calibración río Paila.....	62
Gráfica 35: Temperatura simulada - Calibración río Paila.....	63
Gráfica 36: Oxígeno Disuelto simulado - Calibración río Paila.....	64
Gráfica 37: DBO_u simulada - Calibración río Paila.	65
Gráfica 38: Amonio simulado - Calibración río Paila.....	65
Gráfica 39: Nitrato simulado - Calibración río Paila.....	66
Gráfica 40: Fósforo simulado - Calibración río Paila.....	66
Gráfica 41: pH simulado - Calibración río Paila.....	67
Gráfica 42: Patógenos simulado - Calibración río Paila.	67
Gráfica 43: Caudal simulado - Integración ríos Palo y Paila.	68
Gráfica 44: Velocidad simulada - Integración ríos Palo y Paila.....	69
Gráfica 45: Profundidad simulada - Integración ríos Palo y Paila.	69
Gráfica 46: Temperatura simulada - Integración ríos Palo y Paila.	70
Gráfica 47: Oxígeno Disuelto simulado - Integración ríos Palo y Paila.	70
Gráfica 48: Nivel de aumento de oxígeno disuelto en la integración entre río Palo y Paila.	71
Gráfica 49: DBO_u simulada - Integración ríos Palo y Paila.....	71
Gráfica 50: Nivel de disminución de DBO_u en la integración entre río Palo.....	71
Gráfica 51: Amonio simulado - Integración ríos Palo y Paila.	72
Gráfica 52: Nitrato simulado - Integración ríos Palo y Paila.....	73
Gráfica 53: pH simulado - Integración ríos Palo y Paila.	73
Gráfica 54: Comparación del parámetro DBO_u en los diferentes escenarios de calidad – Unión ríos Palo y Paila.....	75
Gráfica 55: Comparación del parámetro de Oxígeno Disuelto en los diferentes escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.	76
Gráfica 56: Comparación del parámetro de Amonio (NH_4^+) en los diferentes escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.	76

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

Gráfica 57: Comparación del parámetro de Nitrato (NO_3) en los diferentes
escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características Generales de la Cuenca del río Palo.....	12
Tabla 2: Características Generales de la Cuenca del río Paila.....	14
Tabla 3: Tabla de valores típicos para los exponentes de la evaluación de las curvas para la determinación de la velocidad y profundidad del flujo.....	23
Tabla 4: Tramos de división del río Palo y su distancia respecto al punto Bocatoma CEDELCA	27
Tabla 5: Datos de ingreso en el modelo Q2E época de Verano.	28
Tabla 6: Datos de ingreso en el modelo Q2E época de Invierno.	29
Tabla 7: Parámetros y coeficientes hidráulicos de río Palo.....	36
Tabla 8: Parámetros de las Estaciones de monitoreo sobre el río Palo.....	36
Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos del río Palo.	37
Tabla 10: Tributarios y principales descargas sobre el río Palo.....	37
Tabla 11: Extracciones y derivaciones sobre el río Palo.....	38
Tabla 12: Coeficiente de correlación para los modelos de reaireación.....	41
Tabla 13: Puntos de muestreo sobre el río Paila.	56
Tabla 14: Constantes Preliminares del Modelo Hidráulico “Rating Curves” para el río Paila.	57
Tabla 15: Resultados de la modelación hidráulica preliminar para el río Paila.	58
Tabla 16: Estimación del Tiempo de viaje de la masa de agua para el río Paila.	59
Tabla 17: Parámetros fisicoquímicos evaluados en el río Paila.	59
Tabla 18: Resumen del aforo de caudales del río Paila.....	60
Tabla 19: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las Estaciones de muestreo del río Paila.	60
Tabla 20: Constantes hidrométricas para el río Paila.....	61
Tabla 21: Valores de caudales mínimos para los ríos Palo y Paila según el modelo SWAT.....	74
Tabla 22: Resultado de escenarios de Calidad.....	77

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Cuenca del río Palo.....	13
Figura 2: Cuenca río Paila.....	15
Figura 3: Esquema de segmentación QUAL2K.....	19
Figura 4: Representación en QUAL2K del esquema de segmentación para un río con los afluentes.	20
Figura 5: Subdivisión de un tramo del modelo.	20
Figura 6: Equilibrio de flujo de alcance.	21
Figura 7: Distribución del flujo de un vertimiento (fuente fuera del punto) a un elemento.....	22

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1: Elementos de entrada en el modelo matemático QUAL2K.....	84
Anexo 2: Resultados de la modelación respecto a la migración de datos.....	105
Anexo 3: Registro fotográficos de puntos preseleccionados del río Paila.....	110

INTRODUCCIÓN

Colombia, es reconocida internacionalmente como uno de los países con mayor riqueza en recursos hídricos del mundo, paradójicamente, el orgulloso título ha generado una marcada indiferencia hacia la conservación de este recurso, pues le ha restado importancia al deterioro que ha tenido a lo largo de muchos años, a causa de múltiples factores tales como: la naturaleza, con su alternancia climática, el vertiginoso crecimiento de la población humana y junto con ello sus actividades las cuales demandan gran cantidad de agua, la inapropiada e incipiente gestión que se ha tenido sobre el recurso hídrico, entre otros ha comprometido la calidad y disponibilidad de éste recurso.

Afortunadamente, en la actualidad muchas de las entidades encargadas del manejo y control de los recursos naturales generan planes de gestión ambiental enfocados hacia la conservación, aprovechamiento y sostenibilidad los recursos naturales, especialmente del recurso agua.

El río Palo es catalogado como uno de los ejes de desarrollo del Departamento del Cauca, ya que es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para las diferentes actividades socioeconómicas desarrolladas en la región. Sus aguas atraviesan los municipios de: Jambaló, Toribío, Caloto, Corinto, Miranda, Padilla, Villa Rica y Puerto Tejada, en cuyas jurisdicciones el uso que le dan a este recurso hídrico corresponde principalmente a: consumo humano, agrícola e industrial, además de ser receptor de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, las cuales afectan su calidad y alteran el normal comportamiento, limitando su uso y deteriorando el valor ecológico del recurso hídrico¹.

A su vez, el río Paila es el principal tributario del río Palo, su importancia radica en que es uno de los regeneradores de este río ya que su aporte en caudal y la buena calidad del agua ayudan en la disolución de las cargas contaminantes presentes en el río Palo derivadas de las actividades socioeconómicas nombradas anteriormente. Sin embargo, en la zona plana del río Paila se extiende cada vez más los cultivos tecnificados (caña de azúcar) y semitecnificados (plátano), los cuales llegan hasta las márgenes de su cauce, lo que ha generado un detrimento de la calidad de sus aguas², por ende, afecta directamente al río Palo, dado que, ya no genera un aporte positivo para la regeneración del cauce de este río, conduciendo a un deterioro de la calidad del agua y a la destrucción de las cuencas hidrográficas, generando problemas tales como: agotamiento del recurso, pérdida de vida acuática, tratamientos costosos de potabilización, problemas de salubridad, entre otros.

La estructuración e implementación de planes adecuados para el manejo integrado del recurso hídrico, hace que sea necesario conocer un cuerpo de agua, su comportamiento ante diversas situaciones como por ejemplo, la descarga de contaminantes a lo largo de su cauce, la capacidad de autopurificación, la variabilidad de su caudal dependiendo de la época del año (verano o invierno), entre otras, en este contexto, los modelos de simulación de calidad del agua, son una excelente herramienta que permite representar de una forma bastante aproximada

¹ Propuesta "Asesoría técnica en la optimización del modelo de calidad del agua del río Palo y la realización de escenarios con fines de establecer los objetivos de calidad del agua", CRC (2006).

² Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio Corinto – Cauca. 2001

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

el comportamiento de un cuerpo de agua en este caso una corriente de agua superficial, adicionalmente permite generar escenarios hipotéticos y de esta forma tener una visión más holística para la formulación de planes que conlleven a la sostenibilidad del recurso hídrico.

De esta forma, en el actual documento se presenta la migración de datos, del modelo QUAL2E hacia la versión QUAL2K, así mismo, se presenta la calibración y validación del modelo QUAL2K, tanto para el río Palo como para el río Paila, derivado de lo cual se genera una integración de dichos modelos, con el objetivo de generar escenarios de contaminación que permitan visualizar el comportamiento de tales ríos ante estos sensores.

1. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta la importancia socioeconómica que representan las fuentes hídricas anteriormente nombradas (río Palo y Paila) para el Departamento del Cauca, por ser “un ecosistema estratégico de importancia regional³” que ofrece sus servicios ambientales, especialmente el aporte hídrico, constituyéndose en el eje relevante para la actividad social, económica e industrial en su entorno, de aquí la importancia de optimizar el manejo de la cuenca del río Palo.

El presente estudio pretende realizar la implementación del modelo matemático de simulación de calidad de agua QUAL2K sobre el río Palo y su principal tributario el río Paila, lo cual permitirá entre otras cosas, determinar el comportamiento de los cauces a lo largo de sus trayectos, evaluar la capacidad asimilativa de las corrientes, generar escenarios hipotéticos de contaminación; todo ello orientado a la gestión integral del recurso hídrico lo cual permita que todos los actores sociales pertenecientes a la cuenca hagan un uso sustentable de los recursos naturales.

De esta forma la modelación matemática de la calidad del agua se convierte en una herramienta que contribuye a la planificación integral de los recursos hídricos, permitiendo establecer relaciones causa efecto para toma de decisiones oportunas y económicamente viables.⁴

Dentro de los procesos biológicos (fauna y flora) es importante poder identificar y tener claro los ciclos naturales de la biota acuática, ya que ésta es la base de los ciclos tróficos y bioquímicos que son a su vez los encargados de regular las especies naturales dentro de los nichos tróficos; la identificación y conocimiento de dichos procesos según los tipos de corrientes o flujos de caudales, permiten establecer y formular medidas de mitigación y conservación de dichas especies en ecosistemas acuáticos como los ríos Paila y Palo.

La identificación de procesos naturales con ayuda de modelos matemáticos, permite a las autoridades municipales, poder tomar decisiones que permitan mejorar considerablemente las condiciones naturales de los ecosistemas acuáticos, toda vez que son éstos los que garantizan a dichas comunidades el recurso agua para diferentes actividades de tipo cultural como agua para sistemas de riego, recreación, consumo, proyectos productivos agrícolas y pecuarios entre otros.

Por otra parte, la realización de este proyecto puede insertarse en el proceso académico de formación de profesionales en Ingeniería Ambiental, aportando múltiples factores que permitan poner en práctica las bases de conocimientos recibidos en las aulas de clase, y al mismo tiempo brinde herramientas para la formación integral de las tesis.

³ Caracterización de vertimientos y evaluación de la calidad del agua en corrientes receptoras del Departamento de Cauca. CRC – 2006.

⁴ Propuesta “Asesoría técnica en la optimización del modelo de calidad del agua del río Palo y la realización de escenarios con fines de establecer los objetivos de calidad del agua”. CRC - 2006.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Implementar el modelo matemático de simulación de calidad de aguas QUAL2K en la cuenca conformada por el río Palo y el río Paila en su parte baja.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Trasladar la implementación previamente calibrada del Modelo de Calidad del Agua QUAL2E del Río Palo hacia QUAL2K.
- ❖ Realizar la validación del Modelo de Calidad del Agua QUAL2K en el Río Palo.
- ❖ Implementar y calibrar el modelo QUAL2K para el río Paila.
- ❖ Realizar la integración de las modelaciones para el río Palo y el río Paila.
- ❖ Efectuar la modelación de escenarios hipotéticos para el establecimiento de objetivos de calidad y metas de reducción de cargas contaminantes.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA PALO – PAILA.

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES RÍO PALO.

El río Palo nace en el páramo de Santo Domingo, en límites con el departamento del Tolima, aproximadamente a 4000 m.s.n.m, tiene un recorrido de 92 Km. en sentido Este-Oeste y desemboca en el río Cauca, en el sector conocido como Bocas del Palo a 950 m.s.n.m. los afluentes más importantes son: río Isabelilla, río Jambaló, río Santo Domingo, río Tominó, río López, río San Francisco, el río Güengüe, Quebrada La Trampa y el río Paila⁵; en la Tabla 1 se presentan algunas características de la cuenca del río Palo.

Tabla 1: Características Generales de la Cuenca del río Palo

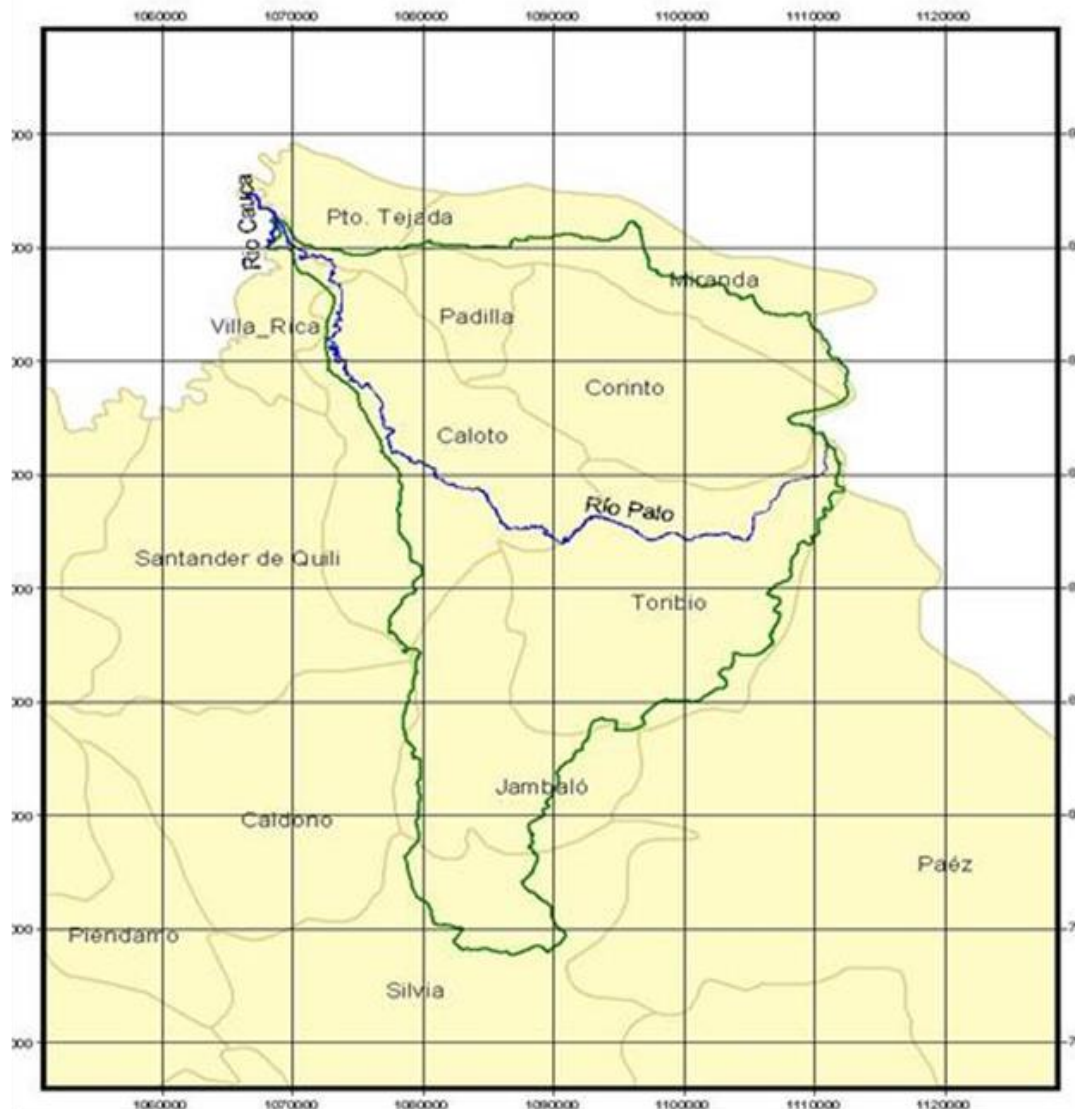
Características de la cuenca	Palo	
Orientación	S-N	
Altitud mínima	950 msnm	
Altitud máxima	4000 msnm	
Subcuencas	Paila, río La Trampa, río Jambaló, río Tominio, río San Francisco, río Isabelilla, río López.	
Municipios	Silvia, Toribío, Caloto, Puerto Tejada, Miranda, Padilla, Villa Rica, Corinto, Santander de Quilichao, Caldon y Jambaló	
Área	A (Km ²)	1509.79
Perímetro	P (Km.)	2366.88
Longitud axial	L (Km.)	71.24
Ancho promedio (Km.)	W (Km.)	1.12
Factor de forma	K_f	0.18
Coefficiente compacidad	K_c	2.18
Elevación mediana	E_{me} (m)	1200
Elevación media	E_m (m)	2258
Coefficiente de masividad	K_m . (m/Km ²)	0.98
Pendiente media cuenca	S_m (%)	43.82
Densidad de drenaje	D_d (Km/Km ²)	1.93
Número de cauces de orden 1	N_1	471
Tiempo de concentración (Kirpich)	T_c (h)	3.73
Coefficiente de torrencialidad	K_t (1/Km ²)	0.312
Características del río principal	Palo	
Longitud cauce principal	L_c (Km)	88.38
Longitud cauce zona 1	L_1 (Km)	46.45
Longitud cauce zona 2	L_2 (Km)	21.04
Longitud cauce zona 3	L_3 (Km)	20.89
Pendiente cauce zona 1	S_1 (%)	6.24
Pendiente cauce zona 2	S_2 (%)	0.48
Pendiente cauce zona 3	S_3 (%)	0.21
Pendiente media cauce principal	S (%)	6.71
Sinuosidad cauce zona 1	S_{i1}	1.14 Cauce sinuoso
Sinuosidad cauce zona 2	S_{i2}	1.35 Cauce meándrico
Sinuosidad cauce zona 3	S_{i3}	1.17 Cauce sinuoso
Sinuosidad cauce total	S_t	1.19 Cauce sinuoso

Fuente: ESTUDIO DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DISPOSICIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES SOBRE EL RÍO PALO – INGESAM 2002.

⁵ Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Puerto Tejada. CRC – 2006.

En la Figura 1, se presenta la ubicación regional de la zona de estudio correspondiente al río Palo.

Figura 1: Cuenca del río Palo



Fuente: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RÍOS DESBARATADO, PALO, PAILA Y GUENGE. CRC - 2004.

3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES RÍO PAILA

El río Paila nace en el sector conocido como “La cuchilla de la Gallinaza”, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central al nororiente del departamento del Cauca. Es uno de los principales afluentes del río Palo al que entrega por su margen derecha en las cercanías de Puerto Tejada. Ente los municipios de influencia del río Paila están: Corinto, Padilla y Puerto Tejada⁶; en la Tabla 2, se presenta algunas características de la cuenca del río Paila.

⁶ Estudio del comportamiento de los ríos Desbaratado, Palo, Paila y Guenge. CRC .

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Tabla 2: Características Generales de la Cuenca del río Paila.

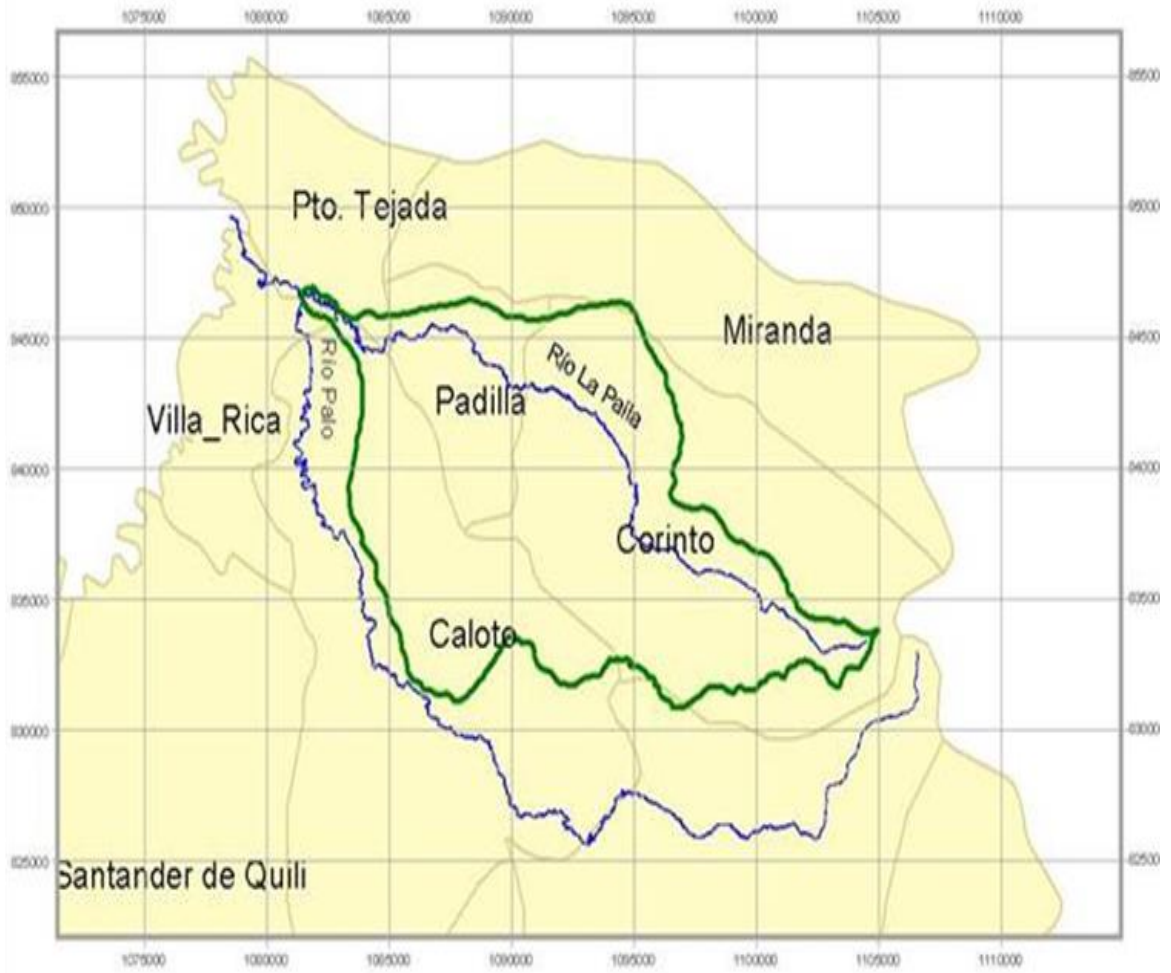
Características de la cuenca	Paila	
Orientación	E-W	
Altitud mínima	965 msnm	
Altitud máxima	4000 msnm	
Subcuencas	Río Guengué, río Hato, quebrada Seca, quebrada Cristalina	
Municipios	Caloto, Padilla, Corinto, Miranda, Puerto Tejada y Villa Rica.	
Área	A (Km ²)	365.73
Perímetro	P (Km)	103.05
Longitud axial	L (Km)	36.12
Ancho promedio (Km)	W (Km)	10.13
Factor de forma	K_f	0.28
Coeficiente compacidad	K_c	1.51
Elevación mediana	E_{me} (m)	1076.5
Elevación media	E_m (m)	1476.4
Pendiente media cuenca	S_m (%)	20.26
Densidad de drenaje	D_d (Km/Km ²)	2.33
Número de cauces de orden 1	N_1	117
Pendiente media cauce principal	S (%)	7.63
Tiempo de concentración (Kirpich)	T_c (h)	3.81
Coeficiente de torrencialidad	K_t (1/Km ²)	0.32
Características del río principal	Paila	
Longitud cauce principal	L_c (Km)	53.19
Longitud cauce zona 1	L_1 (Km)	22.80
Longitud cauce zona 2	L_2 (Km)	9.94
Longitud cauce zona 3	L_3 (Km)	20.45
Pendiente cauce zona 1	S_1 (%)	12.37
Pendiente cauce zona 2	S_2 (%)	1.31
Pendiente cauce zona 3	S_3 (%)	0.45
Sinuosidad cauce zona 1	S_{i1}	1.14 Cauce sinuoso
Sinuosidad cauce zona 2	S_{i2}	1.17 Cauce sinuoso
Sinuosidad cauce zona 3	S_{i3}	1.27 Cauce meándrico
Sinuosidad cauce total	S_t	cauce sinuoso

Fuente: ESTUDIO DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DISPOSICIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES SOBRE EL RÍO PALO – INGESAM 2002.

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

En la Figura 2, se presenta la ubicación regional de la zona de estudio correspondiente al río Paila.

Figura 2: Cuenca río Paila.



Fuente: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RÍOS DESBARATADO, PALO, PAILA Y GUENGE. CRC - 2004.

4. MODELO MATEMATICO QUAL2E Y MODELO QUAL2K.

Para el desarrollo de ésta parte del proyecto, se tomó como base el estudio realizado por la CRC en el año 2001 “ESTUDIO DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DISPOSICIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES SOBRE EL RÍO PALO⁷”, estudio que se llevó a cabo a través del modelo matemático de simulación de calidad de agua QUAL2E.

El traspaso de datos tiene como objetivo realizar la actualización del estudio realizado con una versión más reciente del modelo: QUAL2K, el cual posee nuevas y mejores características, debido a ello se presentan diferencias entre un modelo y otro.

A continuación se presenta algunas generalidades de los dos modelos y por último un análisis comparativo entre mismos.

4.1 MODELO MATEMÁTICO QUAL2E⁸

QUAL2E es un programa para la modelación de la calidad del agua en corrientes superficiales. Puede simular hasta 15 constituyentes del agua en cualquier combinación deseada. Dichos constituyentes pueden ser:

- ❖ Oxígeno Disuelto
- ❖ Demanda bioquímica de oxígeno
- ❖ Temperatura
- ❖ Algas, como clorofila A
- ❖ Nitrógeno orgánico, como N
- ❖ Amonio, como N
- ❖ Nitrito, como N
- ❖ Nitrato, como N
- ❖ Fósforo orgánico, como P
- ❖ Fósforo disuelto, como P
- ❖ Coliformes
- ❖ Un constituyente arbitrario no conservativo
- ❖ Tres constituyentes conservativos

El programa divide una corriente en una red de tramos de características físicas y químicas constantes, es decir, en segmentos de comportamiento hidráulico homogéneo dentro de los cuales los coeficientes de reacción se consideran constantes. Cada tramo es a su vez subdividido en una serie de unidades conocidas como elementos computacionales, a través de los cuales son efectuados los correspondientes balances de flujos, masa y calor.

⁷ Corporación Autónoma Regional Cauca – Ingeniería De Saneamiento Ambiental. “Estudio de modelación de la calidad del agua y disposición de cargas contaminantes sobre el río Palo”. Santiago de Cali, 2002.

⁸ Idem

4.2 MODELO MATEMÁTICO QUAL2K⁹

El modelo matemático QUAL2K (EPA, 2007) es un modelo de uso libre que simula la calidad del agua para un cuerpo de agua determinado, mediante una aplicación de Visual Basic que trabaja bajo EXCEL. El modelo simula la dinámica de los nutrientes, la producción algal y oxígeno disuelto con el impacto de los bentos y la demanda bioquímica carbonácea, también incorpora parámetros hidráulicos, elevación, ubicación geográfica, meteorología y reaeración (EPA, 2007). A diferencia de su versión anterior QUAL2E, el modelo QUAL2K trabaja con 2 especies de DBO_u: rápida (materia orgánica fácilmente biodegradable) y lenta, adicionalmente toma en cuenta variables como el pH y la alcalinidad, las cuales no se tenían en cuenta en la versión anterior.

Algunas consideraciones que el modelo¹⁰ incorpora, y las cuales son adoptadas en el presente estudio, con el fin de generar la modelación de las corrientes Palo y Paila, son las siguientes:

- ❖ Las ecuaciones gobernantes del modelo Qual2k son las ecuaciones de advección y dispersión con fuentes externas y cargas contaminantes, considerando que los mecanismos de transporte son significativos solamente en la dirección principal del flujo, es decir, longitudinal del canal o corriente.

Para resolver las ecuaciones de transporte de masa y reacción el programa utiliza la solución de diferencias finitas. Es decir que divide al río en un número específico de elementos computacionales y para cada elemento realiza: un balance hidrológico en términos del flujo; un balance de energía en términos de temperatura; y un balance de materia en términos de la concentración de los parámetros relevantes (DBO_u, OD, nitrógeno, fósforo, coliformes fecales, etc.).

- ❖ Hidráulicamente, el modelo está limitado a la simulación de periodos de tiempo durante los cuales tanto el flujo de la corriente como las descargas de contaminantes son constantes.
- ❖ El modelo puede operar en estado estacionario o en estado dinámico. Cuando se opera en estado estacionario, puede ser usado para estudiar el impacto de descargas de agua (magnitud, calidad y ubicación) en la calidad del agua de la corriente; y también puede ser usado junto con un programa de muestreo para identificar la magnitud y características de descargas no puntuales. Operando el modelo dinámicamente, se pueden estudiar los efectos de variaciones diurnas de los datos meteorológicos en la calidad del agua (principalmente oxígeno disuelto y temperatura), también puede estudiar las variaciones diurnas de oxígeno disuelto debidas al crecimiento y respiración de las algas.

⁹ Modelación de contaminantes superficiales del río Desbaratado en la formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Desbaratado. Universidad del Cauca – CRC. 2006.

¹⁰ Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de la calidad del agua. Revista de Ingeniería e Investigación – 2007.

- ❖ Debido a que se pueden especificar coeficientes biológicos e hidráulicos en cada segmento la manera en que un sistema es dividido puede afectar apreciablemente los resultados finales de la simulación. Se pueden establecer nuevos segmentos debido a cambios en velocidad, profundidad o dispersión. La presencia de tributarios o descargas también puede hacer que se deban definir nuevos segmentos. Una variación espacial de la demanda de oxígeno del sedimento o de los parámetros de fotosíntesis/respiración también puede influenciar la segmentación.
- ❖ Una de las consideraciones más importantes para determinar la capacidad asimilativa de contaminantes de un río es su habilidad para mantener una concentración adecuada de oxígeno disuelto. La concentración de oxígeno disuelto está controlada por: la reaireación atmosférica, fotosíntesis, respiración animal, respiración vegetal, demanda del bentos, demanda bioquímica de oxígeno, nitrificación, sólidos disueltos y temperatura, entre otros.
- ❖ Qual2k asume un canal de sección trapezoidal.
- ❖ Las ecuaciones fundamentales son resueltas con un sistema implícito de tiempo y una diferencia regresiva de espacio.
- ❖ Aunque el modelo esté diseñado para su empleo intencional, no trabaja bien más allá de sus limitaciones explícitas. El modelo calcula el transporte de masas y la difusión en una dimensión y por lo tanto aplica para las corrientes que son bien mezcladas vertical y lateralmente, por tanto se asume que la corriente objeto de estudio presenta dichas condiciones. El modelo es inadecuado para los ríos que experimentan variaciones temporales en la descarga del efluente o donde las descargas principales fluctúan considerablemente en un periodo de tiempo diario o más corto. Las limitaciones más significativas del modelo se encuentran examinando la contribución de agentes contaminantes en las fuentes no puntuales, para degradación de calidad del agua del río. La verdad, no señala los acontecimientos de precipitación. De hecho, las cargas de las fuentes no puntuales son conducidas a menudo por acontecimientos de precipitación y así tanto la carga de contaminantes y la descarga del efluente varía considerablemente en el tiempo. Ambos tipos de variación pueden desviarse considerablemente de las suposiciones de QUAL2K (Odel et al. 1998).

QUAL2K también ha sido usado como un instrumento de investigación. El modelo se ha utilizado para mostrar la importancia de análisis de incertidumbre en la modelación de calidad de agua (Melching y Yoon, 1996). Little y Williams (1992) usaron el modelo para mostrar la técnica de calibración que ellos desarrollaron y que podría ser aplicable a todos los modelos de calidad de agua. QUAL2K a menudo es usado como un modelo estándar en la modelación de calidad de agua, frente al cual muchos otros modelos son evaluados (Rauch et al., 1998; Odel et al., 1998). Muchas modificaciones de QUAL2K han sido realizadas para adaptar el modelo a condiciones específicas (Brown y Barnwell, 1987; Odel et al., 1998).

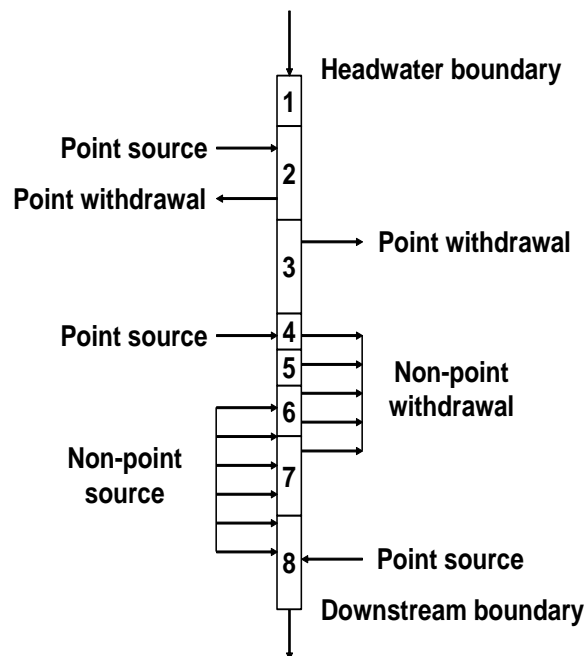
4.2.1 Entradas del Modelo.

QUAL2K requiere un cierto grado de experiencia en modelación de parte del usuario. Este debe proveer más de 100 entradas individuales, algunas de las cuales requieren un juicio de estimación considerable. Los datos de entrada se pueden agrupar en tres categorías: un sistema de corriente/río, variables globales y funciones forzadas. El primer grupo, datos de entrada para el sistema de corriente/río, describe el sistema de corriente en un formato que el modelo puede leer. El grupo variable general describe las variables generales de la simulación tales como unidades, tipo de simulación, componentes de la calidad del agua y algunas características físicas de la cuenca. Las funciones forzadas son las entradas especificadas por el usuario y que conducen el sistema que es modelado. Los valores de los datos de entrada dependen del tipo de simulación y del número de las variables de estado usadas.

4.2.2 Representación funcional del modelo.

El modelo representa el río como una serie de segmentos. Éstos representan tramos de río con características hidráulicas constantes. Como se representa en la Figura 3, los tramos se numeran en orden ascendente desde el encabezado del agua del tallo principal del río. Las entradas y extracciones pueden ubicarse en cualquier parte a lo largo de la longitud del cauce.

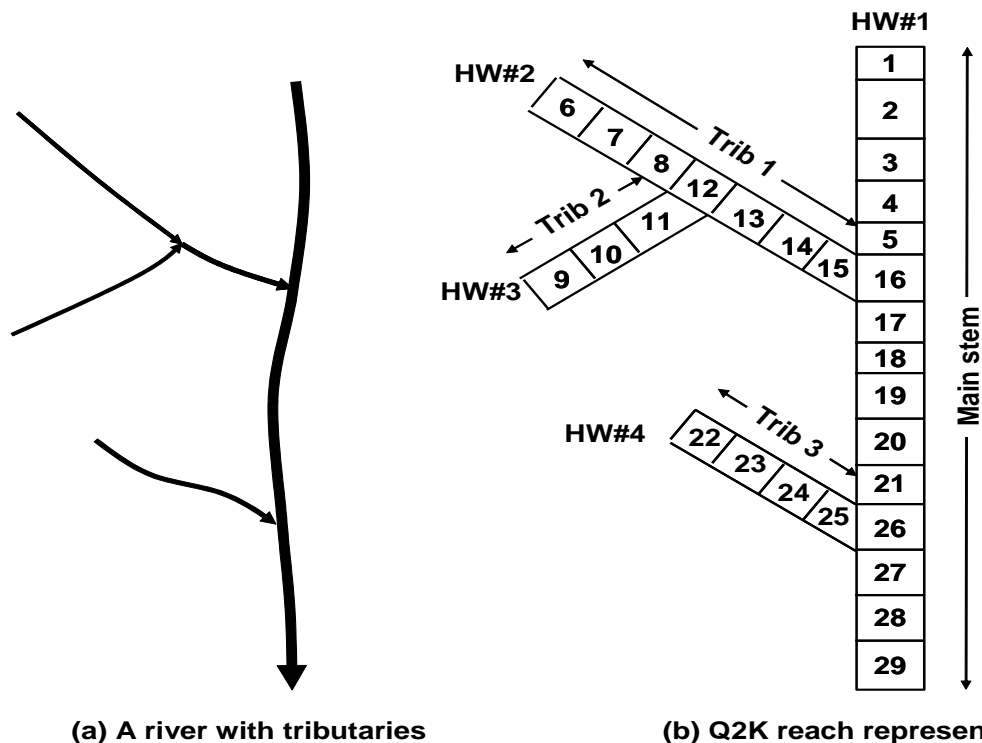
Figura 3: Esquema de segmentación QUAL2K.



Como se presenta en la Figura 4, para los sistemas con afluentes, los tramos se numeran en orden ascendente iniciando con 1, en el encabezado del agua del tallo principal del río. Cuando una unión con un afluente se alcanza, la numeración continúa a la cabeza de ese afluente. Observe que se numeran las cabeceras y los afluentes siguiendo consecutivamente un esquema sucesivo similar al de los

tramos. Las ramas mayores del sistema (es decir, el tallo principal y cada uno de los afluentes) está citado como segmento. Esta distinción tiene importancia práctica porque el software proporciona parcelas de rendimiento ejemplar en una base del segmento. Es decir, el software genera las parcelas individuales para el tallo principal así como para cada uno de los afluentes.

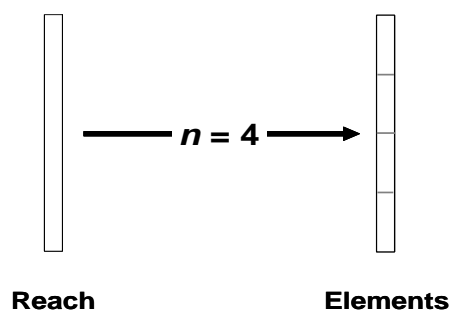
Figura 4: Representación en QUAL2K del esquema de segmentación para un río con los afluentes.



Finalmente, cualquier tramo del modelo puede ser dividido más allá en una serie de elementos igualmente espaciados. Como en la Figura 4, esto se hace especificando el número de elementos que se desean.

En la figura 5, se presenta la forma en la cual se subdivide cualquier tramo del modelo en una serie n de elementos de igual longitud.

Figura 5: Subdivisión de un tramo del modelo.



En resumen, la nomenclatura describe la manera en que Q2K organiza la topología del río, así:

- ❖ Tramo. Una longitud de río con las características hidráulicas constantes.
- ❖ Elemento. La unidad computacional fundamental del modelo, que consiste en una subdivisión de longitudes iguales de una fracción.
- ❖ Segmento. Una serie de tramos que representan una rama del sistema. Éstos consisten en el tallo principal así como cada tributario

Equilibrio de flujo.

En la figura 6, se presenta el equilibrio de flujo de estado constante se realiza para cada tramo.

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

Donde:

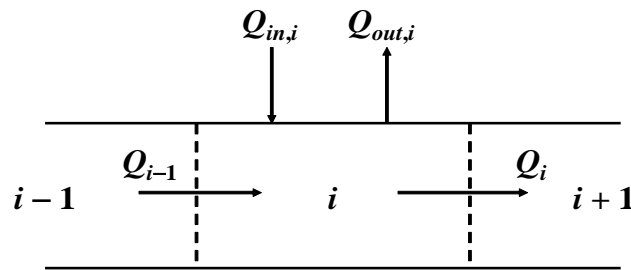
Q_i = Salida del elemento i río abajo en el elemento $i + 1$, [m^3/d],

Q_{i-1} = Flujo del elemento río arriba $i-1$, [m^3/d],

$Q_{in,i}$ = Flujo que entra al elemento, teniendo en cuenta los vertimientos y/o tributarios, [m^3/d],

$Q_{out,i}$ = Flujo que sale del elemento debido a extracciones, [m^3/d].

Figura 6: Equilibrio de flujo de alcance.



El flujo que entra de las fuentes se calcula como:

$$Q_{in,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j}$$

Donde:

$Q_{ps,i,j}$ = es la fuente del punto j , sobre el flujo del elemento i [m^3/d], psi = el número total de fuentes del punto al elemento i ,

$Q_{nps,i,j}$ = es el j th non-punto fuente inflow para localizar i [m^3/d], y $npsi$ = el número total de fuentes fuera del punto en el flujo del elemento i

La salida total de las extracciones se calcula como:

$$Q_{out,i} = \sum_{j=1}^{pai} Q_{pa,i,j} + \sum_{j=1}^{npai} Q_{npa,i,j}$$

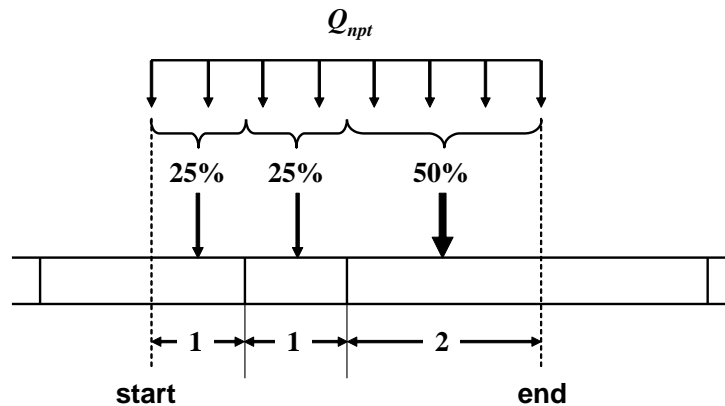
Donde:

$Q_{pa,i,j} = j$ es el punto de salida de la extracción del elemento i , [m^3/d], pa_i = el número total de extracciones en el punto del elemento i ,

$Q_{npa,i,j}$ = es la j th non-punto abstracción salida del alcance i , [m^3/d], npa_i = el número total de extracción fuera del punto del elemento i .

Se proyectan las fuentes y extracciones fuera del punto, como fuentes en línea. Como en la Figura 7, la fuente fuera del punto o la extracción se limita por su distancia desde el inicio al fin del punto. Su flujo es distribuido a cada elemento en una forma proporcional.

Figura 7: Distribución del flujo de un vertimiento (fuente fuera del punto) a un elemento.



Características Hidráulicas.

Una vez se mide el caudal de salida para cada elemento, la profundidad y velocidad pueden ser calculadas de tres formas: a). Salto de agua producida por estructuras hidráulicas. b). Evaluando las curvas, o c). Ecuación de Manning. El programa decide entre estas opciones de la manera siguiente:

- ❖ Si se ingresa la altura y el ancho de la estructura hidráulica, la opción del Salto de agua se lleva a cabo.
- ❖ Si la altura y el ancho de la estructura hidráulica son cero y se tienen los coeficientes de la curva (a y α), la opción de las curvas se lleva a cabo.
- ❖ Si ninguna de las condiciones anteriores se da, Q2K usa la ecuación de Manning.

Teniendo en cuenta los anteriores postulados, la modelación del presente trabajo tanto para el río Palo como para el río Paila se lleva a cabo mediante la opción de Rating curves (evaluación de curvas), puesto que se cuentan con la información necesaria para la determinación de los coeficientes hidráulicos.

Evaluación de curvas.

Usando las ecuaciones para relacionar velocidad media y profundidad, tenemos:

$$U = aQ^b$$

$$H = \alpha Q^\beta$$

Donde: a, b, α y β son coeficientes empíricos que son determinados por la velocidad de descarga y la fase de descarga de la evaluación de curvas, respectivamente. Pueden emplearse los valores de velocidad y profundidad entonces para determinar el área y el ancho, teniendo en cuenta el corte Transversal así:

$$A_c = \frac{Q}{U}$$

$$B = \frac{A_c}{H}$$

El área de la superficie y volumen del elemento pueden calcularse, como:

$$A_s = B\Delta x$$

$$V = BH\Delta x$$

Los exponentes b y β asumen valores registrados típicamente en la Tabla 3, se debe tener en cuenta que la suma de b y β debe ser menor o igual a 1. Si éste no es el caso, el ancho disminuirá y el flujo aumentara. Si su suma es igual a 1, el cauce es rectangular.

Tabla 3: Tabla de valores típicos para los exponentes de la evaluación de las curvas para la determinación de la velocidad y profundidad del flujo.

Ecuación	Exponente	Valor típico	Rango
$U = aQ^b$	b	0.43	0.4-0.6
$H = \alpha Q^\beta$	α	0.45	0.3-0.5

En algunas aplicaciones, se podría querer especificar valores constantes de profundidad y velocidad que no varían con el flujo. Esto puede hacerse poniendo los exponentes b y β en cero, α igual a la profundidad deseada e igualando a la velocidad deseada.

4.2.3 Parámetros fisicoquímicos a modelar

A continuación se presenta la forma en la cual el modelo considera cada uno de los parámetros a modelar. Para una revisión exhaustiva de los procedimientos matemáticos involucrados se remite al manual del programa QUAL2K, el cual se puede consultar y descargar en el sitio WEB de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (www.epa.gov/Athens/wwwqtsc/html/qual2k.htm), al igual que la versión del software utilizado en este proyecto.

- ❖ **Oxígeno Disuelto:** El balance de oxígeno en una corriente depende de la capacidad de la corriente para reairearse ella misma. Esta capacidad es una función de los procesos de advección y difusión que ocurren dentro del sistema y las fuentes y demandas internas. Las principales fuentes de

oxígeno, adicionalmente a la reaireación atmosférica, son el oxígeno producido por fotosíntesis y el oxígeno contenido en el flujo de entrada. Las demandas de oxígeno disuelto incluyen la oxidación bioquímica de materia orgánica, demanda de oxígeno del bentos y el oxígeno utilizado en la respiración de los microorganismos.

- ❖ **DBO Carbonácea:** Una de las principales demandas de oxígeno en el agua es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) carbonosa. La DBO es usualmente definida como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición, en condiciones aerobias¹¹. Las descargas de aguas residuales usualmente contienen cantidades apreciables de DBO que se descompone rápidamente en presencia de bacterias aerobias. Estas bacterias están presentes en la mayoría de las aguas y comienzan el proceso de descomposición de manera rápida. Cuando las concentraciones de oxígeno disuelto se vuelven muy pequeñas, la velocidad de este proceso de descomposición disminuye.

La DBO se determina típicamente a partir del análisis de laboratorio que consiste en la medición del oxígeno consumido por las bacterias en un periodo determinado de tiempo. Para evitar una posible interferencia de compuestos de nitrógeno, los que también consumen oxígeno, la prueba de DBO debe utilizar la técnica de supresión de nitrificación para inhibir las bacterias nitrificantes. Mientras la oxidación bioquímica teóricamente toma un tiempo infinito para completarse, la oxidación llega al 95 – 99 % en un periodo de 20 días (DBO_{20}). Rutinariamente la medición de DBO se realiza en un periodo de 5 días para obtener resultados en un tiempo aceptable. La oxidación en el periodo de 5 días (DBO_5) llega a ser de 60 – 70 % de la DBO_U .

La velocidad a la que la DBO_5 disminuye se debe a dos mecanismos: consumo y sedimentación. El consumo es la razón a la cual la DBO_5 se remueve debido a la descomposición bacteriana. Cuando la concentración de oxígeno disuelto es alta, este proceso se realiza rápidamente.

El modelo asume una ecuación de primer orden para describir la desoxigenación de la DBO_U . La función de DBO también toma en cuenta la remoción adicional de DBO debida a la sedimentación y floculación, que no ejercen una demanda de oxígeno.

- ❖ **Demanda de Oxígeno del Sedimento:** Una importante demanda de oxígeno en el agua es la demanda de oxígeno del sedimento. Los depósitos en el fondo en forma de materia orgánica sedimentada acumulada a lo largo de la corriente pueden ejercer una demanda de oxígeno. La demanda de oxígeno de sedimentos resultantes de descargas no puntuales puede variar entre 0.05 mg de oxígeno/m²-día en los suelos minerales a 2.0 mg de oxígeno/m²-día en lodos de desembocaduras, a 20°C. Adicionalmente a las fuentes anteriormente mencionadas, el material orgánico proveniente de

¹¹ Química para Ingeniería Ambiental, Sawyer, Clair N. Perry, L. Macarty, Gen F. 2000.

plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales puede sedimentarse aguas abajo de las descargas de agua, creando demandas de oxígeno disuelto que varían entre 0.05 y 10 mg de oxígeno/m²-día.

- ❖ **Ciclo de Nitrógeno:** En aguas naturales existe una transformación por etapas de nitrógeno orgánico a amoniacal, a nitrito y finalmente a nitrato.

Varios compuestos de nitrógeno en las descargas de aguas residuales también presentan demanda de oxígeno en el agua conforme cambian de una forma a otra. Estos cambios de forma requieren la presencia de poblaciones específicas de bacterias. El nitrógeno amoniacal (NH₃-N) se convierte a nitrógeno en forma de nitrito (NO₂-N) mediante la bacteria Nitrosomonas. El Nitrógeno en forma de nitrito se convierte a nitrógeno en forma de nitrato (NO₃-N) mediante la bacteria Nitrobacter. La conversión de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal se lleva a cabo mediante hidrólisis y por tanto no consume oxígeno. Bajo ciertas circunstancias, como baja concentración de oxígeno disuelto, las poblaciones bacterianas nitrificantes y/o su actividad pueden ser inhibidas. Investigaciones han demostrado que niveles de oxígeno disuelto menores a 2 mg/L inhiben significativamente la nitrificación. Bajo condiciones de ausencia de oxígeno, el nitrato puede ser convertido a gas nitrógeno en un proceso conocido como desnitrificación.

- ❖ **Ciclo de Fósforo:** El ciclo de fósforo opera de manera parecida al de nitrógeno en muchos sentidos, pero menos complejo. Las formas orgánicas de fósforo se generan por la muerte de algas o por descargas de aguas residuales, el cual entonces se convierte al estado inorgánico disuelto, donde está disponible para las algas. El fósforo descargado de plantas de tratamiento municipales generalmente se encuentra en la forma de fósforo inorgánico disuelto y es fácilmente consumido por las algas en la fotosíntesis.
- ❖ **Coliformes:** Los coliformes son un indicador de la contaminación patógena en las aguas superficiales. El modelo utiliza una ecuación de primer orden en la que la remoción de coliformes es determinada por la temperatura, la luz y sedimentación del mismo. En este estudio los coliformes simulados son los coliformes fecales.
- ❖ **Representación Funcional de la Temperatura:** En la simulación de la temperatura, C (de la ecuación básica de transporte) se toma como la concentración de calor. El balance de energía toma en cuenta todo el calor transferido a través de las fronteras, es decir, el calor transferido a través de la interfase aire-agua y a través de la interfase agua – suelo. Este último es generalmente insignificante.

El calor se transfiere a través de la interfase aire-agua debido a tres diferentes procesos: radiación, evaporación y conducción. Los términos individuales de energía relacionados con estos procesos son los siguientes:

- Radiación solar de onda corta
- Radiación atmosférica de onda larga
- Radiación de la superficie del agua de onda larga

- Conducción y convección
- Evaporación y condensación

- ❖ **Concentración de saturación de oxígeno disuelto:** La solubilidad de oxígeno disuelto en agua disminuye conforme la temperatura aumenta, conforme aumenta la concentración de sólidos disueltos, y conforme disminuye la presión atmosférica, esta última con la elevación. El modelo utiliza una ecuación predictiva para la concentración de saturación (equilibrio) de oxígeno disuelto.
- ❖ **Coeficiente de reaireación atmosférica:** El proceso por el que el oxígeno disuelto en la corriente se incrementa por el aire de la superficie se conoce como reaireación atmosférica y es la fuente primaria de oxígeno disuelto en el agua. El proceso de reaireación es generalmente una función de la geometría de la corriente y de sus características hidráulicas. Diferentes técnicas y ecuaciones han sido desarrolladas para estimar los coeficientes de reaireación con base en la geometría y las características hidráulicas de la corriente.

El coeficiente de reaireación (K_2) generalmente se expresa como una función de la profundidad de la corriente y su velocidad. El modelo cuenta con ocho diferentes opciones para estimar o leer los valores de K_2 : Interna, Fórmula de Churchill; Ecuación de O'Connor – Dobbins, Ecuación de Owens – Gibbs, la Ecuación de Tsivoglou – Neal, la Ecuación de Thackston – Dawson y dos modelos del USGS: pool – rifle y channel control.

- ❖ **Coeficientes dependientes de la Temperatura:** Muchas de las reacciones que determinan la calidad del agua en sistemas naturales están en función de la temperatura; esta dependencia se considera generalmente variando los diferentes coeficientes de reacción.

Los valores de temperatura calculados en el modelo se usan para corregir los coeficientes de reacción de los diferentes parámetros. Estos coeficientes se dan a 20°C y son entonces corregidos por temperatura de acuerdo a la formulación de tipo Streeter – Phelps. Si la temperatura no se simula, el valor de temperatura especificado en las condiciones iniciales se toma como el valor de la simulación.

- ❖ **Representación de una Corriente en Qual2K:** En Qual2K una corriente es conceptualizada como una sucesión de elementos computacionales que operan como reactores completamente mezclados, ligados uno a otro por mecanismos de transporte y difusión. Estos elementos se agrupan en segmentos que se caracterizan por tener las mismas propiedades hidráulicas (Pendiente de la corriente, sección transversal, rugosidad, etc.).

5. MIGRACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL RÍO PALO EN QUAL2K

5.1 MIGRACIÓN DEL MODELO Q2E A Q2K PARA EL RÍO PALO.

A continuación se presentan algunas consideraciones tenidas en cuenta en el proyecto anterior (Estudio de modelación de la calidad del agua y disposición de cargas contaminantes sobre el río Palo).

- a. Tramos del río: tal como se muestra en la Tabla 4, el río fue dividido en 5 tramos de estudio debido que sus características presentaban condiciones hidráulicas similares. Estos tramos son los siguientes:

Tabla 4: Tramos de división del río Palo y su distancia respecto al punto Bocatoma CEDELCA

Tramo No	Descripción	Long (km)
1	Después de la bocatoma CEDELCA a Qda. La Trampa.	4.26
2	Después Qda. La Trampa a Descarga PTAR Guachené.	8.28
3	Después descarga PTAR Guachené a bocatoma Propal II.	12.32
4	Después Bocatoma Propal II a Confluencia con río Paila.	5.60
5	Después río Paila a Descarga del río Palo en el río Cauca (bocas del Palo)	9,12

- b. Mediciones de campo: Para la implementación del modelo QUAL2E se realizaron seis jornadas de medición en el río Palo buscando que tres de ellas fueran en temporada de bajo caudal (verano) y las otras tres en temporada de lluvias.

En las Tablas 5 y 6, se presentan los datos obtenidos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos*.

* Nota: si se requiere mayor información acerca de la metodología realizada para la determinación de los tramos y de las campañas de muestreo e información adicional, se recomienda consultar el documento base "ESTUDIO DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DISPOSICIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES SOBRE EL RÍO PALO – CRC 2002".

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Tabla 5: Datos de ingreso en el modelo Q2E época de Verano.

Fecha Muestreo	Sitio de Muestreo No.	Caudal L/s	Temp °C	pH	SST mg/L	DQO mg/L	DBO ₅ mg/L	O. D. mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	NO ₂ mg/L	NO ₃ mg/L	PO ₄ mg/L	Coliformes Totales #/100 mL	Coliformes Fecales #/100 mL
Sept. 6/2001	1	7500	20	6.6	72	8	1.4	7.9	0.4	0.5	0,01	0.04	1.1*10 ⁴	4.4*10 ³
	2		25	6.7	34	9	1.5	7.0	0.8	0.5	0,03	0.04	1.3*10 ⁵	4.3*10 ⁴
	3		26	6.7	117	25	6.0	6.1	1.1	0.5	0,03	0.13	6.0*10 ⁵	2.0*10 ⁵
	4		26	6.8	117	24	4.4	5.0	0.7	0.6	0,05	0.13	8.3*10 ⁵	2.2*10 ⁵
	5		26	6.8	61	28	7.5	3.7	1.1	0.6	0,05	0.09	5.0*10 ⁵	3.0*10 ⁵
	6	4457.8	26	6.8	39	19	5.6	4.9	1.0	0.7	0,02	0.09	6.0*10 ⁵	2.0*10 ⁵
	7		26	6.7	86	26	6.9	3.1	1.0	0.6	0,05	0.07	6.0*10 ⁵	1.2*10 ⁵
	8		26	6.7	58	21	6.8	2.6	1.2	0.6	0,05	0.06	6.0*10 ⁵	2.0*10 ⁵
Sept. 11/2001	1	3500	20	7.3	6	0.9	0.9	8.0	0.4	0.8	0,01	0.07	1.5*10 ⁴	1.1*10 ³
	2		25	7.2	10	0.9	0.9	7.1	0.4	0.7	0,03	0.05	4.8*10 ⁴	8.0*10 ³
	3		26	6.9	28	5.4	5.4	5.9	0.7	0.8	0,03	0.06	5.7*10 ⁴	1.2*10 ⁴
	4		27	6.9	35	5.7	5.7	5.1	1.2	0.6	0,05	0.23	2.4*10 ⁵	5.0*10 ⁴
	5		28	6.8	19	7.1	7.1	2.2	1.2	0.9	0,05	0.29	1.2*10 ⁶	1.5*10 ⁵
	6	2412.2	28	7.0	29	2.1	2.1	5.7	0.8	0.7	0,02	0.23	4.3*10 ⁵	6.0*10 ⁴
	7	30600	28	6.8	27	4.4	4.4	2.8	0.9	0.8	0,05	0.28	2.3*10 ⁶	2.0*10 ⁵
	8		28	6.8	22	4.1	4.1	2.8	1.0	0.8	0,07	0.33	4.2*10 ⁶	2.0*10 ⁵
Nov. 23/2001	1	3 730	17	7,3	10	10	1,1	8,3	0,3	0,5	0,01	N.D.	5,7*10 ⁴	7,2*10 ³
	2	9 400	23	7,3	50	10	1,4	7,0	0,6	0,5	0,02	0,04	3,3*10 ⁶	3,0*10 ⁵
	3	10 300	24	7,1	47	20	5,0	4,7	0,3	0,5	0,03	0,05	1,2*10 ⁶	3,0*10 ⁵
	4	10 900	24	7,0	45	20	5,9	5,6	0,9	0,6	0,02	0,11	8,3*10 ⁵	3,0*10 ⁵
	5	11 000	24	7,1	43	26	6,2	3,5	0,7	0,6	0,03	0,14	1,3*10 ⁶	3,0*10 ⁵
	6	11 100	24	7,0	91	18	4,6	6,0	0,9	0,7	0,02	0,15	8,0*10 ⁵	2,0*10 ⁵
	7	22 100	25	7,0	77	16	5,5	5,1	0,7	0,6	0,04	0,17	1,0*10 ⁶	2,0*10 ⁵
	8	16 816	25	7,0	96	18	5,9	5,0	0,7	0,6	0,05	0,17	1,0*10 ⁷	3,0*10 ⁵

Puntos de Muestreo

Punto No. 1. Río Palo. Estación CVC
Punto No. 2. Río Palo, antes de la Bocatoma de Propal II.
Punto No. 3. Río Palo. Entre descargas de La Cabaña y Propal
Punto No. 4. Río Palo después del PICC etapas I y III
Punto No. 5. Río Palo antes de unión con el río Paila. Barrio El Triunfo
Punto No. 6. Río Paila antes de unión con el río Palo
Punto No. 7. Río Palo. Estación CVC Puerto Tejada
Punto No. 8. Río Palo antes de descarga al Cauca. Bocas del Palo

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Tabla 6: Datos de ingreso en el modelo Q2E época de Invierno.

Fecha del Muestreo	Sitio de Muestreo No.	Caudal l/s	Temp. °C	pH, unid.	SST, mg/L	DQO, mg/L	DBO ₅ , mg/L	Oxígeno Disuelto mg/L	NH ₄ ⁺ , mg/L	NO ₂ , mg/L	NO ₃ , mg/L	PO ₄ , mg/L	Coliformes Totales, # /100 mL	Coliformes fecales, # /100 mL
Sept. 13/2001	1	8200	18	6.9	15	19	0.8	8.2	0.5	0,01	1,0	0.05	1.2*10 ⁴	7.0*10 ²
	2		22	6.8	23	17	1.4	6.9	0.6	0,03	0,9	0.07	1.2*10 ⁵	3.0*10 ⁴
	3		25	6.7	41	25	4.4	5.9	0.7	0,04	0,9	0.09	1.3*10 ⁵	3.3*10 ⁴
	4		25	6.6	37	24	6.9	5.1	0.9	0,04	1,0	0.18	6.7*10 ⁵	1.2*10 ⁵
	5		25	6.6	44	24	6.2	3.5	0.6	0,04	0,9	0.18	6.8*10 ⁵	1.4*10 ⁵
	6	8421.3	25	6.7	113	21	4.8	5.9	0.8	0,02	0,7	0.30	6.4*10 ⁵	6.0*10 ⁴
	7	30400	26	6.6	217	51	8.3	3.8	1.0	0,05	0,9	0.59	7.0*10 ⁵	2.0*10 ⁵
	8		26	6.6	71	28	6.5	3.9	0.9	0,05	0,9	0.25	6.0*10 ⁵	1.0*10 ⁵
Nov. 21 /2001	1	13 654	18	7,5	550	32	2,9	7,0	0,3	0,01	1,3	N.D.	1,6*10 ⁵	1,0*10 ³
	2	18 840	21	7,4	400	66	3,2	6,9	0,2	0,01	1,2	0,02	2,5*10 ⁶	5,0*10 ⁵
	3	20950	22	7,2	508	50	6,4	6,1	0,2	0,01	1,2	0,03	2,0*10 ⁶	5,0*10 ⁵
	4	22 150	22	7,0	456	62	6,7	4,3	0,4	0,02	1,2	0,04	1,2*10 ⁶	2,0*10 ⁵
	5	22 400	23	7,0	396	53	6,6	4,5	0,3	0,02	1,3	0,06	2,6*10 ⁶	5,0*10 ⁵
	6	34 600	23	7,1	1026	75	5,0	5,3	0,4	0,03	1,7	0,13	5,4*10 ⁶	4,0*10 ⁵
	7	57 000	23	7,2	848	61	5,7	5,9	0,4	0,04	1,5	0,11	7,1*10 ⁶	2,0*10 ⁶
	8	54 900	24	7,0	1004	66	6,0	5,6	0,4	0,03	1,5	0,07	6,5*10 ⁶	5,0*10 ⁵
Dic. 18/2001	1	13 313	18	7,6	250	23	2,3	7,0	0,4	0,01	0,5	0,07	1,2*10 ⁵	2,0*10 ³
	2	16 050	20	7,2	220	16	3,0	5,0	0,5	0,01	0,5	0,36	8,9*10 ⁵	1,4*10 ⁵
	3	17 300	21	7,1	320	40	5,0	4,4	0,6	0,01	0,4	0,45	1,7*10 ⁶	4,0*10 ⁵
	4	17 800	22	7,0	286	40	6,5	4,1	0,6	0,02	0,5	0,77	2,1*10 ⁶	1,4*10 ⁵
	5	18 000	23	7,0	290	40	6,6	3,1	0,5	0,02	0,5	0,67	6,8*10 ⁵	1,4*10 ⁵
	6	12 000	23	7,1	271	21	4,5	5,1	0,4	0,02	0,7	0,67	2,4*10 ⁶	4,0*10 ⁴
	7	30 000	24	7,1	258	35	5,7	3,8	0,7	0,03	0,6	0,37	1,6*10 ⁶	3,5*10 ⁵
	8		25	7,7	136	38	6,0	3,6	0,8	0,02	0,6	0,47	2,2*10 ⁶	2,0*10 ⁵

Puntos de Muestreo

- Punto No. 1.** Río Palo. Estación CVC
Punto No. 2. Río Palo, antes de la Bocatoma de Propal II.
Punto No. 3. Río Palo. Entre descargas de La Cabaña y Propal
Punto No. 4. Río Palo después del PICC etapas I y III
Punto No. 5. Río Palo antes de unión con el río Paila. Barrio El Triunfo
Punto No. 6. Río Paila antes de unión con el río Palo
Punto No. 7. Río Palo. Estación CVC Puerto Tejada
Punto No. 8. Río Palo antes de descarga al Cauca. Bocas del Palo

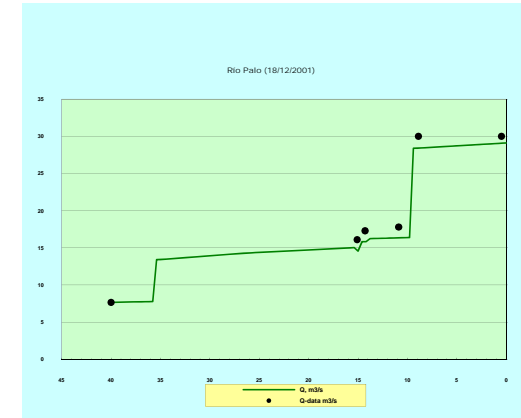
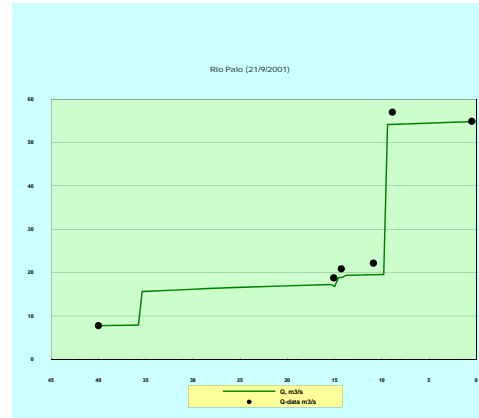
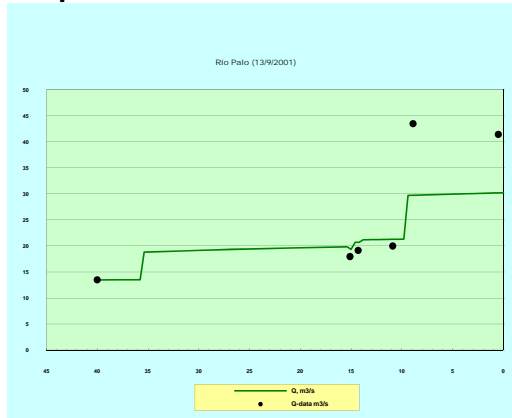
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACION DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO.

6.1.1 Resultado de la Modelación respecto a la Migración de datos.

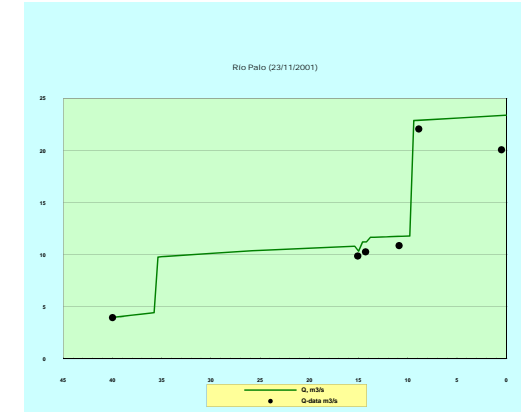
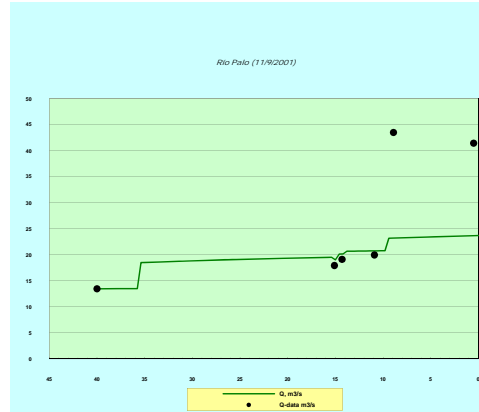
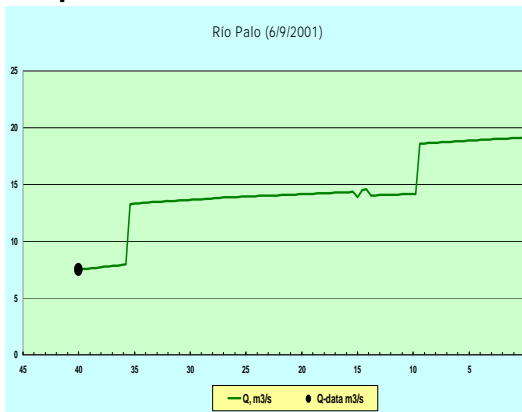
A continuación, en las Gráficas 1, 2 y 3, se presentan los resultados obtenidos de la etapa de migración del modelo de Qual2e a Qual2k, para los parámetros de caudal, oxígeno disuelto y DBO:

Gráfica 1: Migración caudal río Palo.

❖ Época de Invierno.



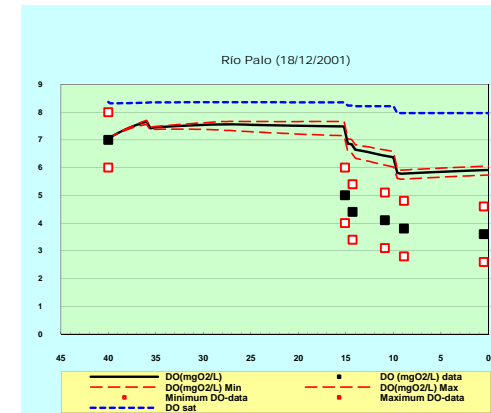
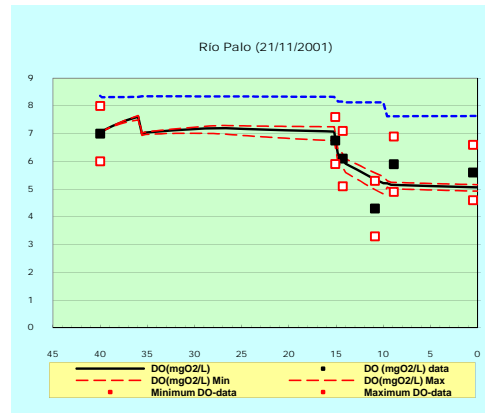
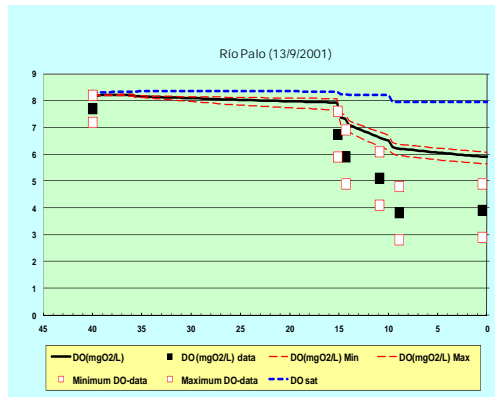
❖ Época de Verano.



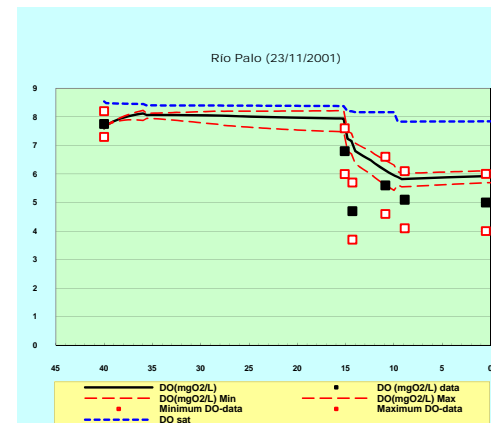
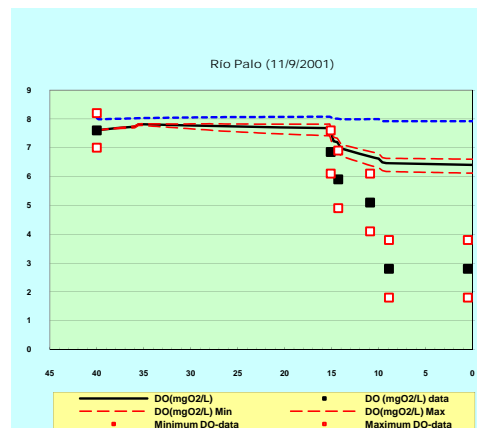
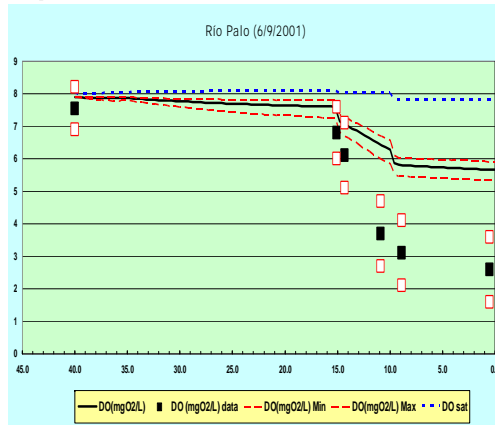
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACION DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO.

Gráfica 2: Migración Oxígeno Disuelto río Palo.

❖ Época de Invierno.



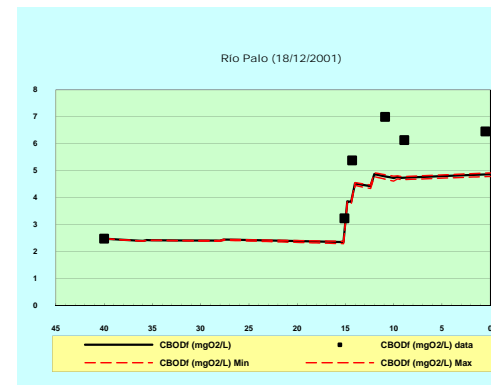
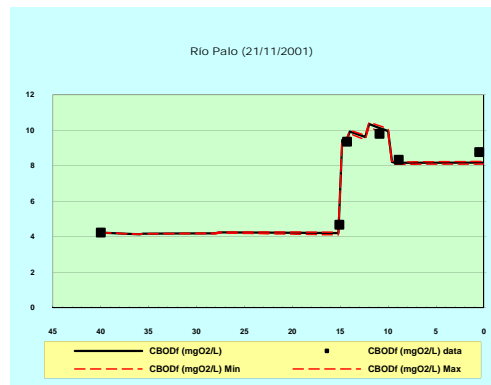
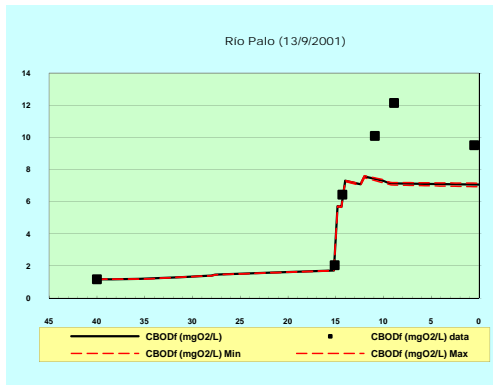
❖ Época de Verano.



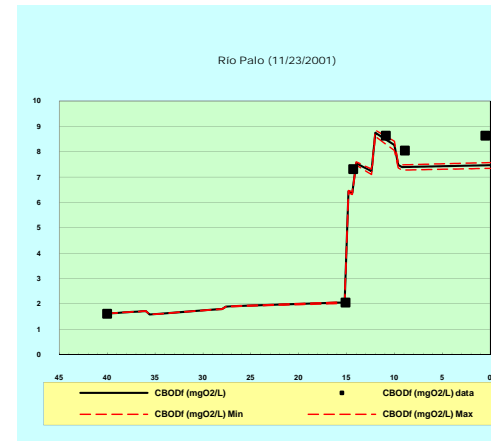
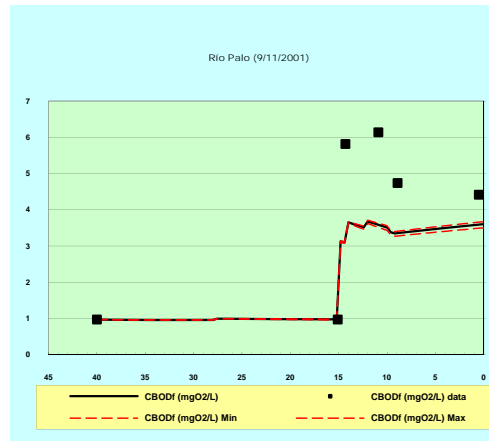
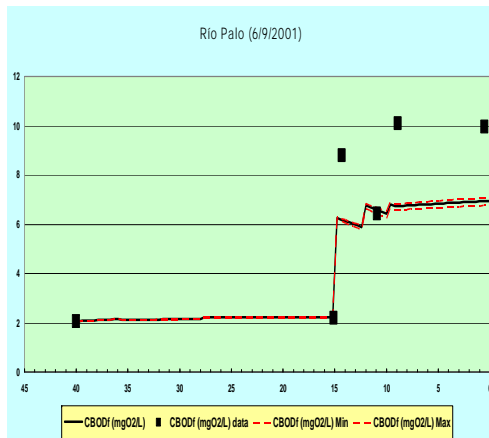
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACION DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO.

Gráfica 3: Migración DBO río Palo.

❖ Época de Invierno.



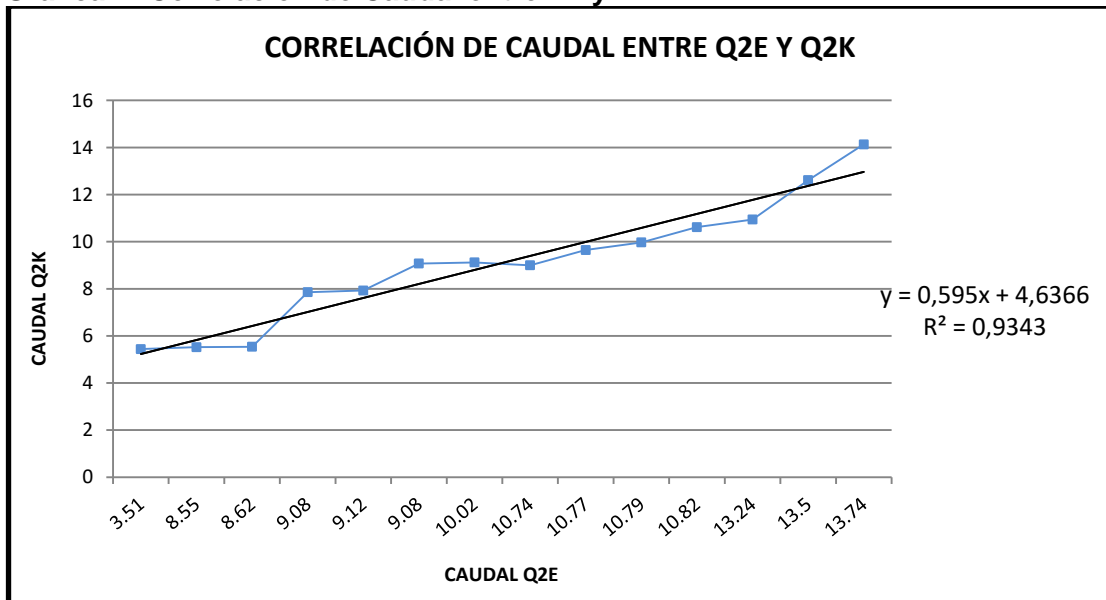
❖ Época de Verano



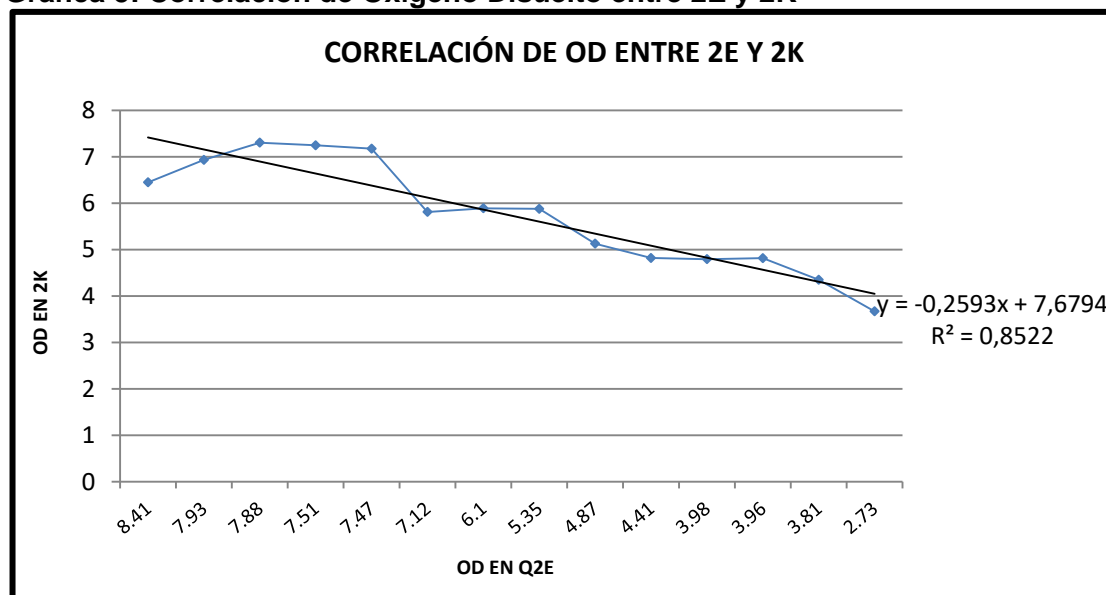
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

El ajuste obtenido de la etapa de migración se confirma a través del coeficiente de correlación para las variables de Caudal, Oxígeno Disuelto y DBO_u, presentados en las 4, 5 y 6 respectivamente, las cuales presentan valores de correlación por encima de 0.8, lo que indica un ajuste positivo, dado que el coeficiente de correlación tiene un valor acotado entre -1 y +1. Los valores cercanos a cero indican que no hay asociación entre las variables; valores cercanos a uno indican una asociación positiva, mientras que los valores cercanos a menos uno indican una asociación negativa¹².

Gráfica 4: Correlación de Caudal entre 2E y 2K

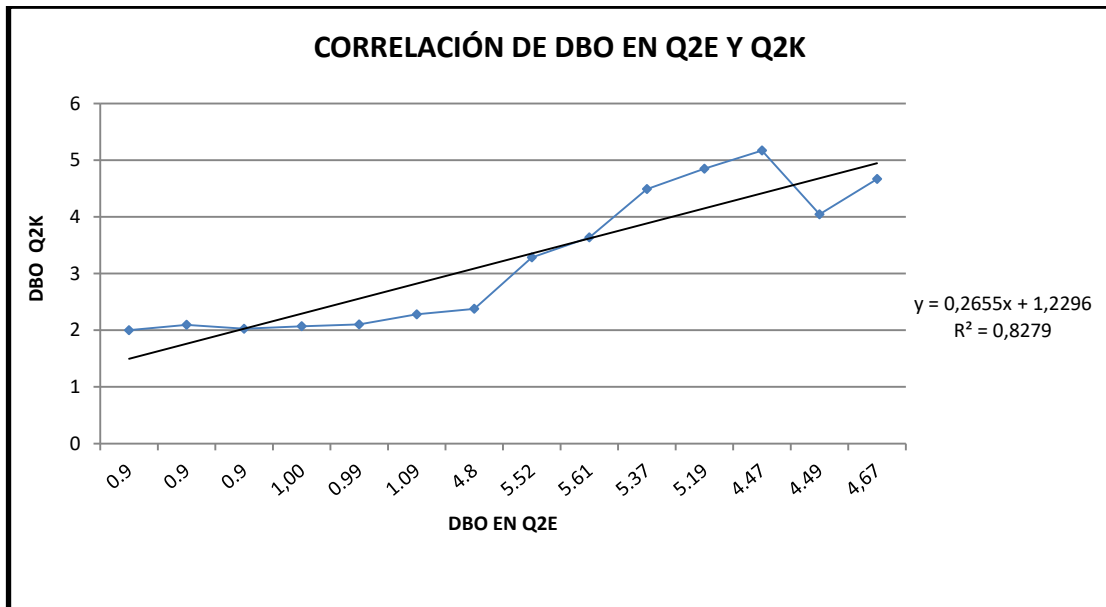


Gráfica 5: Correlación de Oxígeno Disuelto entre 2E y 2K



¹² <http://www.rankia.com>

Gráfica 6: Correlación de DBO_u entre 2E y 2K



Los coeficientes de correlación se encuentran por encima de 0.83, lo que corrobora el ajuste obtenido en la etapa de migración del modelo, cabe anotar, que este resultado se debe a que existen diferencias entre los modelos Q2E y Q2K, dado que la nueva versión de programa (Q2K) contempla variables y factores que en Q2E no se consideraban; a continuación se presentan algunas diferencias entre los modelos, así como también sus similitudes:

El modelo Qual2K es un modelo de calidad de aguas para ríos y corrientes el cual representa una versión actualizada del modelo Qual2E. El modelo Qual2K es similar al Qual2E en los siguientes aspectos:

- ❖ El modelo es unidimensional. El canal presenta mezcla completa en las direcciones vertical y lateral.
- ❖ La hidráulica de estado estable. Simulación del flujo no uniforme en estado estable.
- ❖ Balance de calor diario. El balance térmico y la temperatura son simuladas como una función de la meteorología en una escala de tiempo diaria.
- ❖ Cinética de la calidad del agua diaria. Todas las variables de calidad del agua son simuladas en una escala de tiempo diaria.
- ❖ Entradas de calor y masa. Se simulan cargas puntuales y no puntuales.

El modelo Qual2K incluye los siguientes elementos nuevos:

- ❖ Entorno del programa e interface. Qual2K está implementado dentro del ambiente Windows de Microsoft. Está programado en el lenguaje de macros

de Windows: Visual Basic para Aplicaciones (VBA). Se utiliza el Excel como la interface grafica para el usuario.

- ❖ Segmentación del modelo. Qual2E dividía el sistema en segmentos del río comprendidos por elementos igualmente espaciados. En contraste, Qual2K utiliza elementos de diferente longitud. Adicionalmente, pueden ingresarse múltiples cargas y abstracciones en cada segmento.
- ❖ Especies de DBO carbonácea. Qual2K utiliza dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico. Estas formas son una forma lentamente oxidable (slow CBOD) y una forma rápidamente oxidable (fast CBOD). Adicionalmente se simula la materia orgánica no viva particulada (detritus). Este material está compuesto de carbono particulado, nitrógeno y fósforo con una estequiometria fija.
- ❖ Anoxia. Qual2K simula condiciones anóxicas mediante la reducción de las reacciones de oxidación a cero para niveles de oxígeno bajos. Adicionalmente, se modela la desnitrificación como una reacción de primer orden que inicia a presentarse a bajas concentraciones de oxígeno.
- ❖ Interacciones agua – sedimentos. Flujos agua – sedimentos de oxígeno disuelto y nutrientes son simulados de forma interna en lugar de ser especificados. Esto es, flujos de oxígeno (SOD) y nutrientes son simulados como una función de las partículas de materia orgánica sedimentable, reacciones dentro de los sedimentos y de las concentraciones de formas solubles en las aguas sobrenadantes.
- ❖ Algas del fondo. El modelo simula de forma explícita las algas del fondo.
- ❖ Extinción de luz. La extinción de luz es calculada como función de las algas, detritus y sólidos inorgánicos.
- ❖ pH. Son simulados la alcalinidad y el carbono inorgánico total. El pH del río es simulado con base en estas dos cantidades.
- ❖ Patógenos. Se simulan patógenos genéricos. La remoción de patógenos se determina como una función de la temperatura, luz y sedimentación.

5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para efectuar la calibración del río Palo se tomo como referencia el proyecto de modelación realizado por Ingesam 2002 y datos suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), correspondientes a dos campañas realizadas con fines de modelación en los meses de Mayo (temporada de invierno) y Agosto (temporada de verano) en el año 2006**.

La calibración del modelo se llevó a cabo con los datos de la campaña de monitoreo realizada el 10 de Agosto de 2006 (época de verano), ya que en esta época se evidencian las condiciones críticas para el río, puesto que las cargas contaminantes

** Nota: si se requiere mayor información acerca de la metodología realizada para la determinación de los tramos y de las campañas de muestreo e información adicional, se recomienda consultar el documento base "ESTUDIO DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DISPOSICIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES SOBRE EL RÍO PALO – CRC 2002".

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

vertidas sobre éste generan un mayor impacto debido al descenso del caudal, lo cual conlleva a una disminución de la capacidad de autopurificación del río.

Con el objetivo de determinar los coeficientes hidráulicos requeridos para alimentar el programa, se tuvieron en cuenta los datos de los aforos de las campañas realizadas en los años 2002 y 2006, en las épocas de verano e invierno, con los cuales se obtuvieron los coeficientes hidráulicos que se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7: Parámetros y coeficientes hidráulicos de río Palo.

TRAMO N°	Q m³/s	H m	V m/s	PROFUNDIDAD		VELOCIDAD	
				α	β	A	b
1	7.78	0.39	0.80	0.13	0.53	0.32	0.47
	5.44	0.30	0.75				
	12.85	0.49	1.12				
2	15.54	0.67	0.84	0.20	0.45	0.30	0.38
	7.88	0.50	0.66				
	17.45	0.70	0.90				
3	19.34	0.81	1.06	0.55	0.35	0.21	0.43
	9.13	1.11	0.55				
	19.85	1.11	0.77				
4	22.15	1.33	0.92	0.11	0.77	1.63	-0.07
	9.362	0.60	1.40				
	20.19	1.03	1.32				
5	57.00	1.80	1.29	0.64	0.20	0.33	0.43
	12.66	1.0	1.00				
	37.26	1.24	1.60				

En las Tablas 8 y 9, se relacionan los parámetros hidráulicos y fisicoquímicos en los respectivos tramos sobre el río Palo, obtenidos de la campaña de monitoreo del 2006:

Tabla 8: Parámetros de las Estaciones de monitoreo sobre el río Palo.

TRAMO	ESTACION	UBICACIÓN Km	CAUDAL m³/s	H m	U m/s	T °C
1	Bocatoma Cedelca	38.48	5.440	0.300	0.754	18.6
	Antes Qda La Trampa	34.14	11.31	*	*	19.8
2	Antes Vereda Campo	29.01	*	*	*	25.0
	Puente vía Guachené	26.30	7.882	0.500	0.660	26.3
3	Pte Campamento el Maíz	17.73	9.130	1.100	0.549	26.4
	Antes Bocatoma Propal	14.55	*	*	*	25.0
4	Puente PICC	11.81	9.362	0.600	1.395	26.3
	Barrio El Triunfo	8.76	11.615	*	*	25.6
5	Estación CVC. Puerto Tejada	7.85	12.656	1.000	1.000	26.5
	La Gaviota	5.580	*	*	*	26.0
	Desembocadura río Palo	0.000	*	*	*	25.3

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos del río Palo.

TRAMO	ESTACION	Cond. u/cm	ISS mg/L	DO mgO ₂ /L	CBOD mgO ₂ /L	NH ₄ ⁺ mg/l N	NO ₃ mg/l N	Coliformes fecales NMP/100 mL	pH und
1	Bocatoma Cedelca	140	12.3	6.45	2.0	0.11	0.96	2550	6.39
	Antes Quebrada La Trampa	131	89.1	6.80	2.3	<0.01	1.01	3840	6.37
2	Antes Vereda Campo	130	29.2	6.78	2.1	0.02	0.88	1730	7.51
	Puente vía Guachené	133	39.5	7.17	1.9	0.12	0.90	8130	7.35
3	Puente Campamento el Maíz	146	18.9	6.10	2.0	0.26	0.90	3090	7.04
	Antes Bocatoma Propal	*	32.0	5.62	2.5	0.14	0.89	*	7.35
4	Puente PICC	198	34.5	5.30	4.8	0.40	1.50	3950	7.18
	Bario El Triunfo	202	66.0	4.69	5.5	0.78	1.43	*	7.01
5	Estación CVC Puerto Tejada	224	87.1	4.11	3.8	0.29	1.22	86640	6.93
	La Gaviota	214	99.7	4.15	4.6	0.07	1.28	64880	6.86
	Desembocadura río Palo	210	62.1	4.47	4.7	0.47	1.30	16070	6.96

En las Tablas 10 y 11, se relaciona los parámetros hidráulicos y fisicoquímicos para los principales tributarios y descargas, así como, para las extracciones y derivaciones sobre el río Palo, obtenidos de la campaña de monitoreo del 2006:

Tabla 10: Tributarios y principales descargas sobre el río Palo.

TRAMO	TRIBUTARIOS Y DESCARGAS	UBICACIÓN N Km	CAUDA L m ³ /s	T °C	Cond u/cm.	SST mg/L	OD mg/l	DBO mgO ₂ /l	NH ₄ ⁺ mg/l N	NO ₃ mg/l N	Coliformes Fecales NMP/100ml	pH und
1	Quebrada La Trampa	34.14	2.200	23.80	221	3.40	8.07	1.80	0.02	0.16	100	7.87
2	Descarga PTARD Guachené	25.25	0.017	23.80	236	35.60	*	54	0.03	*	>241920	6.33
4	Descarga ARI Ingenio la Cabaña	13.71	0.152	23.90	200	35.10	*	55	0.06	2.19	20360	6.29
	Descarga ARI Propal II	12.29	0.490	28.60	1031	163	*	290	32.3	*	82970	8.40
	Descarga ARI PICC II	11.81	0.0037	29.70	1772	272	*	1170	0.315	*	*	7.00
	Río Paila	8.49	1.000	27.50	216	171	4.93	2.00	0.210	1.28	19350	6.85

Tabla 11: Extracciones y derivaciones sobre el río Palo.

TRAMO	EXTRACCIONES Y DERIVACIONES	UBICACIÓN Km	CAUDAL m ³ /s	T °C	SST mg/L	OD mg/L	NH ₄ ⁺ ugN/L	pH Und
2	Acequia Pílamo	33.65	0.056					
	Acequia La Cabaña	25.97	0.046					7.00
3	Bocatoma Propal II	14.41	0.420	25	32	5.62	140	7.35

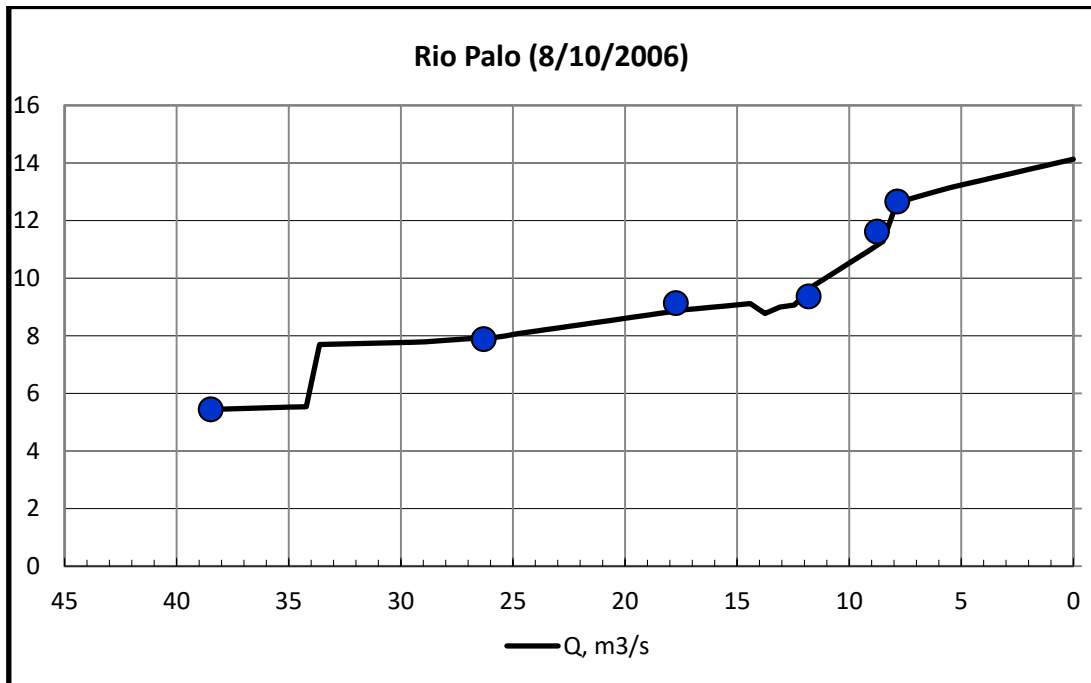
Con la información relacionada anteriormente se procedió a realizar la implementación en el modelo de calidad del agua Qual2K de la siguiente forma:

- ❖ **Headwater:** esta hoja se alimenta proporcionando los datos del punto N° 1: Bocatoma Cedelca referentes a caudal, coeficientes hidráulicos y parámetros fisicoquímicos.
- ❖ **Downstream:** aquí se ingresan los valores de los parámetros fisicoquímicos correspondientes al punto de desembocadura del río (desembocadura río Cauca).
- ❖ **Reach:** se ingresan la ubicación de cada punto de muestreo y la longitud entre cada uno de ellos, elevación y coordenadas respectivas, así como también los coeficientes hidráulicos de cada tramo.
- ❖ **Reach Rates:** esta hoja se alimenta con valores de los coeficientes cinéticos, que para este caso se asumieron puesto que se carecía de información suficiente para su determinación.
- ❖ **Air Temperature, Dew Point Temperature, Wind Speed, Cloud Cover y Shade** los datos correspondientes a estas hojas se consideraron constantes a lo largo del río y se asumieron valores promedio característicos para la zona de estudio al no contarse con las mediciones de campo para estos parámetros.
- ❖ **Light and Heat:** la información contenida en esta hoja no fue modificada, dejándose los valores y modelos por defecto implementados en el Qual2K. Solamente, se indicó ignorar el modelo de diagénesis de sedimentos.
- ❖ **Point Sources:** La datos que se ingresan en esta hoja corresponden a las fuentes puntuales anteriormente nombradas (Tablas 10 y 11) las cuales corresponden a aquellas que presentan un mayor grado de significancia bien sea desde el punto de vista hidráulico o de calidad del agua.
- ❖ **Diffuse Sources:** las fuentes difusas permiten considerar componentes del balance hídrico como son escorrentía, infiltración y fuentes no localizadas.

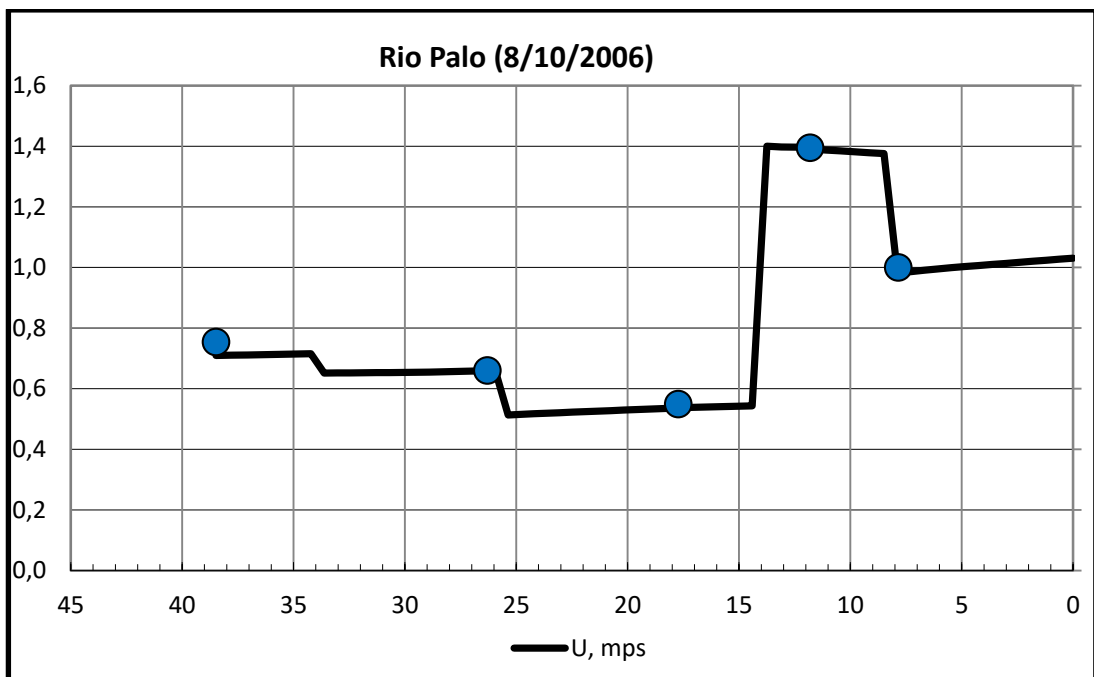
Derivado de la implementación de la información en el modelo QUAL2K se obtienen los resultados correspondientes a: Caudal, velocidad, profundidad, temperatura, Oxígeno disuelto, DBO rápida, amonio, nitratos y pH.

En las Gráficas 7, 8 y 9, se presenta los resultados en cuanto a las condiciones hidráulicas del río Palo:

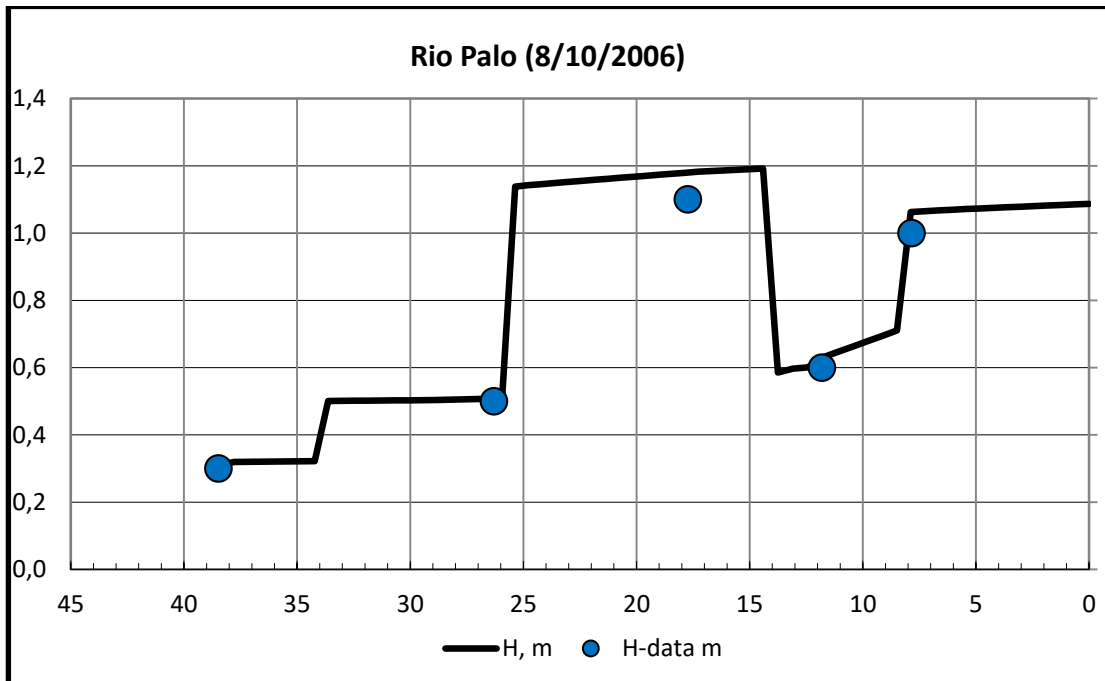
Gráfica 7: Caudal simulado – Calibración río Palo.



Gráfica 8: Velocidad simulada – Calibración río Palo.



Gráfica 9: Profundidad simulada – Calibración río Palo.

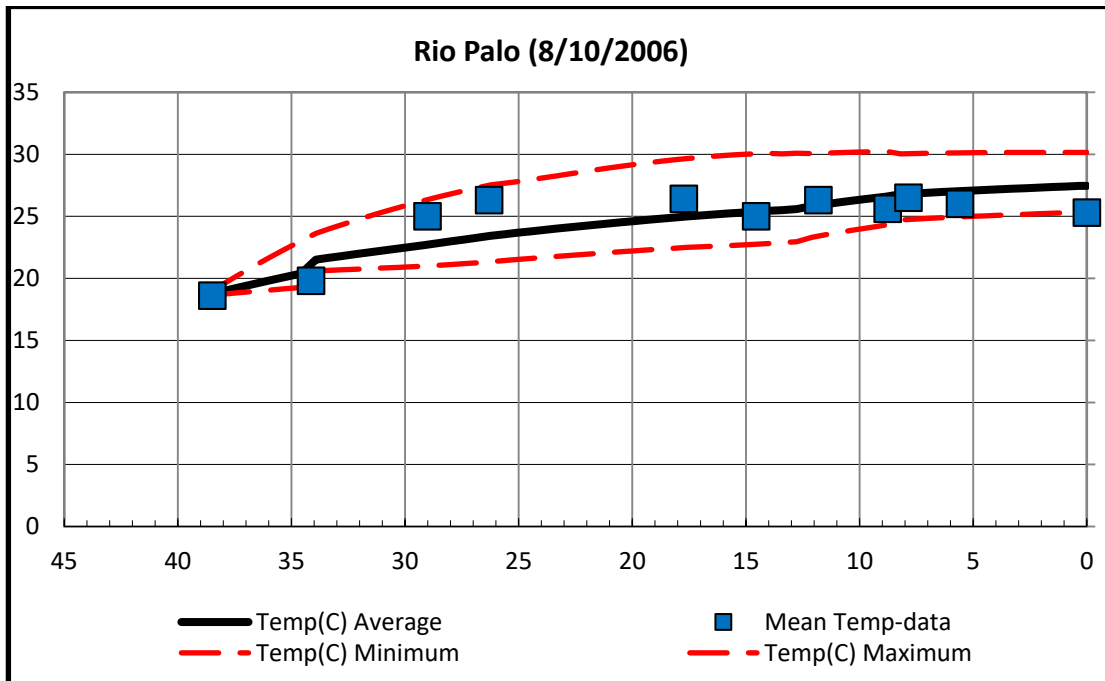


Respecto a las gráficas correspondientes a los parámetros hidráulicos resultantes de la “corrida” del modelo QUAL2K, se puede concluir que se obtuvo un buen ajuste en cuanto a estos parámetros, dicho ajuste se logró mediante la incorporación de un caudal de $5.35 \text{ m}^3/\text{s}$ distribuidos a lo largo de la corriente objeto de estudio (38.48 km). Es importante obtener un buen ajuste en este parámetro a fin de conseguir una adecuada calibración de los parámetros de velocidad, profundidad y modelos de reaeración.

La temperatura del agua tiene gran importancia por el hecho de que los organismos requieren determinadas condiciones para sobrevivir (organismos estenotérmicos y euritérmicos). Este parámetro presentado en la Gráfica 11, se ve influenciado por la latitud, altitud, estación, hora del día, la circulación de aire, cubierta de nubes, el flujo y la profundidad del cuerpo de agua. A su vez, la temperatura afecta a los procesos físicos, químicos y biológicos en cuerpos de agua y, por tanto, la concentración de muchas variables. El aumento de la temperatura también disminuye la solubilidad de los gases en el agua, como O_2 , CO_2 , N_2 , CH_4 y otros. El río Palo presenta una temperatura promedio de 24.5°C lo cual es característico de un agua superficial¹³.

¹³ Idem 19.

Gráfica 10: Temperatura simulada – Calibración río Palo.



La calibración del oxígeno disuelto se llevó a cabo mediante la “corrida” del modelo con cada uno de los métodos de reaireación que presenta el mismo, derivado de lo cual se obtienen una serie de datos de oxígeno disuelto, los cuales se grafican a fin de obtener una línea de tendencia cuyo coeficiente de correlación se aproxime a uno (1).

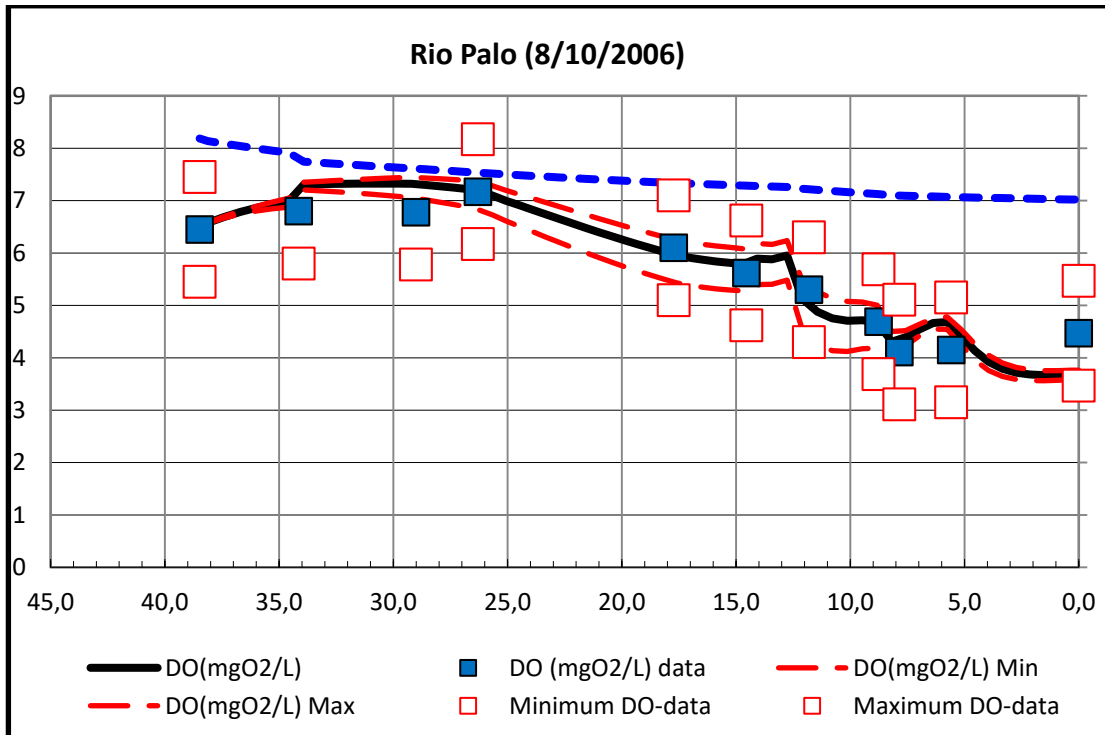
En la Tabla 12, se presenta el ajuste obtenido con cada uno de los modelos de reaireación propuestos dentro del modelo QUAL2K:

Tabla 12: Coeficiente de correlación para los modelos de reaireación.

Modelo de Reaireación	Coefficiente de Correlación
INTERNAL	0.66
O’CONNOR-DOBBINS	0.71
CHURCHILL	0.64
OWENS-GIBBS	0.65
TSIVOGLOU-NEAL	0.64
THACKSTON-DAWSON	0.70
USGS (POOL-RIFFLE)	0.56
USG (CHANNEL-CONTROL)	0.64
USER	0.68

En la Gráfica 11, se presenta el resultado obtenido de la modelación, respecto al parámetro de Oxígeno Disuelto.

Gráfica 11: Oxígeno Disuelto simulado – Calibración río Palo.



Un adecuado nivel de oxígeno disuelto es necesario para una buena calidad del agua. El oxígeno es un elemento necesario para todas las formas de vida. Las corrientes naturales, para los procesos de purificación requieren unos adecuados niveles de oxígeno para proveer las formas de vida aeróbicas. La determinación de las concentraciones de Oxígeno Disuelto es una parte fundamental de una evaluación de la calidad del agua, ya que el oxígeno está involucrado o influencia casi todos los procesos químicos y biológicos dentro de los cuerpos de agua; concentraciones por debajo de 5 mg/l puede afectar negativamente al funcionamiento y la supervivencia de las comunidades biológicas y por debajo de 2 mg/l puede llevar a la muerte de la mayoría de las especies de peces presentes en el cuerpo de agua¹⁴.

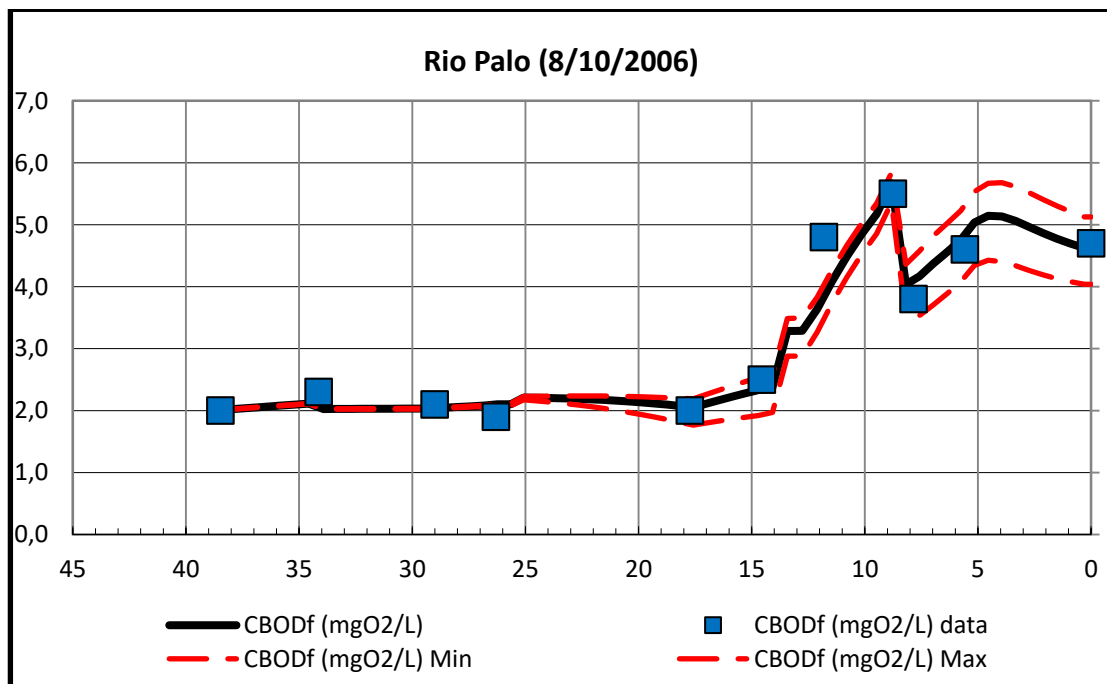
En la Gráfica 11, se presentan los valores de oxígeno disuelto en el río Palo en la campaña de monitoreo, los cuales se ubican en un intervalo entre 4 y 7 mg/l, teniendo que, entre el kilómetro 38 hasta el kilómetro 17 del tramo de estudio, los valores de oxígeno disuelto se ubican alrededor de 6.6 mg/l, lo cual indica una calidad de agua aceptable, no obstante, dicha calidad se ve afectada por las diferentes descargas, tanto puntuales como difusas que se vierten a lo largo del río, como por ejemplo el vertimiento en el tramo 4 (Bocatoma Propal S.A.– río Paila) proveniente de la Productora de Papeles S.A. – PROPAL, la cual vierte en el río

¹⁴ Water Quality Assessments. A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. UNESCO – WHO – UNEP. - 1996.

cargas contaminantes altas como por ejemplo amonio, con un valor de 32.3 mg/l, lo cual genera una disminución considerable en el oxígeno disuelto presente en el cuerpo de agua, ya que se da lugar al proceso de nitrificación (oxidación biológica del amonio a nitrato por medio de microorganismos aerobios que usan el oxígeno molecular como oxidante¹⁵), por ende los niveles de oxígeno disuelto tienden a disminuir, presentando valores menores a 5 mg/l, los cuales ponen bajo presión la vida acuática del ecosistema. Adicionalmente, el oxígeno afecta a un vasto número de indicadores, no solo bioquímicos, sino también estéticos como el olor, claridad del agua, y sabor. Consecuentemente, el oxígeno es quizás el más importante de los indicadores de calidad de agua. La modelación obtenida a través de QUAL2K, presenta un buen ajuste, ya que sigue la tendencia de los valores del parámetro analizado.

Al igual que el Oxígeno Disuelto, la DBO es un parámetro importante para el análisis de la calidad del agua, ya que permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas del cuerpo receptor. Propal y el Parque Industrial y Comercial del Cauca – Etapa II, vierten sobre el río una carga contaminante de DBO_u de 290 y 1170 mg/l respectivamente, lo que genera un alto consumo de oxígeno que produce un detrimento de la calidad del agua, sin embargo, cabe resaltar que el río presenta una respuesta favorable de autodepuración en esta condición de caudales, dado que los valores de DBO_u para el río no sobrepasan los 7 mg/l, lo cual se puede observar en la Gráfica 12:

Gráfica 12: DBO_u rápida simulada – Calibración río Palo.



El río Paila genera un leve aumento en los niveles de oxígeno disuelto en el kilómetro 8.49 (ver Grafica 12), sin embargo, este nivel disminuye nuevamente a un valor promedio de 3.5 mg/l, lo cual genera modificaciones en la calidad del agua, y

¹⁵ <http://es.wikipedia.org>

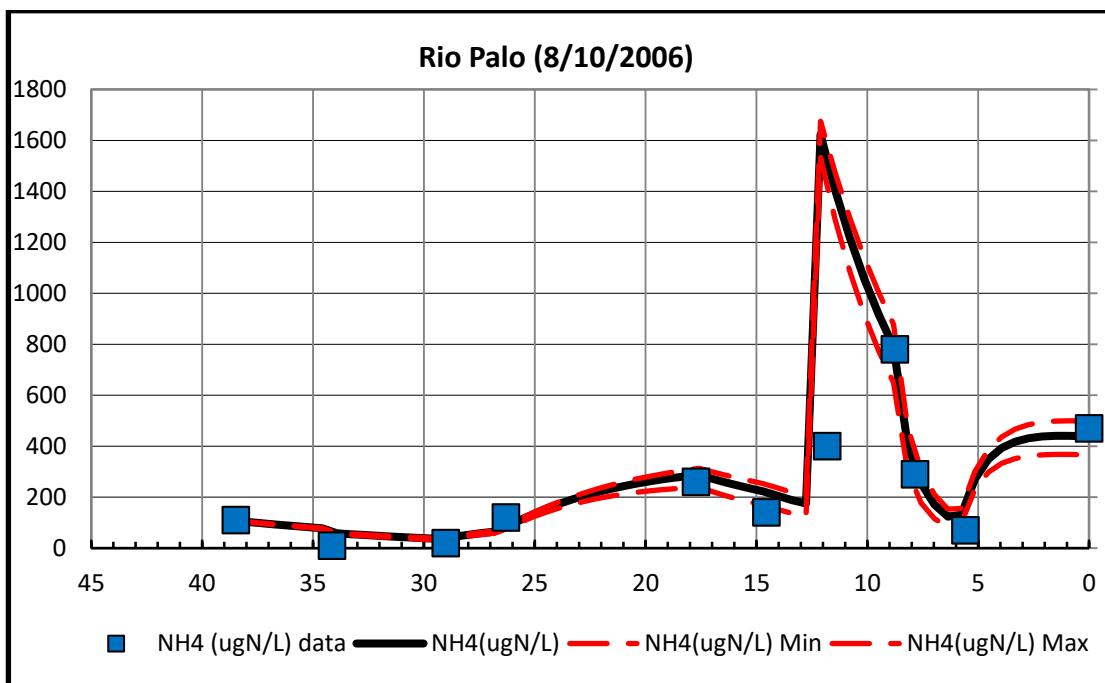
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

por consiguiente alteraciones en los procesos biológicos de la biota acuática. Aguas no contaminadas normalmente tienen valores de DBO de 2 mg/l O₂ o menos, mientras que las que reciben aguas residuales pueden tener valores de hasta 10 mg/l O₂ o más, especialmente cerca del punto de vertido de aguas residuales¹⁶.

La modelación obtenida para DBO_u fue aceptable teniendo en consideración que el modelo representa la tendencia de los valores del parámetro analizado, cabe aclarar que debido a las características fisicoquímicas del vertimiento de Propal, éste fue modelado como DBO lenta (CBOD slow) según lo sugerido en el manual de QUAL2K¹⁷.

El nitrógeno es la base fundamental de las proteínas, las cuales constituyen la base estructural para todos los seres vivos. El nitrógeno se puede encontrar en el agua en 7 diferentes formas debido a los estados de valencia del mismo, sin embargo, el ión amonio y el nitrato presentados en las Gráficas 13 y 14 respectivamente, son los más importantes para los ecosistemas acuáticos por cuanto constituyen la fuente principal para los organismos residentes en este medio¹⁸.

Gráfica 13: Amonio simulado – Calibración río Palo.



El parámetro de fisicoquímico de Amonio, presenta un buen ajuste hasta el tramo 3 (PTAR Guachené – Bocatoma Propal), no obstante, al finalizar dicho tramo e iniciando el tramo 4, se presenta el vertimiento de Propal con la carga de amonio de 32.3 mg/l, generando un incremento significativo respecto a éste parámetro, por consiguiente el modelo simula una cantidad mayor de amonio de la que realmente

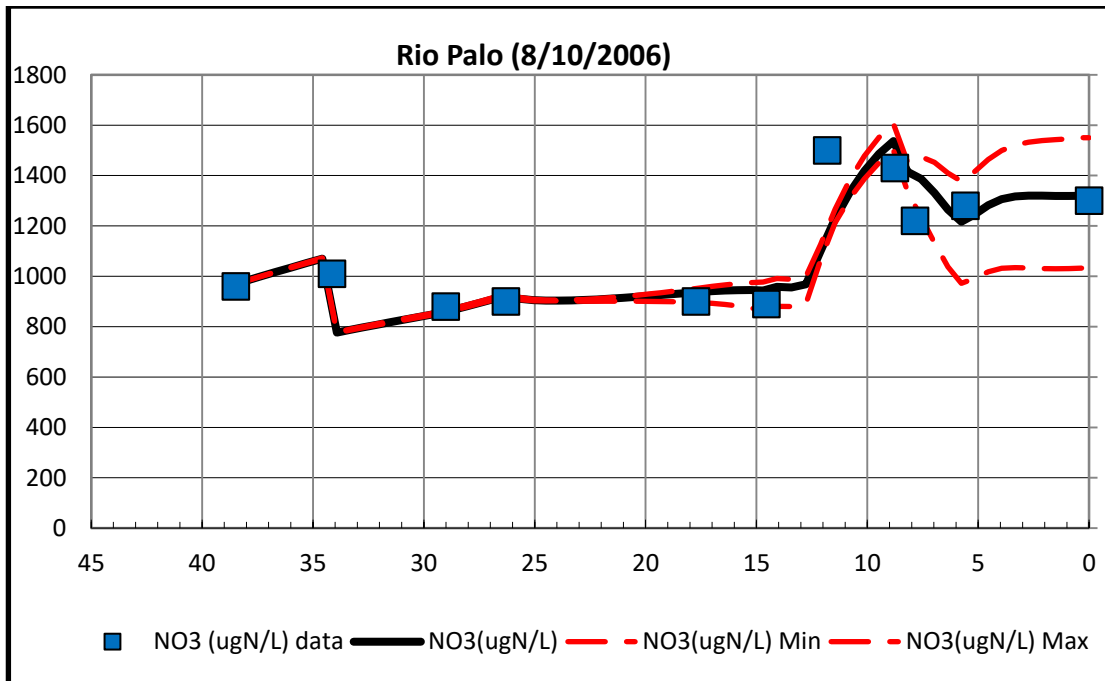
¹⁶ Water Quality Assessments. A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. UNESCO – WHO – UNEP. - 1996.

¹⁷ QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. EPA - 2008

¹⁸ Fundamentos de Limnología Neotropical. Roldán, G. – 1992.

se encuentra en el río, dicha simulación puede deberse a que en el presente estudio no se cuenta con la totalidad de la información de entrada que requiere el modelo, tal como fosforo en sus distintas formas, alcalinidad, detritus, etc.; lo cual genera una representación de los parámetros, según el estado real de la corriente objeto de estudio; cabe aclarar que los modelos matemáticos son una representación aproximada del fenómeno del río continuo, ya que en el agua se presentan múltiples procesos de gran complejidad los cuales son de difíciles de representar a través de un modelo.

Gráfica 14: Nitrato simulado – Calibración río Palo.

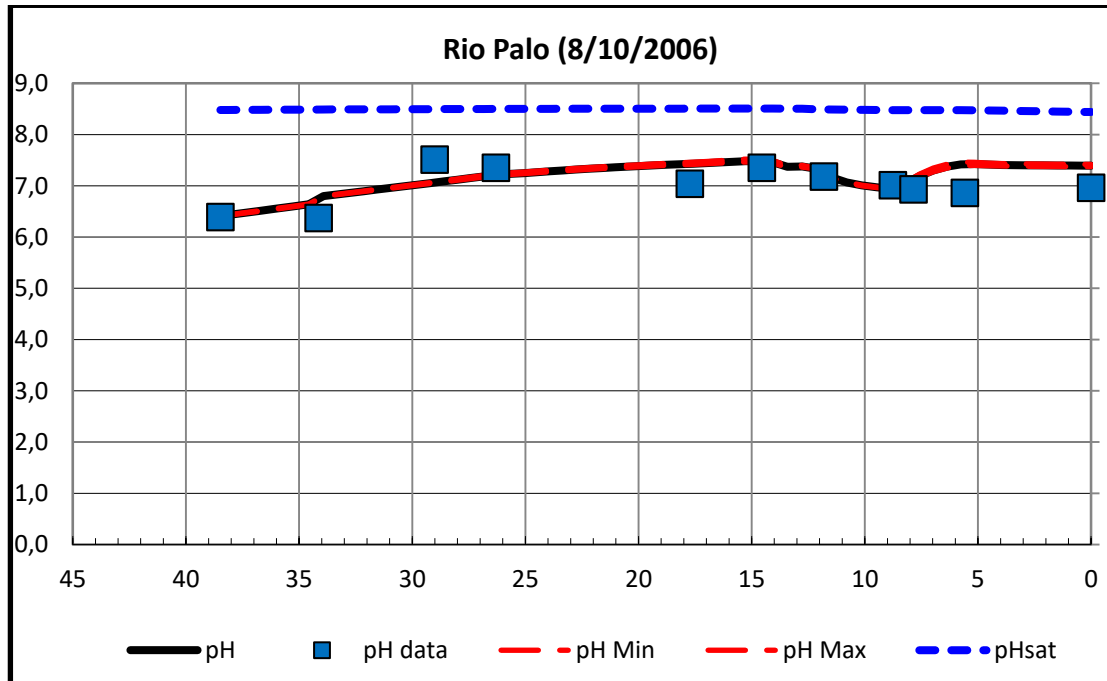


Las concentraciones de nitratos en aguas naturales raramente exceden los 0.1 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$, pueden ser incrementadas por descargas de aguas residuales industriales y municipales, incluyendo lixiviados provenientes de sitios de disposición de residuos sólidos y rellenos sanitarios, dichas descargas constituyen hoy en día una de las fuentes más importantes de nitrógeno en el agua y es la principal responsable de los fenómenos de eutroficación de los ríos; las áreas cercanas a la cuenca del río Palo y en especial en el tramo de estudio, se encuentran ubicadas la mayoría de las industrias del norte del departamento del Cauca, las cuales vierten sus residuos líquidos sobre éste cuerpo de agua, causando detrimento de su calidad, del mismo modo, los monocultivos de caña representan las fuentes difusas que incorporan en el agua diferentes compuestos químicos contenidos en los fertilizantes, abonos, fumigantes, etc.

Las aguas superficiales pueden presentar concentraciones de nitrato de hasta 5 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$, pero normalmente menores que 1 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$. Las concentraciones que exceden los 5 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ generalmente indican contaminación por residuos humanos o animales o por escorrentía de fertilizantes, por tanto, los nitratos en el río Palo, muestran una leve contaminación por dichas fuentes ya que se encuentran en intervalo de valores entre 0.8 – 1.5 mg/l.

En casos de contaminación extrema, las concentraciones pueden alcanzar valores de 200 mg/L NO₃-N. La Organización Mundial de la Salud recomienda un límite máximo de nitrato en el agua potable de 11.3 mg/l NO₃-N y las aguas con mayores concentraciones pueden representar un significativo riesgo para la salud¹⁹.

Gráfica 15: pH simulado – Calibración río Palo.



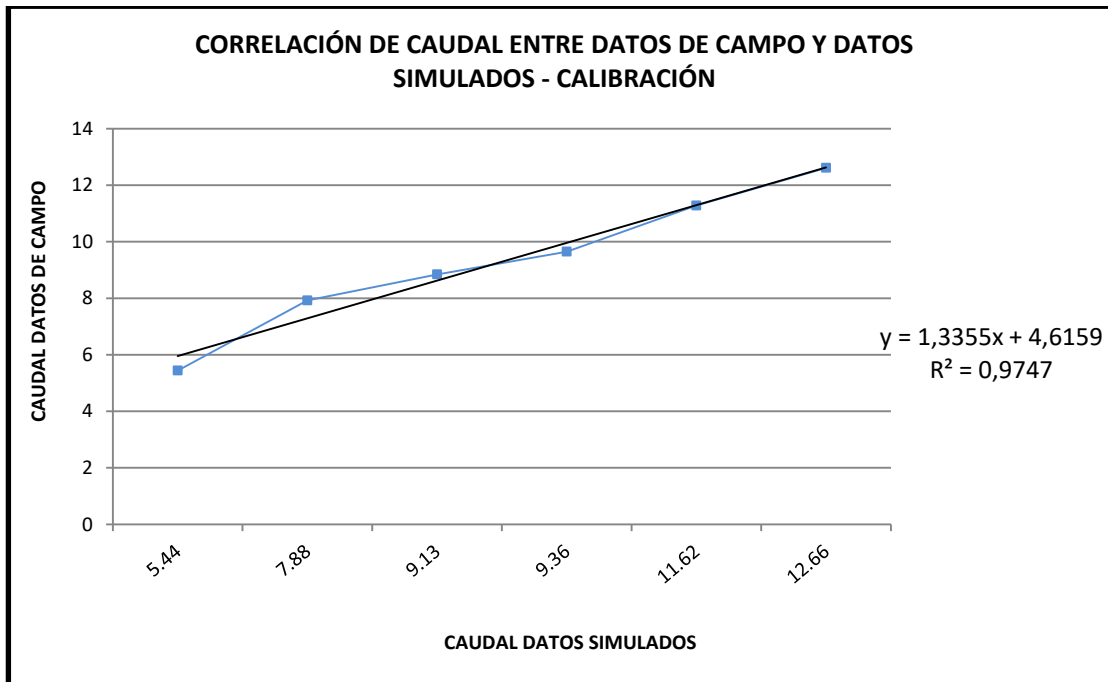
En la Gráfica 15, se presenta el resultado obtenido de la modelación, respecto al parámetro de pH, el cual es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH. Su valor define en parte la capacidad de autodepuración de una corriente y, por ende, su contenido de materia orgánica (DQO, DBO_u), además de la presencia de otros contaminantes, como metales pesados²⁰. El pH presente en el río Palo oscila entre 6.39 y 7.51 con un promedio a lo largo del tramo de estudio de 7, lo cual indica que son aguas neutras.

En las Gráficas 16, 17 y 18, se presenta la correlación para los parámetros de Caudal, Oxígeno Disuelto y DBO_u respectivamente, en las cuales, mediante el coeficiente de correlación se muestra el grado de ajuste obtenido de la etapa de calibración para el río Palo, teniendo que para los parámetros anteriormente nombrados, los resultados del coeficiente se presentan por encima de 0.72, lo cual indica un ajuste positivo, teniendo en consideración lo expresado en la etapa de migración en cuanto a coeficientes de correlación, cabe aclarar que el resultado de oxígeno disuelto se ve afectado por el comportamiento que presenta el parámetro de amonio, cuyos valores alcanza 16 mg/l de amonio lo cual genera un alto consumo de oxígeno.

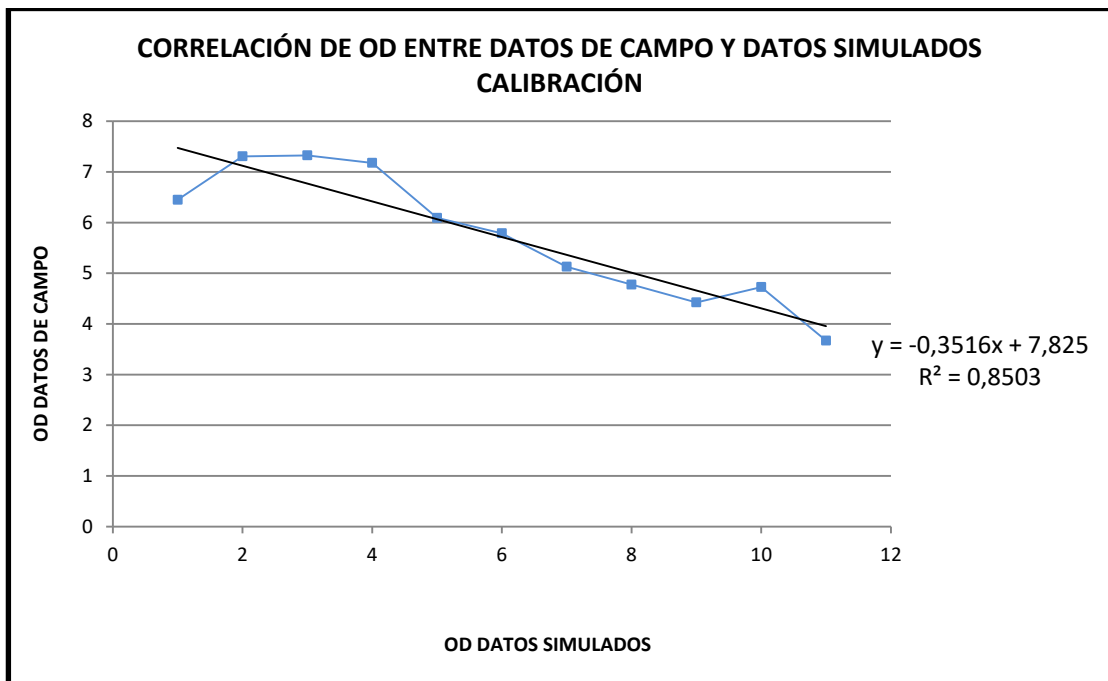
¹⁹ Water Quality Assessments. A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. UNESCO – WHO – UNEP. - 1996.

²⁰ <http://www.ideam.gov.co/indicadores>.

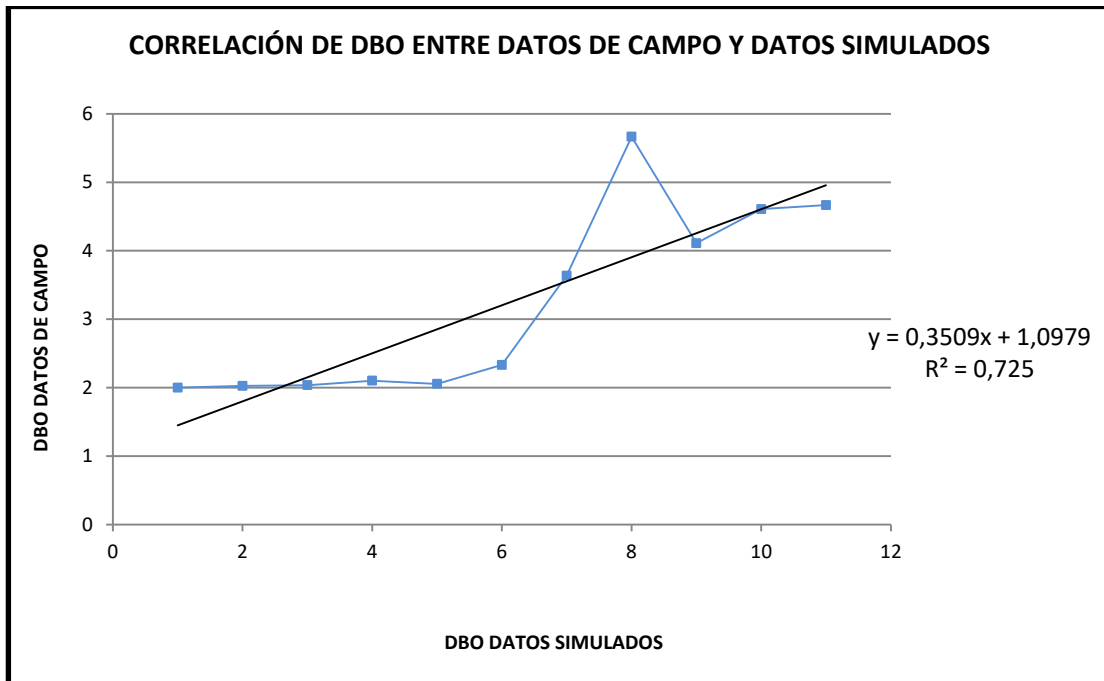
Gráfica 16: Correlación de Caudal entre datos de campo y datos simulados -
calibración



Gráfica 17: Correlación de OD entre datos de campo y datos simulados -
calibración



Gráfica 18: Correlación de DBO_u para calibración



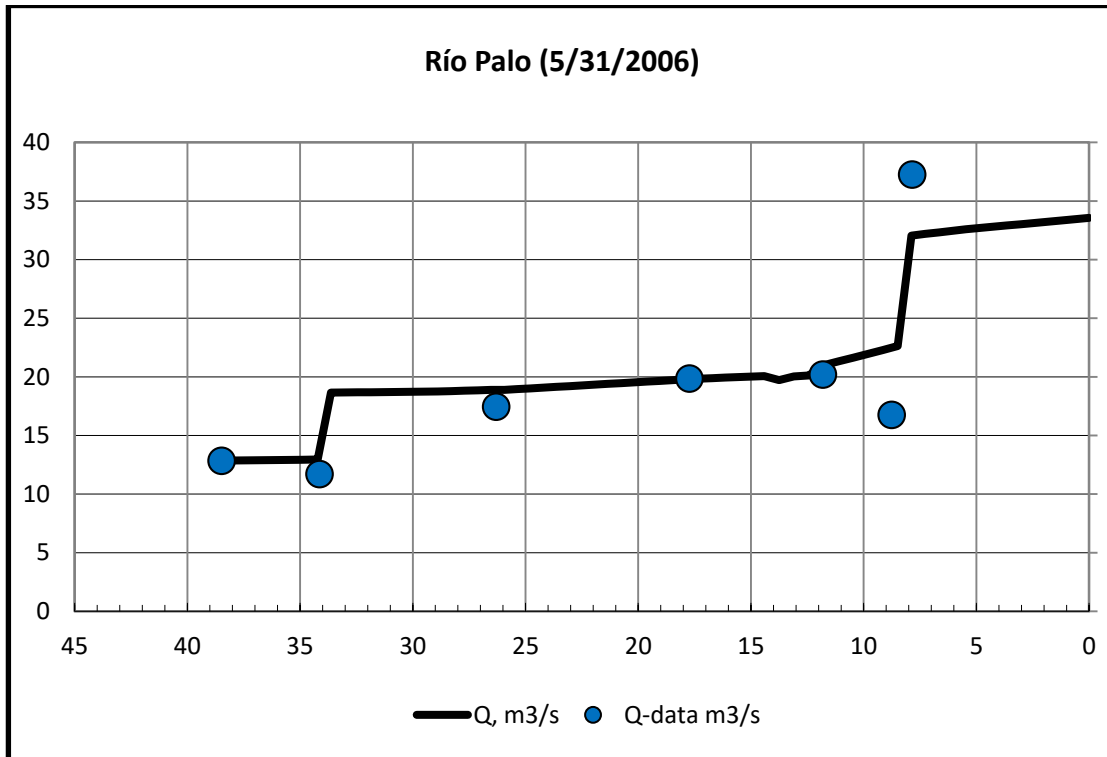
5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO.

La validación del modelo se realizó con los datos de la campaña de monitoreo para la temporada de invierno (31 de Mayo de 2006).

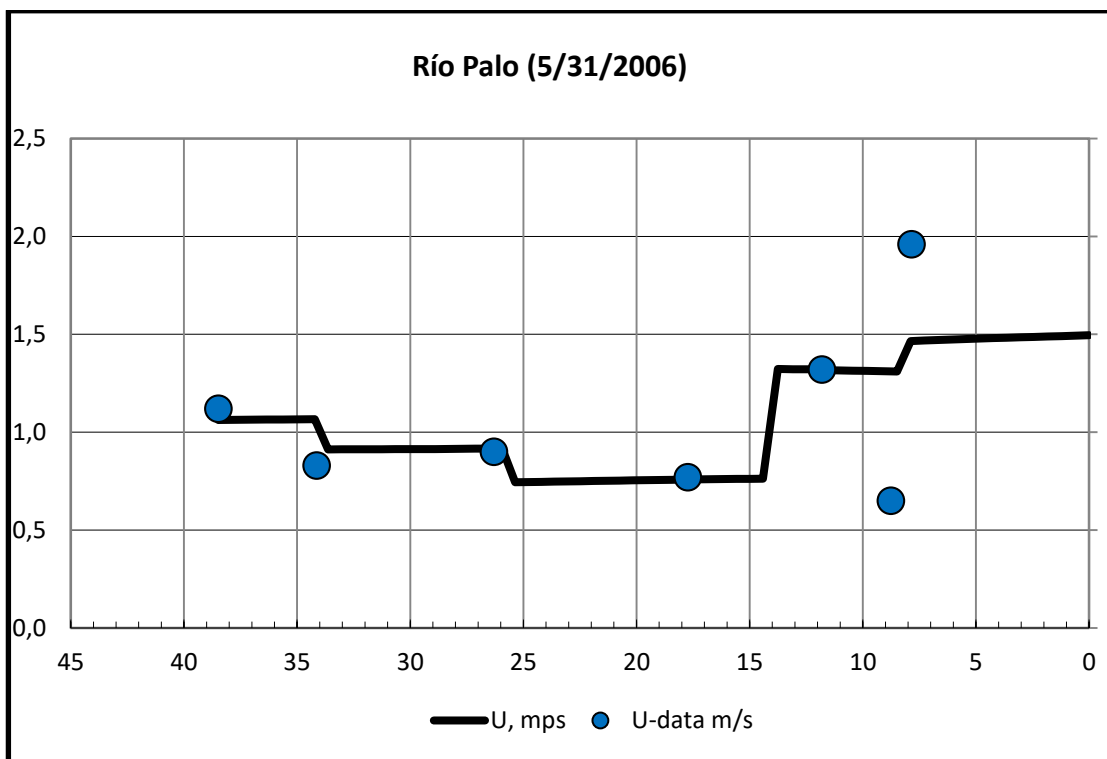
Derivado de la implementación de la información en el modelo QUAL2K se obtienen los resultados correspondientes a: caudal, velocidad, profundidad, temperatura, Oxígeno disuelto, DBO rápida, amonio, nitratos y pH, teniendo que, los resultados de la validación presentan un buen ajuste en los diferentes parámetros simulados, esto se debe a que dicha validación se realiza con unas condiciones hidrológicas diferentes con las cuales se llevó a cabo la calibración del modelo (verano, 10 de Agosto de 2006). Una validación con mayor ajuste se llevaría a cabo realizando una campaña de monitoreo en condiciones hidrológicas similares a las desarrolladas en la calibración, no obstante, los resultados derivados de la validación presentan el mismo comportamiento que para la etapa de calibración, por tanto, el análisis de cada parámetro se puede observar en las gráficas 7 a 15 correspondientes a dicha etapa.

A continuación se presentan los resultados de los parámetros simulados en las Gráficas 19 a 27.

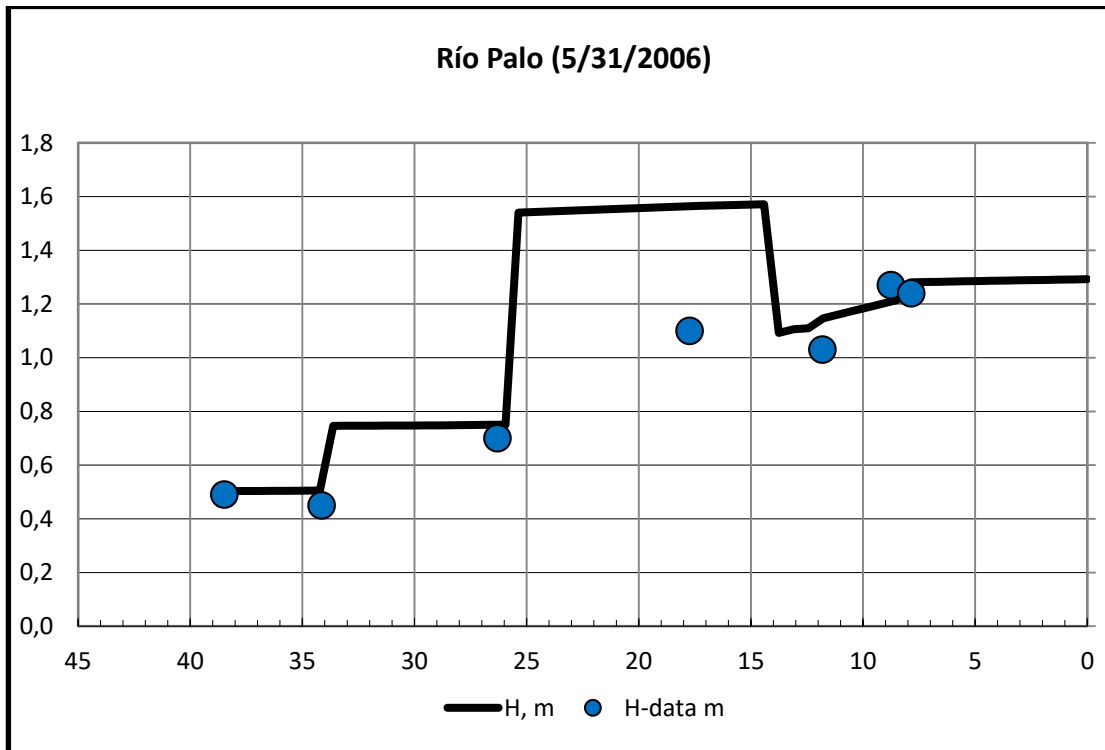
Gráfica 19: Caudal simulado - Validación río Palo.



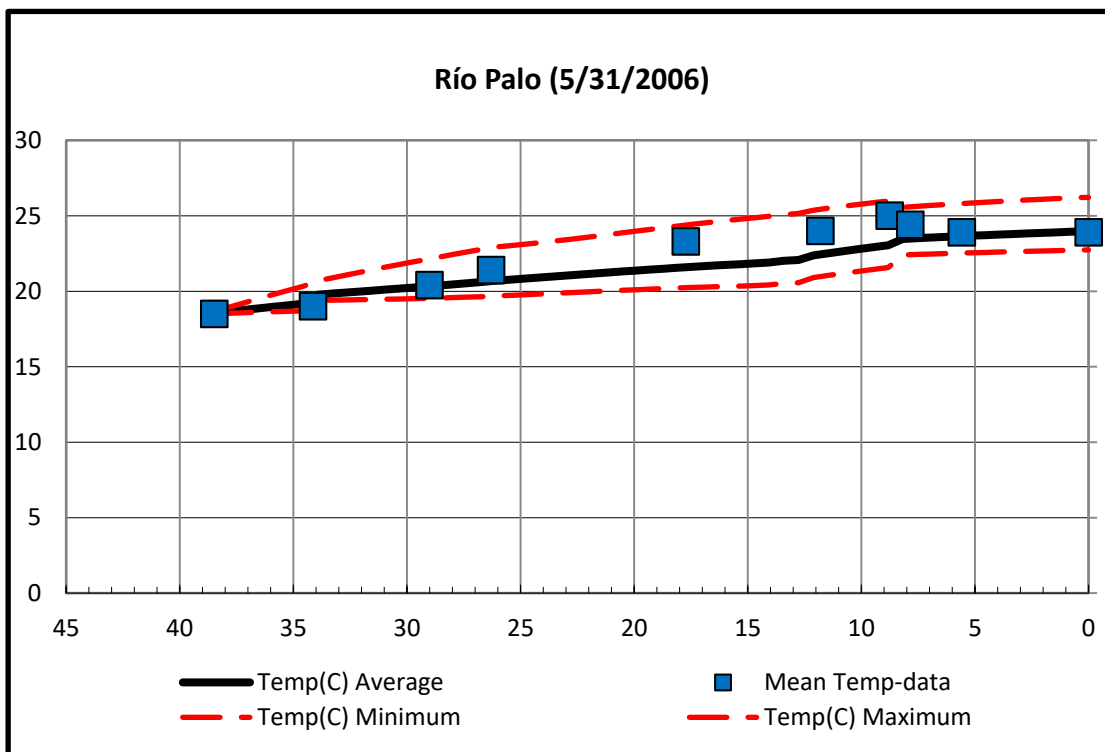
Gráfica 20: Velocidad simulada - Validación río Palo.



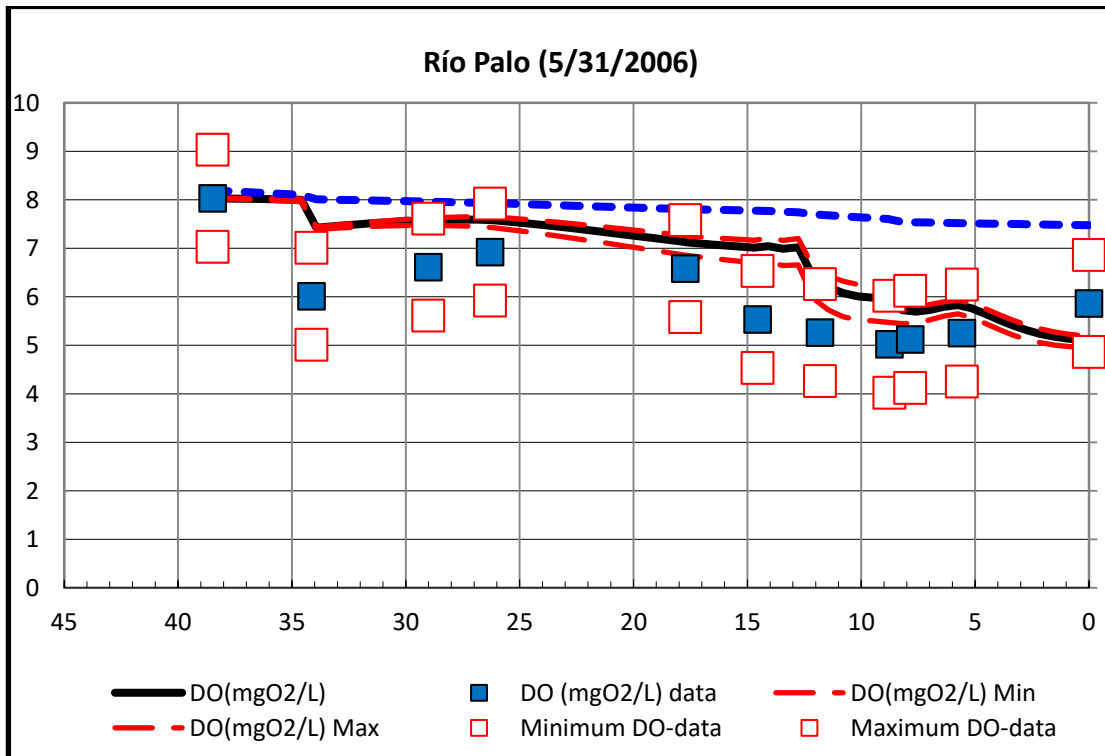
Gráfica 21: Profundidad simulada - Validación río Palo.



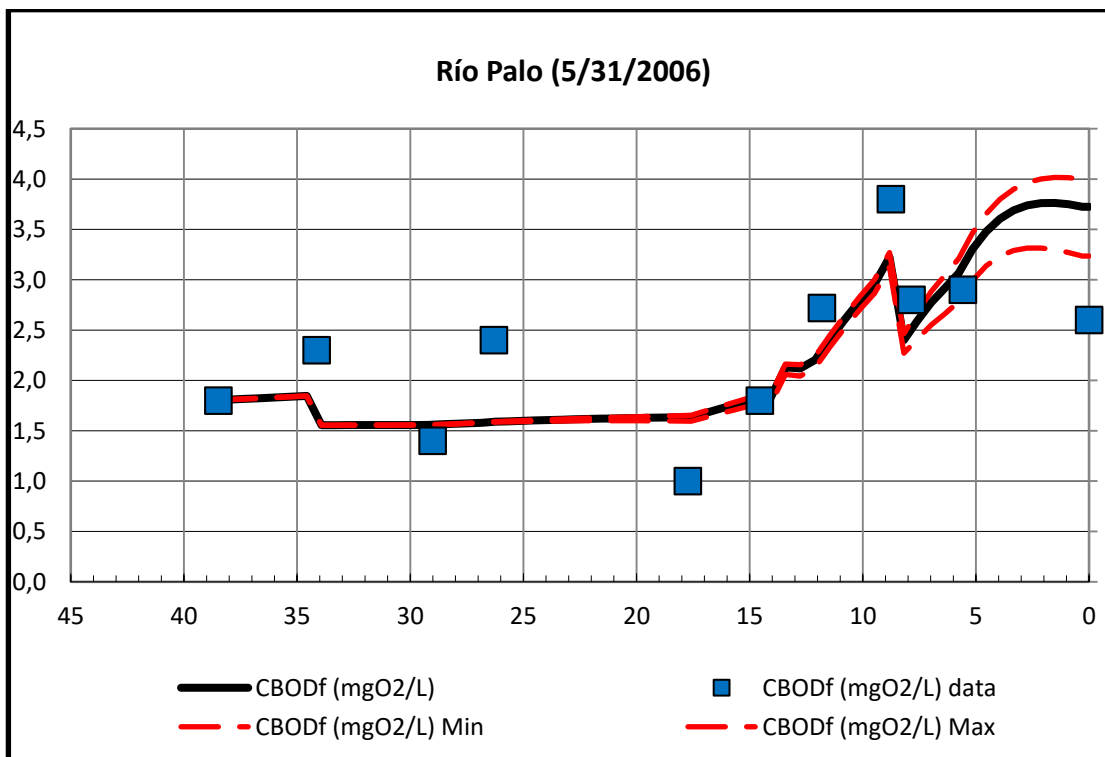
Gráfica 22: Temperatura simulada - Validación río Palo.



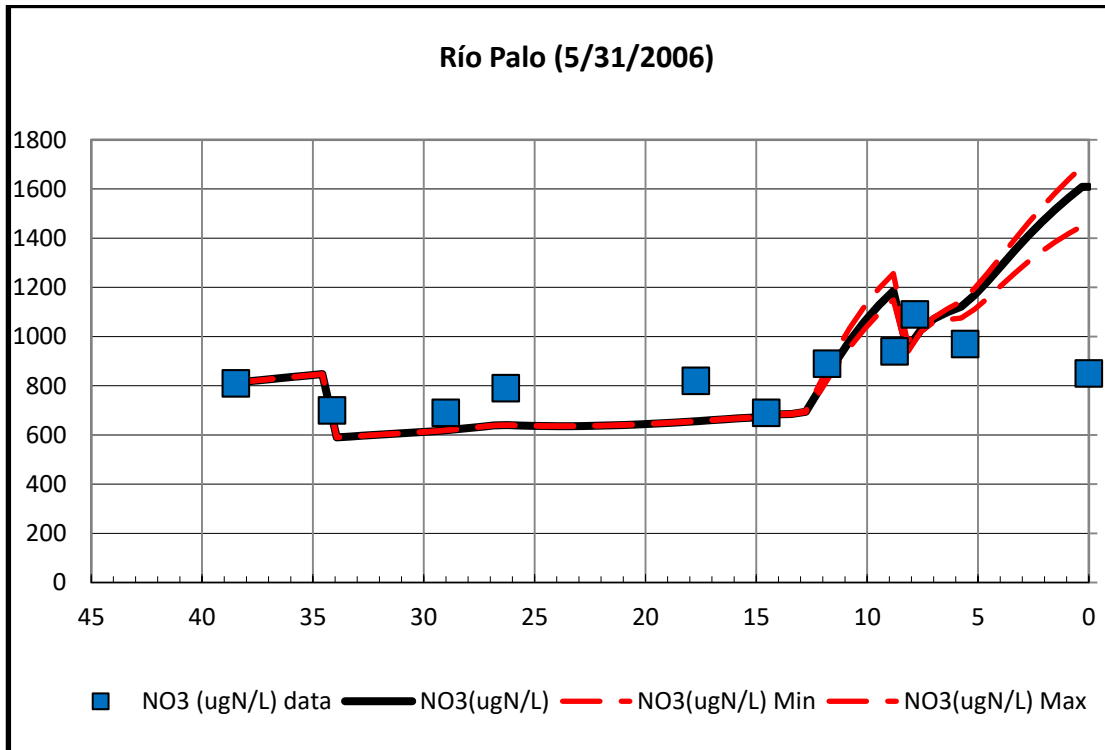
Gráfica 23: Oxígeno Disuelto simulado - Validación río Palo.



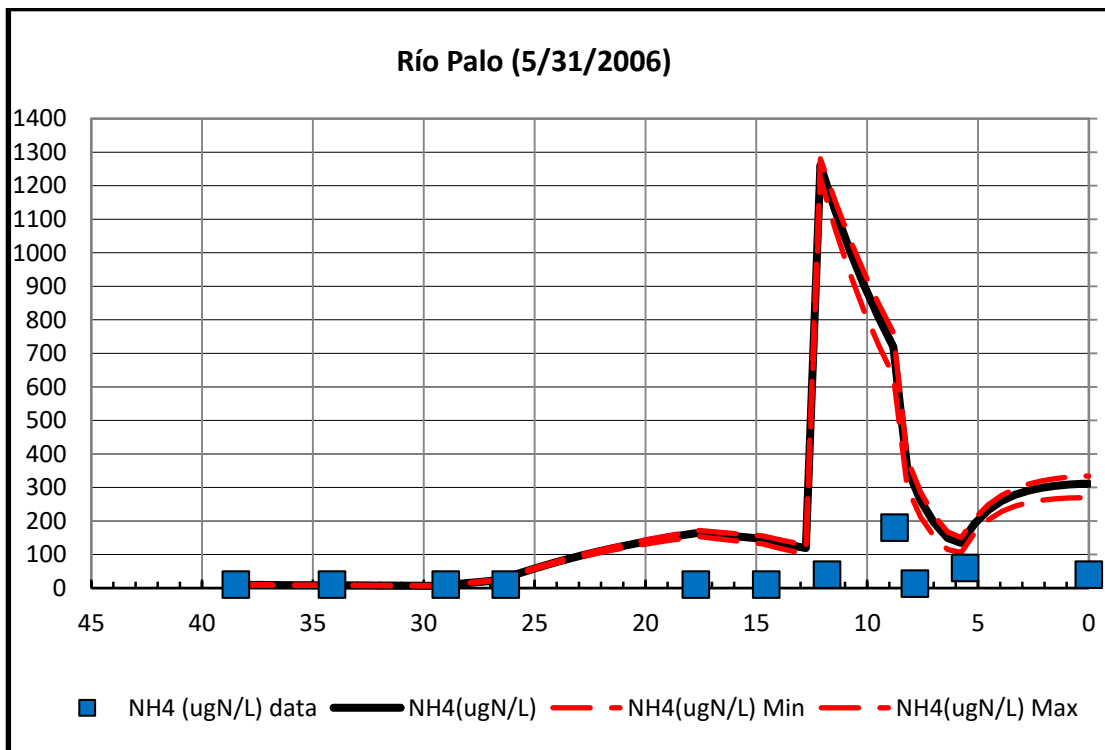
Gráfica 24: DBO simulada - Validación río Palo.



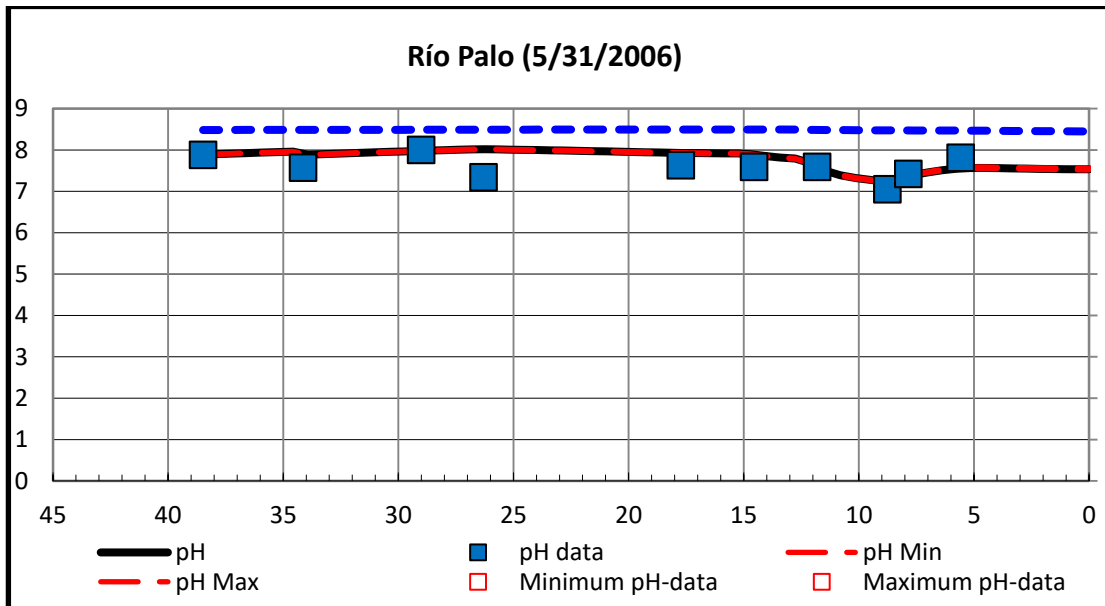
Gráfica 25: Nitrato simulado - Validación río Palo.



Gráfica 26: Amonio simulado - Validación río Palo.

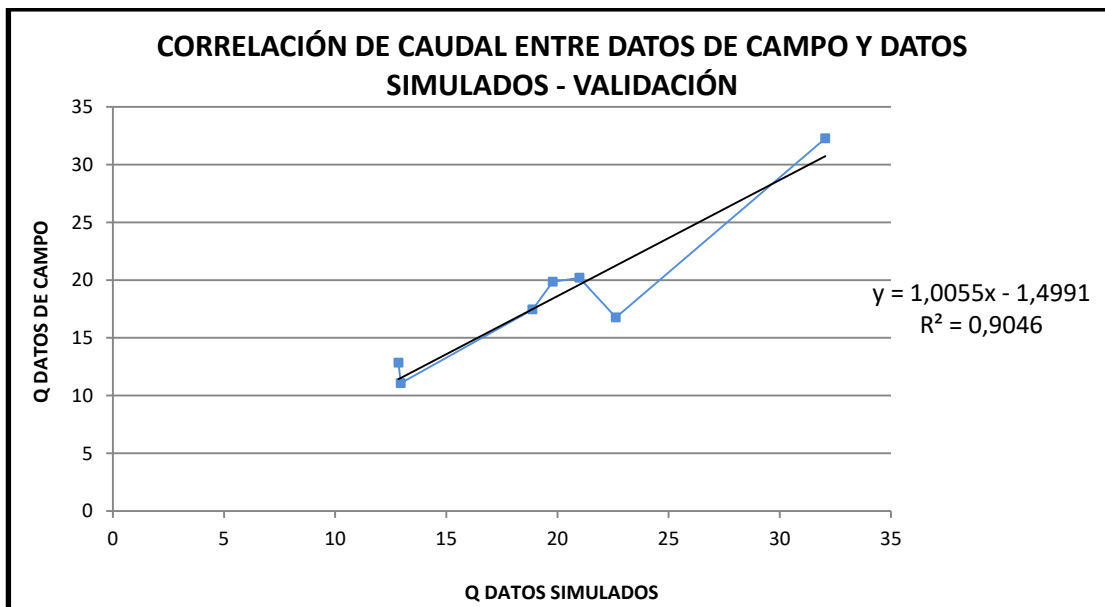


Gráfica 27: pH simulado - Validación río Palo.

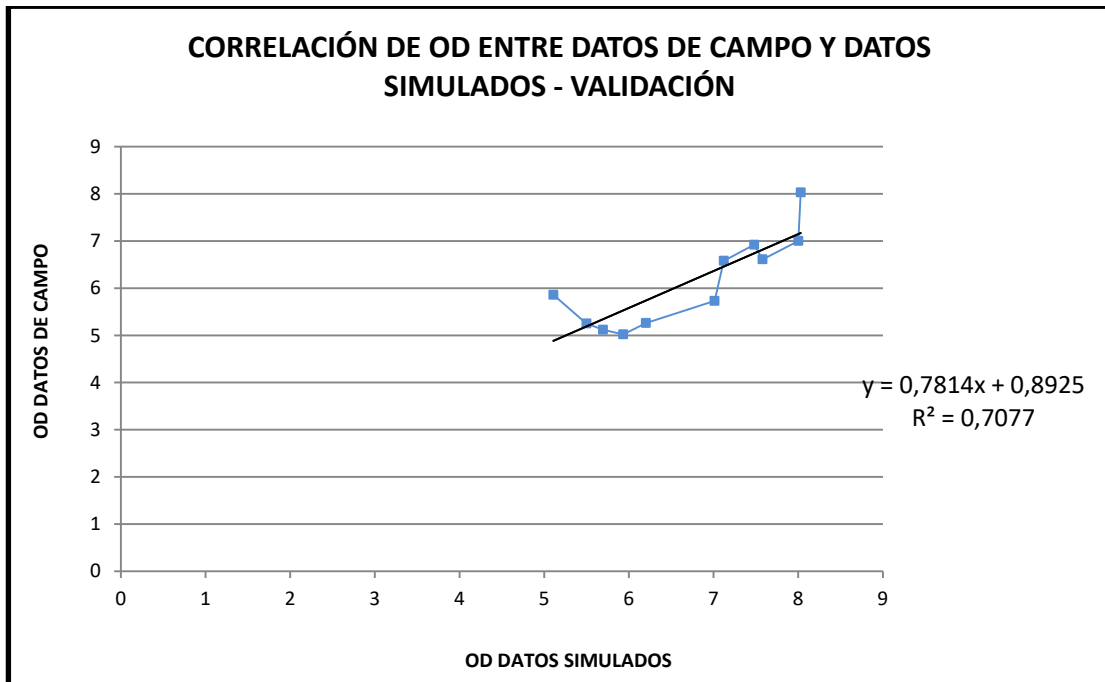


En las Gráficas 28, 29 y 30, se presenta la correlación para los parámetros de Caudal, Oxígeno Disuelto y DBO_u respectivamente, en las cuales, mediante el coeficiente de correlación se muestra el grado de ajuste obtenido de la etapa de validación para el río Palo, teniendo que para los parámetros anteriormente nombrados, los resultados del coeficiente se presentan por encima de 0.65, lo cual indica un ajuste positivo de la implementación de de esta etapa, teniendo en consideración que a mayor proximidad a 1 se tiene una relación directa positiva.

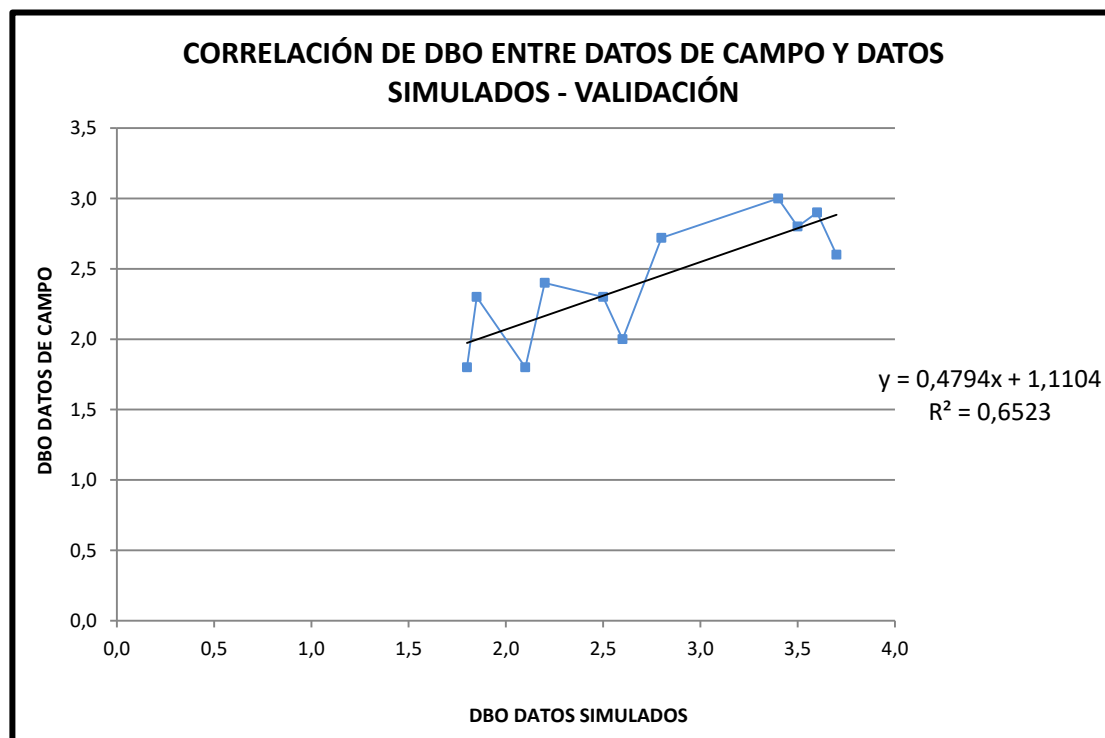
Gráfica 28: Correlación de caudal entre datos de campo y datos simulados - validación



Gráfica 29: Correlación de OD entre datos de campo y datos simulados - validación



Gráfica 30: Correlación de DBO_u entre datos de campo y datos simulados - validación



6. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA PARTE BAJA PARA EL RÍO PAILA A TRAVÉS DEL MODELO Q2K.

Con el propósito de realizar la implementación del modelo de calidad de aguas Qual2K para la modelación del tributario río Paila y su posterior integración con el modelo existente para el río Palo, se realizó una visita de reconocimiento a la zona de estudio el día 19 de febrero de 2008.

Mediante un recorrido de la zona objeto de estudio, se procedió a identificar los posibles sitios para la ubicación de las diferentes estaciones de muestreo a lo largo del río para la recolección de información hidráulica y de calidad de aguas tendientes a satisfacer los requerimientos de información necesarios para la implementación del modelo Qual2K.

La localización de las estaciones de muestreo es un factor clave que puede determinar la validez de la información que se pretende inferir, a través del análisis de las muestras colectadas en la misma. Pueden definirse tres niveles en el proceso de selección de las estaciones de monitoreo y puntos de toma de muestras, a saber:

Debe existir un criterio técnico consensuado por todos los interesados en los usos prioritarios (por ejemplo los encargados de zonas recreacionales, plantas potabilizadoras de agua, agricultores, etc.), respecto a la escala de mapas a emplear para esta selección y para definir cuando un tributario es relevante por su aporte ya sea desde el punto de vista hidráulico y/o de flujo másico de un contaminante en particular, es decir, cuando un tributario es capaz de elevar la jerarquía de curso receptor por el caudal vertido, carga orgánica por ejemplo en DBO_u , tóxicos, o por su incidencia bacteriológica.

Los factores y criterios para la ubicación de sitios de muestreo en cuerpos de agua superficial se pueden agrupar en²¹:

- ❖ Factores Fundamentales o Estructurantes: son los que determinan el por qué y el para qué de la localización del sitio, e involucran aspectos tales como: condiciones de referencia, principales vertimientos, confluencia con ríos principales, políticas relacionadas con el recurso hídrico, zonas de desarrollo industrial y urbano existentes y potenciales, bocatomas de acueductos y distritos de riego, entre otros.
- ❖ Factores Condicionantes: son los que se refieren a las limitaciones propias de cada localización, que tienen que ver con: dificultad de acceso, seguridad de los equipos y del personal, infraestructura existente, características hidráulicas de la sección y tramo, cercanía a estaciones hidrológicas existentes, facilidad para realizar actividades hidrométricas y facilidad para la recolección de muestras, entre otros.
- ❖ Factores Limitantes: son los que se refieren al presupuesto y al equipo de medición (capacidad, precisión, requerimientos de instalación, operación y mantenimiento), entre otros.

²¹ Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM - 2004

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

De igual manera, un factor decisivo y restrictivo para la determinación de los puntos de muestreo fue el presupuesto asignado para la realización del proyecto, lo cual implicó establecer criterios muy selectivos tanto para ubicación de los puntos de muestreo como para los parámetros a medir, de esta manera, se tuvieron en cuenta los siguientes elementos:

- ❖ Que en el punto exista una buena mezcla del flujo.
- ❖ Que las características morfológicas del cauce sean representativas del tramo.
- ❖ Que el acceso y la extracción de las muestras sean fáciles.
- ❖ Que sea seguro para el personal y para los equipos.
- ❖ Que tenga la suficiente profundidad para permitir sumergir completamente el recipiente para la toma de las muestras.
- ❖ Que esté libre de sólidos gruesos flotantes o espuma.

La georeferenciación de las estaciones de muestreo seleccionadas para monitorear en el presente estudio se relaciona a continuación en la Tabla 13:

Tabla 13: Puntos de muestreo sobre el río Paila.

Punto (Nº)	Nombre del Punto (descripción)	N	W	Altitud (m)
1	Puente de Corinto sobre el río, vía a Miranda.	03°10'49,0"	76°15'36,9"	1080
2	Vereda Paila, al lado de la vía. Vía Corinto-Padilla (a 10 Km. del Punto 1 Aprox.).	03°11'27,4"	76°18'12,6"	1033
3	Puente vía Corinto-Padilla (a 3 Km. del Punto 2).	03°12'08,0"	76°19'06,3"	1025
4	Puente Ingenio La Cabaña vía a Potrero Verde. Vía Padilla-Puerto Tejada desvío vereda Holanda a 500 metros aprox., vía destapada hacia el puente del Ingenio La Cabaña.	03°13'02,6"	76°20'26,3"	1016
5	Puente sobre el río Paila, Variante vía Ingenio del Cauca (a 7 km del Punto 4).	03°13'44,9"	76°24'26,6"	997
6	100 metros antes de la desembocadura del Paila en Palo, en Puerto Tejada (gradas en concreto a la orilla).	03°13'47,9"	76°25'18,0"	989
7	Puente sobre el río Palo, después de Puerto Tejada (Estación Hidrométrica IDEAM) – Punto de enlace de las corrientes para integración de la modelación.	ND	ND	ND

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

En el anexo 3 se presenta un registro fotográfico de los puntos preseleccionados.

Una vez definidas las estaciones de muestreo, se efectuaron dos jornadas de campo tendientes a obtener la caracterización hidráulica del río Paila en las diferentes estaciones seleccionadas. Estas jornadas fueron llevadas a cabo los días 7 y 14 de Julio de 2008.

El objetivo de estas jornadas fue recolectar la información preliminar para realizar la simulación hidrodinámica del río y estimar los tiempos de viaje de la masa de agua para la planeación y posterior realización de la jornada de campo para la obtención de los datos de calidad del agua del río, lo cual se presenta en la Tabla 14:

Tabla 14: Constantes Preliminares del Modelo Hidráulico “Rating Curves” para el río Paila.

Estación No.	Nombre (Descripción)	U _{media} (m/s)	H _{media} (m)	Q _{medio} (m ³ /s)	U = a*Q ^b		H = α*Q ^β	
					a	B	α	β
1	Puente de Corinto sobre el río, vía a Miranda.	0.985	0.281	4.940	0.477	0.454	0.137	0.452
2	Vereda Paila, al lado de la vía. Vía Corinto-Padilla	1.263	0.280	6.270	0.495	0.511	0.123	0.447
3	Puente vía Corinto-Padilla	1.633	0.253	7.090	0.541	0.564	0.108	0.436
4	Puente Ingenio La Cabaña vía a Potrero verde. Vía Padilla-Puerto Tejada desvío vereda Holanda a 500 metros aprox., vía destapada hacia el puente del ingenio la cabaña.	1.464	0.554	7.480	0.504	0.530	0.217	0.465
5	Puente sobre el río Paila, Variante vía Ingenio del Cauca	0.702	0.956	11.332	0.257	0.414	0.284	0.500
6	100 metros antes del desemboque del Paila en Palo, en Puerto Tejada (gradas en concreto a la orilla).	0.814	0.897	9.880	0.326	0.400	0.285	0.500

Con estos resultados y con la información disponible se procedió a alimentar el modelo Qual2K para realizar la modelación hidráulica preliminar con el propósito de obtener los tiempos de viaje estimados de la masa de agua, esto con el fin de realizar la planificación de la campaña de monitoreo definitiva del río Paila.

A continuación se presentan los resultados de la implementación de los datos obtenidos en las jornadas de campo realizadas para la determinación de las características hidráulicas de la Zona de estudio del río Paila. Los resultados producidos por el modelo se presentan en la Tabla 15 y Gráfica 31, mostradas a continuación.

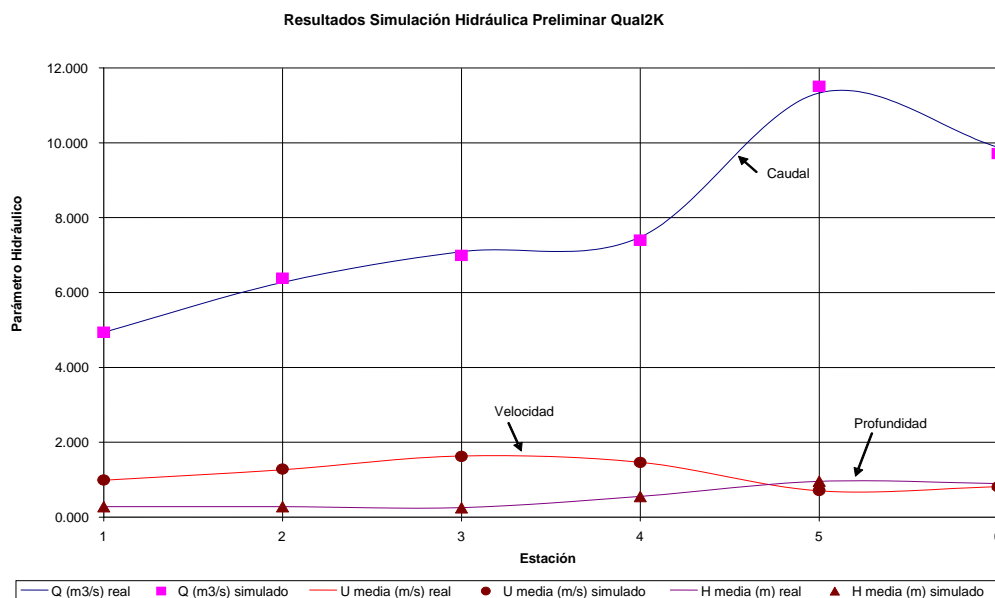
**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

Tabla 15: Resultados de la modelación hidráulica preliminar para el río Paila.

Estación N°	Descripción del Estación	Q (m³/s)		U media (m/s)		H media (m)	
		real	simulado	real	simulado	real	simulado
1	Puente de Corinto sobre el río, vía a Miranda.	4.940	4.940	0.985	0.990	0.281	0.280
2	Vereda Paila, al lado de la vía. Vía Corinto-Padilla	6.270	6.380	1.263	1.280	0.280	0.280
3	Puente vía Corinto-Padilla	7.090	6.990	1.633	1.620	0.253	0.250
4	Puente Ingenio La Cabaña vía a Potrero verde. Vía Padilla-Puerto Tejada desvío vereda Holanda a 500 metros aprox., vía destapada hacia el puente del ingenio la cabaña.	7.480	7.400	1.464	1.460	0.554	0.550
5	Puente sobre el río Paila, Variante vía Ingenio del Cauca	11.332	11.510	0.702	0.710	0.956	0.960
6	100 metros antes del desemboque del Paila en Palo, en Puerto Tejada (gradas en concreto a la orilla).	9.880	9.710	0.814	0.810	0.897	0.890

Como puede observarse, se obtuvo un grado de ajuste bueno entre los valores reales y los valores simulados del mismo.

Gráfica 31: Resultados simulación hidráulica preliminar QUAL2K



Estos resultados permiten realizar la estimación de los tiempos de viaje de la masa de agua, los cuales fueron utilizados con el objetivo de definir la planificación de la jornada de campo, con el fin de efectuar el muestreo para obtener los parámetros fisicoquímicos que servirán de entrada para la implementación del modelo Qual2K al río Paila.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 16, adicionalmente, se presenta un ejercicio para indicar los tiempos en los cuales deberían ser tomadas las muestras y los parámetros de campo de acuerdo a tales resultados.

Tabla 16: Estimación del Tiempo de viaje de la masa de agua para el río Paila.

Estación No.	Longitud del Tramo (km)	Distancia Acumulada (km)	Tiempo de Viaje Diferencial		Tiempo de Viaje Acumulado		Ejemplo Iniciando a:
			(min)	(h)	(min)	(h)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	09:00 a.m.
2	5.98	5.98	82.97	1.38	82.97	1.38	10:23 a.m.
3	2.41	8.39	25.30	0.42	108.27	1.80	10:48 a.m.
4	3.40	11.79	39.30	0.65	147.57	2.46	11:28 a.m.
5	13.82	25.61	376.60	6.28	524.17	8.74	05:44 p.m.
6	2.29	27.90	45.81	0.76	569.98	9.50	06:30 p.m.

Una vez determinada esta información se procedió a planificar la jornada de campo tendiente a medir los parámetros hidráulicos *In situ*, y recolectar las diferentes muestras de agua para realizar los análisis de laboratorio y determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas tanto en las estaciones de muestreo en el río como en los principales tributarios y vertimientos sobre el río Paila. En la Tabla 17 se relacionan los parámetros evaluados.

Tabla 17: Parámetros fisicoquímicos evaluados en el río Paila.

<ul style="list-style-type: none"> • Cloruros Cl⁻ • Coliformes fecales • Coliformes totales • Conductividad • DBO₅ • DBO_U • DQO • Fósforo inorgánico (P – PO₄) • Amoníaco (N – NH₃) • Amonio (N – NH₄⁺) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos (N – NO₃) • ORP • Oxígeno disuelto • pH • Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto • Salinidad • Sólidos Disueltos Totales • Temperatura • Turbiedad
--	--

En las Tabla 18 que se muestran a continuación, se relacionan los datos hidráulicos para las diferentes estaciones sobre el río Paila. En esta jornada también se incluyeron los principales tributarios del río, así como una estación sobre el río Palo para facilitar el proceso de integración posterior de los modelos de los ríos Palo y Paila.

Cabe aclarar que la jornada de campo para adquirir la información requerida para alimentar el programa QUAL2K se llevó a cabo el día 13 de agosto de 2008, y correspondió a un periodo en el cual se presentó un ligero receso en la temporada de lluvias, con lo cual el caudal del río Paila presentaba un descenso significativo, mas sin embargo, no corresponde adecuadamente a un periodo de estiaje.

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Tabla 18: Resumen del aforo de caudales del río Paila.

Referencia de la Estación	Área Sección Transversal m ²	Perímetro Sección Transversal m	Caudal	
			m ³ /s	lps
Río Paila (sitio 1, puente Corinto)	3.47	23.13	1.50	1504
Río Paila (sitio 2, La Casita)	2.70	22.13	1.49	1486
Río Paila (sitio 3. Puente Padilla)	2.34	26.11	1.73	1726
Río Paila (sitio 4. puente Cabaña)	3.39	13.11	2.62	2622
Río Guengué	7.35	26.87	2.35	2347
Río Paila (sitio 5. puente vía Villa Rica)	8.25	24.52	4.87	4870
Río Paila (sitio 6. "Paso de la María". Pto Tejada)	7.54	20.47	3.44	3441
Río Palo (sitio 7. vía a Villa Rica. después de Propal)	20.97	47.68	9.96	9963

En la Tabla 19, se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados, los cuales corresponden a los reportes entregados por los laboratorios de la CRC, Acueducto de Popayán y Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad de Cauca.

Tabla 19: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las Estaciones de muestreo del río Paila.

Parámetro	Unidad	Estación N°.						
		1	2	3	4	5	6	7
Conductividad	μS/cm	110.1	126.80	131.70	146	188.8	200	178.4
Temperatura	°C	21.3	25.4	27.5	28	26.4	26	24
pH	Unidad	7.4	6.97	7.1	6.93	6.9	7	7.1
OD	mg/l	7.82	8.04	7.87	6.58	6.51	6.62	6.71
OD	%	101.3	114.8	113.4	94.3	91.7	94.2	91.2
Turbiedad	NTU	2.40	2.60	2.90	6.80	7.80	9.60	8.40
ORP	mV	201.7	186.7	191.8	196.4	183.4	195.5	190.9
NH ₃	mg/l	0.001	0.001	0.002	0.005	0.008	0.009	0.008
NH ₄ ⁺	mg/l	0.253	0.297	0.343	0.382	0.626	0.852	0.770
NO ₃	mg/l	2.1	1.4	1.5	1.7	1.6	1.8	1.5
PO ₄ ³⁻	mg/l	0.07	0.08	0.08	0.12	0.13	0.15	0.09
Salinidad	%	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09	0.08
Cl ⁻	mg/l	1.64	1.69	1.57	1.84	1.63	1.89	2.25
TDS	mg/l	0.072	0.081	0.085	0.092	0.120	0.124	0.113
DBO ₅	mg/l	0.5	0.1	0.3	0.2	0.3	0.5	0.9
DBOu	mg/l	0.73	0.15	0.44	0.29	0.44	0.73	1.32
DQO	mg/l	11.50	14.20	11.50	8.50	8.80	8.90	10.10
Col. Fecales	NMP/100ml	414	1334	3441	3448	4884	8664	7701
Col. Totales	NMP/100ml	12997	19863	12997	241960	241960	241960	241960

Teniendo en cuenta las mediciones hidráulicas de la campaña preliminar y de esta segunda campaña de calidad, se efectuó la determinación de un nuevo conjunto de constantes hidrométricas a ser usadas en el modelo hidráulico "Rating Curves" para

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

obtener una mejor representación de las condiciones de flujo. La Tabla 20, muestra este nuevo conjunto de valores.

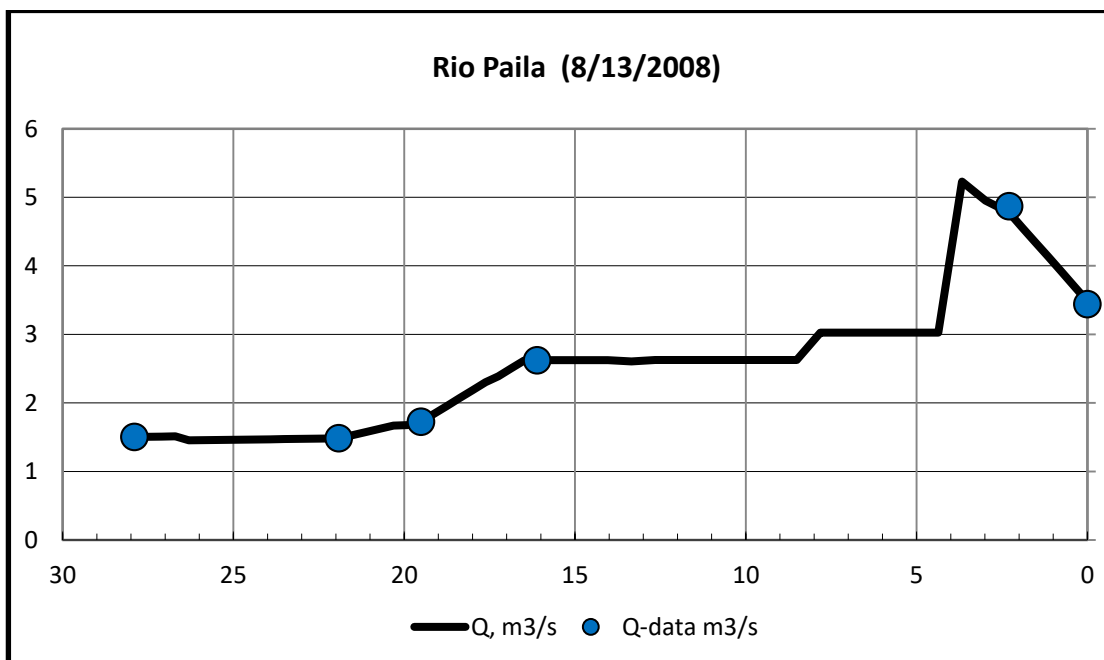
Tabla 20: Constantes hidrométricas para el río Paila.

Tramo No.	Velocidad		Profundidad	
	Coefficiente	Exponente	Coefficiente	Exponente
1	0.4376	0.577	0.2119	0.152
2	0.5440	0.561	0.1446	0.286
3	0.4307	0.608	0.3406	0.242
4	0.4280	0.204	0.2055	0.633
5	0.2313	0.549	0.4136	0.338

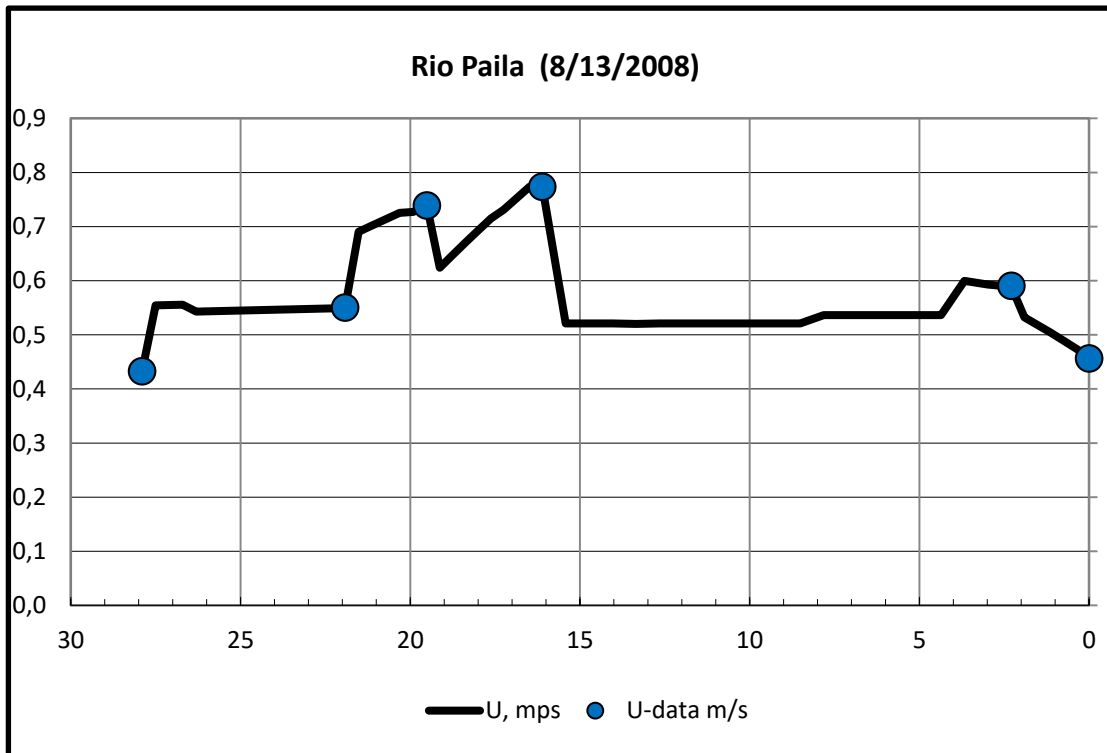
Siguiendo con el procedimiento descrito en la sección de calibración del modelo Qual2K para el río Palo, se efectuó la implementación y calibración de este modelo para el río Paila. Es de resaltar que debido a que el propósito es realizar la integración de los dos ríos modelados fue necesario conservar algunas de las condiciones establecidas para el río Palo puesto que el modelo no permite definir las de manera independiente, produciéndose, en consecuencia un grado de ajuste menor. Un ejemplo de esta situación es la modelación del oxígeno disuelto, para la cual fue necesario especificar el modelo de O'Connor – Dobbins para ambos ríos. A continuación se muestran los resultados gráficos producidos por el modelo una vez terminado el proceso de calibración.

En las Gráficas 32, 33 y 34, se presenta los resultados obtenidos de la modelación en cuanto a los parámetros hidráulicos de caudal, velocidad y profundidad:

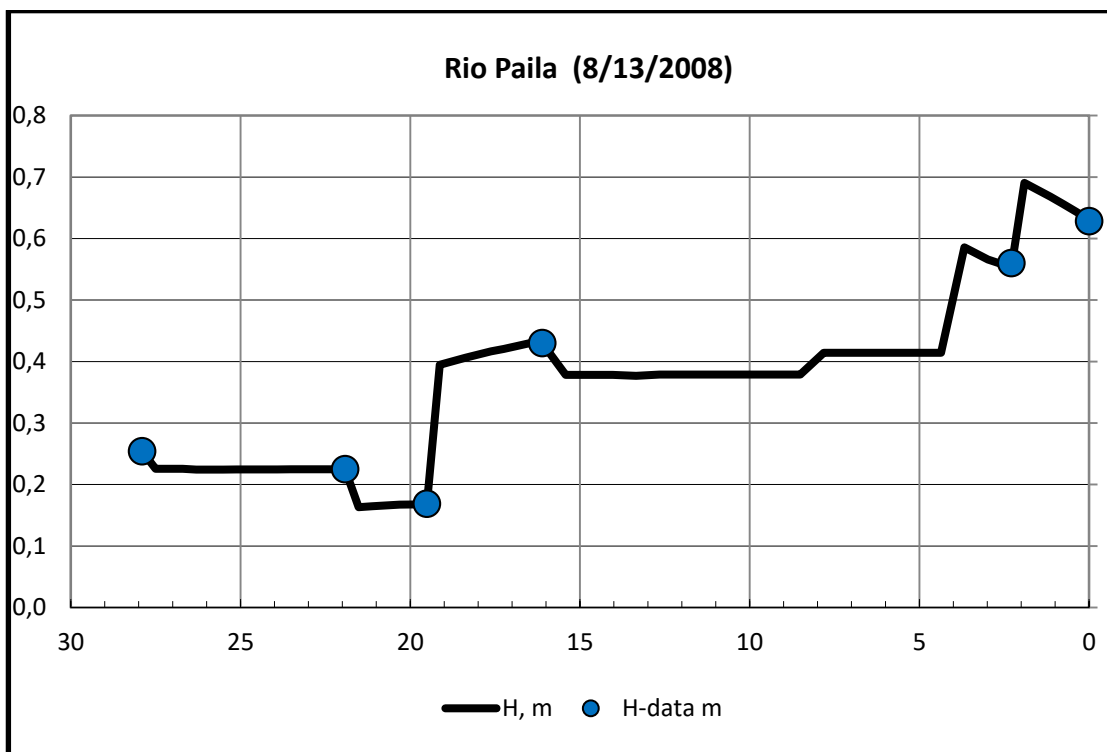
Gráfica 32: Caudal simulado - Calibración río Paila.



Gráfica 33: Velocidad simulada - Calibración río Paila.



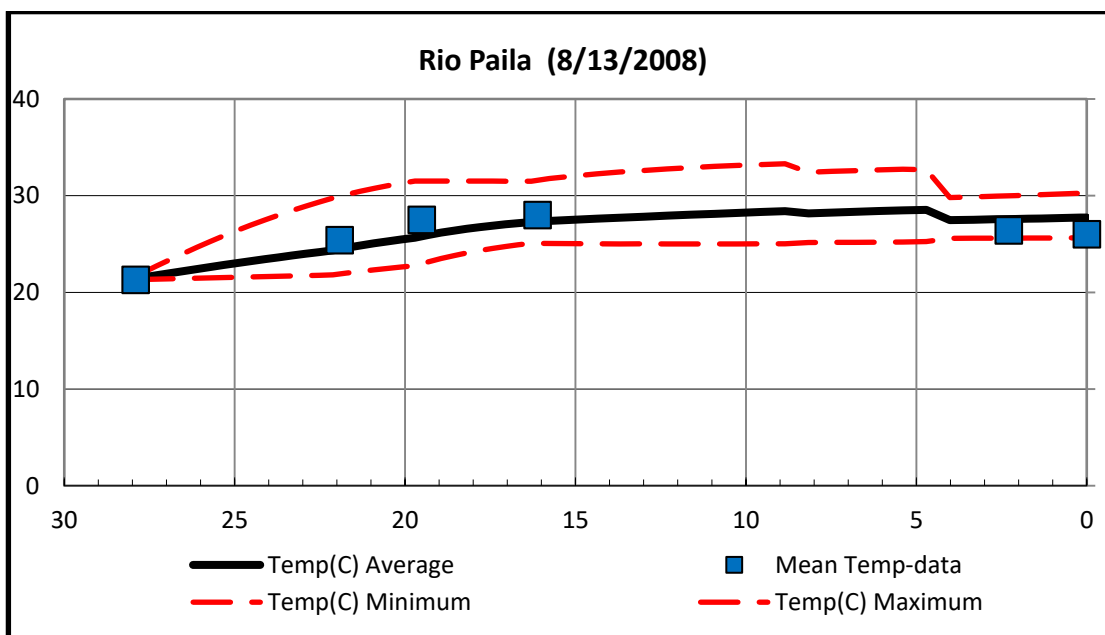
Gráfica 34: Profundidad simulada - Calibración río Paila.



Respecto a las gráficas correspondientes a los parámetros hidráulicos resultantes de la “corrida” del modelo QUAL2K, se puede concluir que se obtuvo un ajuste adecuado, el cual se logró mediante la incorporación de un caudal de 1,86 m³/s y la abstracción de un caudal 2.4 m³/s, distribuidos a lo largo de la corriente. Como se expresó anteriormente en los resultados de la calibración del modelo para el río Palo, es importante obtener un buen ajuste en este parámetro a fin de conseguir una adecuada calibración de los parámetros de velocidad, profundidad y modelos de reaeración.

La temperatura para el río Paila presenta un promedio de 25.77 °C, lo cual es característico de un agua superficial²², a continuación se presenta la Gráfica 35, correspondiente a este parámetro:

Gráfica 35: Temperatura simulada - Calibración río Paila.

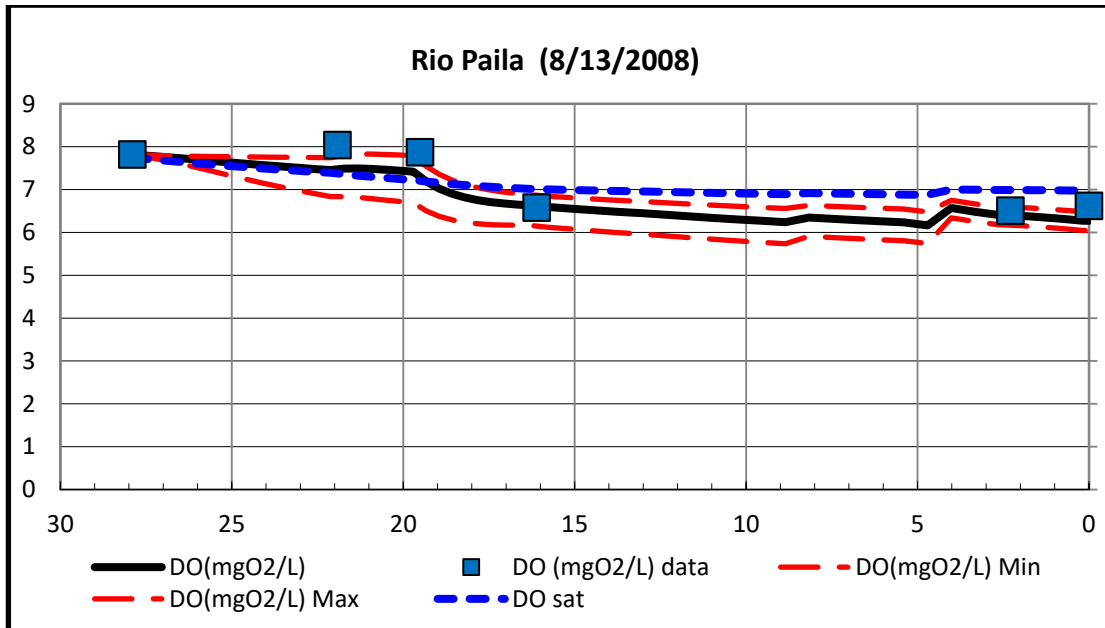


El oxígeno disuelto se ubica en todas las estaciones de muestreo por encima de 6 mg/l, lo cual es un indicador de un nivel óptimo para todos los organismos vivos presentes en el ecosistema²³. A continuación en la Gráfica 36, se presenta el resultado obtenido de la modelación de este parámetro:

²² <http://www.ideam.gov.co/indicadores>.

²³ Water Quality Assessments. A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. UNESCO – WHO – UNEP. - 1996.

Gráfica 36: Oxígeno Disuelto simulado - Calibración río Paila.



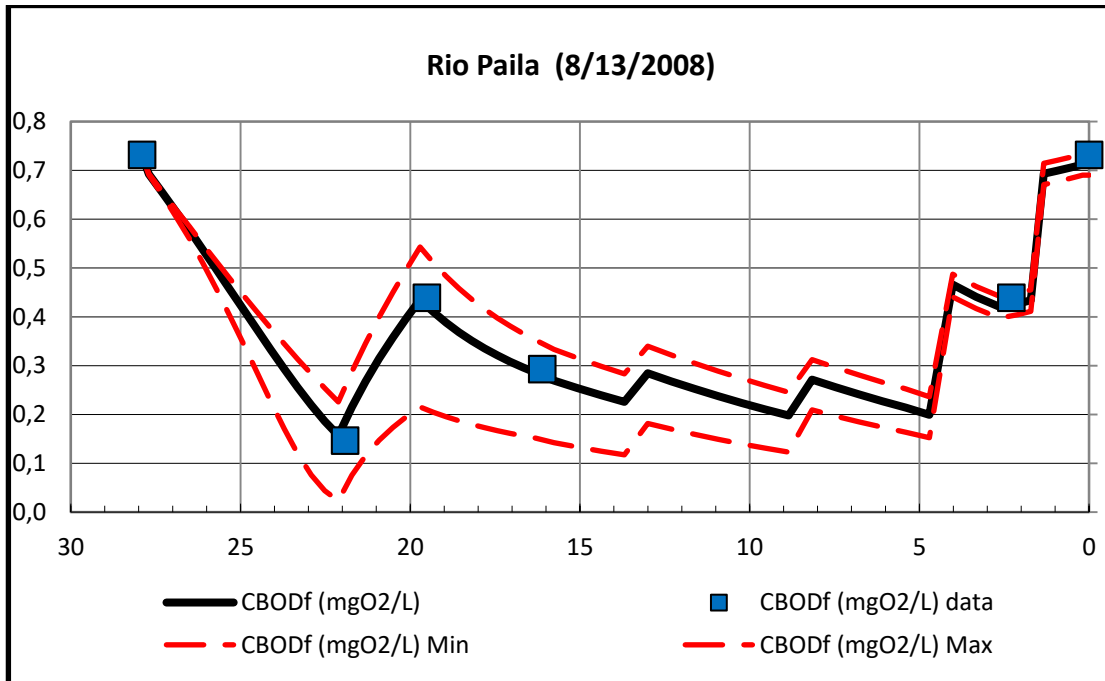
La DBO, es un bioensayo para el cual se admite cierta variabilidad debido a los múltiples factores que afectan su resultado, relacionados con la variación de las características de la fuente evaluada y con las fluctuaciones propias del proceso biológico involucrado en el ensayo. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater edición No. 18, presenta los resultados de la intercalibración de más de 100 laboratorios en el rango de 3,3 a 230 mg/l de DBO₅, en los cuales se indica que para cierto valor teórico de DBO, la desviación estándar del valor reportado puede ser estimada como:

$$\sigma = 0.100 (\text{Valor teórico de DBO}_5) + 0,547 \text{ mg/l}$$

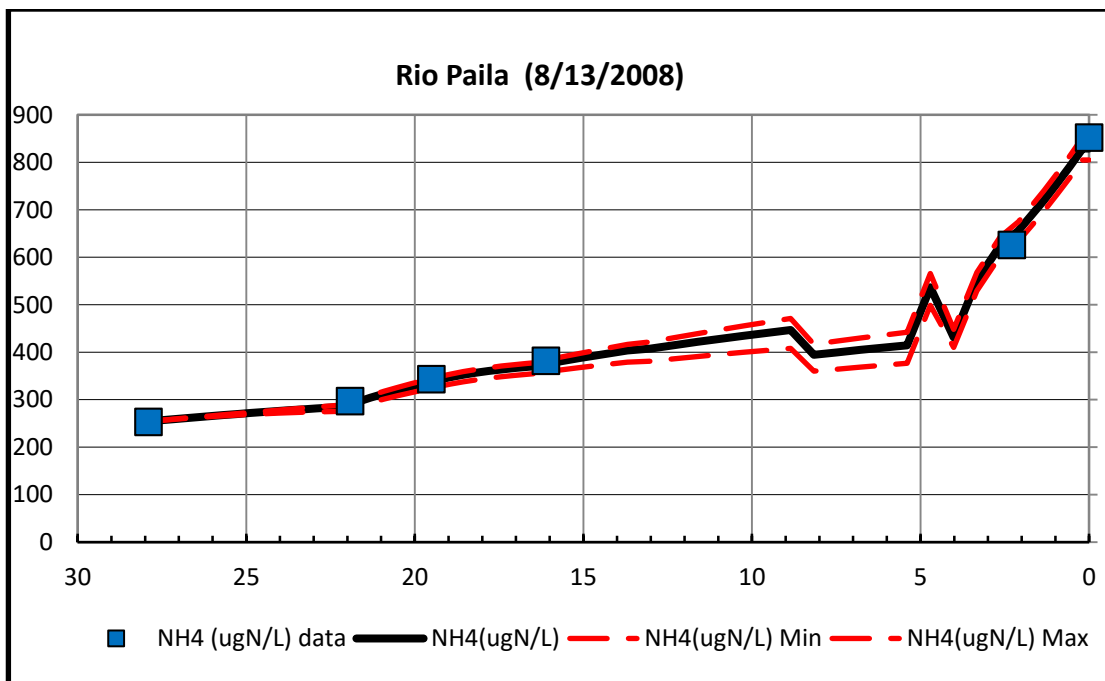
Para la simulación de la DBO₅ en cada fecha de muestreo, se admitió que el valor calculado por el modelo en los diferentes sitios, oscilara en $\pm 1,0 \sigma$ alrededor del valor observado. La desviación estándar se calcula de acuerdo con la ecuación presentada anteriormente.

Teniendo en cuenta el enunciado anterior y analizando los valores obtenidos de la prueba de DBO₅ para el río Paila (Tabla 19), se presenta que los datos de este parámetro se encuentran por debajo de 1 mg/l, adicionalmente, que el rango de valores es rango muy pequeño, lo cual incrementa la incertidumbre de los mismos, no obstante, se utilizaron para llevar a cabo la modelación, tal como puede observarse en la Gráfica 37, sin embargo se aclara que la simulación obtenida no representa las condiciones reales del río.

Gráfica 37: DBO_u simulada - Calibración río Paila.

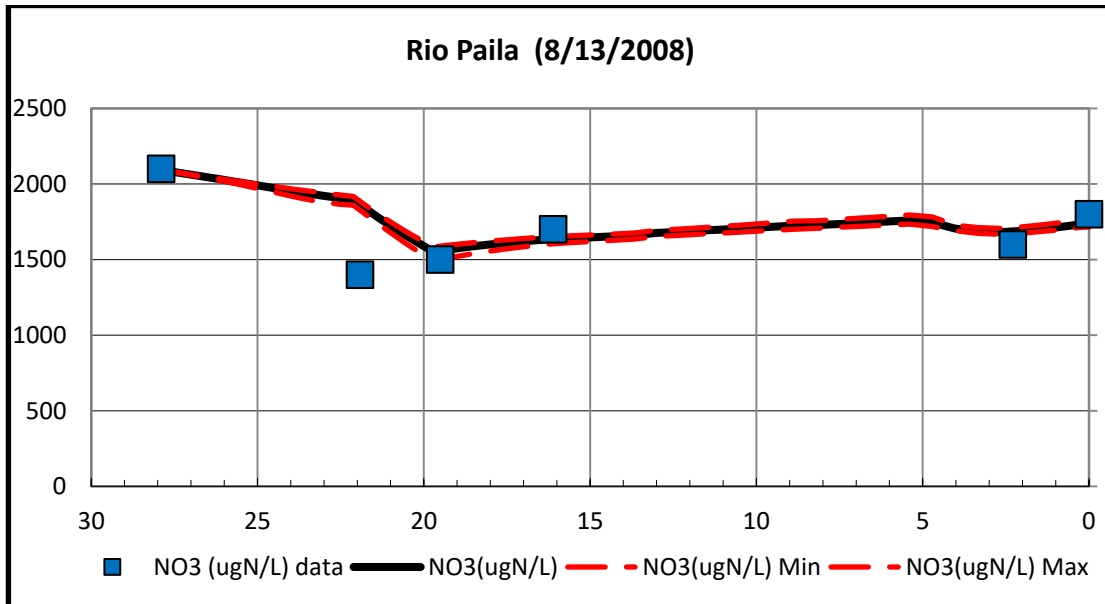


Gráfica 38: Amonio simulado - Calibración río Paila.



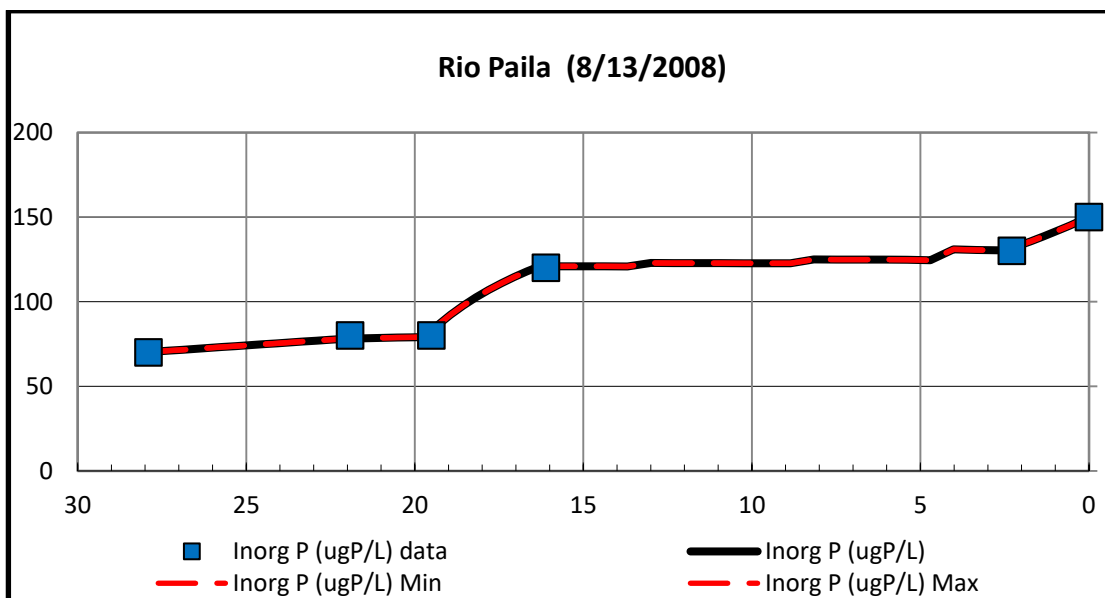
Los resultados obtenidos para el parámetro de nitrato presentado en la Gráfica 39, se ubican en un rango de valores menores a 2.1 mg/l lo cual indica una contaminación moderada por residuos tanto domésticos, agrícolas e industriales.

Gráfica 39: Nitrato simulado - Calibración río Paila.



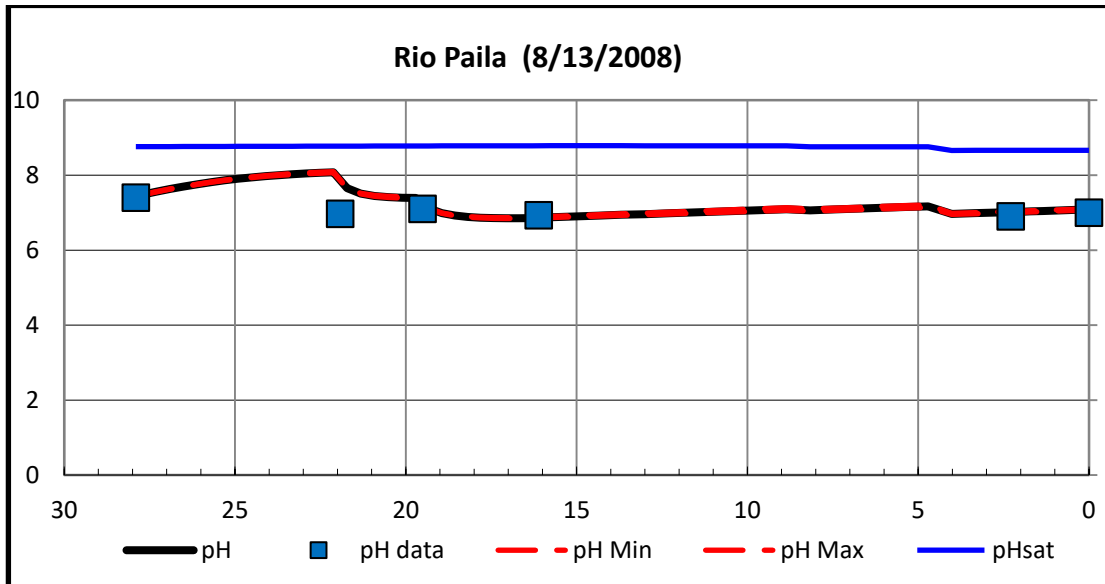
Al igual que el nitrógeno, el fósforo es un nutriente esencial para los organismos vivos y existe en los cuerpos de agua tanto en forma disuelta como particulada. Por lo general, es el nutriente limitante para el crecimiento de algas y, por tanto, controla la productividad primaria del río. El aumento de la concentración es debido a las actividades humanas, las cuales son la causa principal de la eutrofización. En la mayoría de las aguas superficiales naturales, el fósforo oscila entre 0,005 y 0,020 mg/l PO₄-P. El río Paila presenta valores de fósforo entre 0.08 y 0.16 mg/l, lo cual puede indicar la posible contaminación y en gran medida responsable de las condiciones eutróficas, lo cual se puede observar en la Gráfica 40.

Gráfica 40: Fósforo simulado - Calibración río Paila.



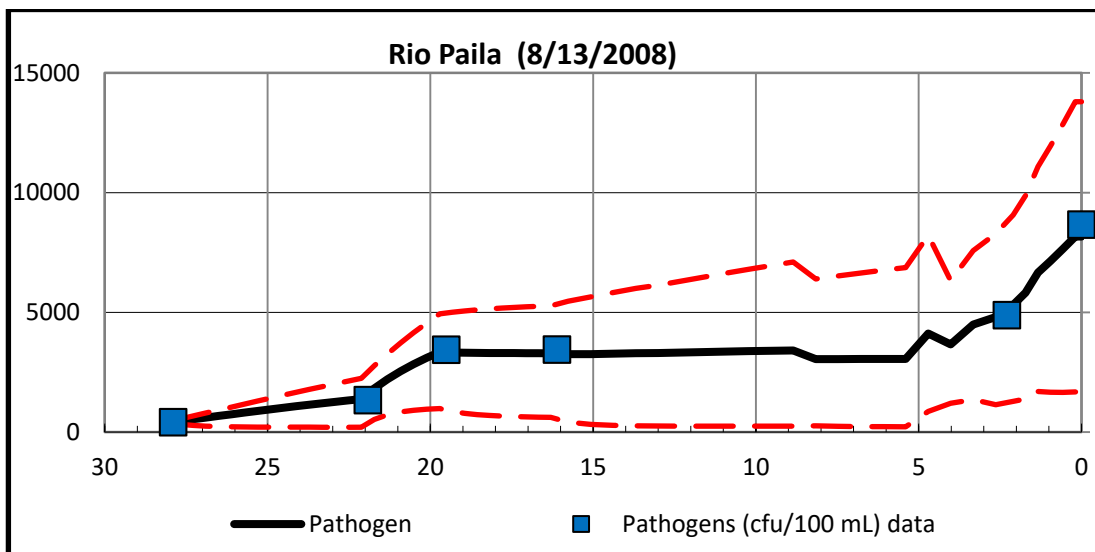
El pH presente en el río Paila oscila entre 6.93 y 7.4 con un promedio a lo largo del tramo de estudio de 7.05, lo cual indica que son aguas neutras, lo anterior se puede observar en la gráfica 41.

Gráfica 41: pH simulado - Calibración río Paila.



Los patógenos presentados en la Gráfica 42, son un indicador muy importante en la calidad del agua, ya que tiene grandes implicaciones sobre la salud humana, por tanto se tiene que el agua para consumo humano debe tener cero patógenos por cada 100 ml. Dado que de las aguas del río Paila se abastecen algunas comunidades del norte del departamento del Cauca, se debe realizar un tratamiento adecuado, ya que según los análisis de laboratorio el agua contiene presencia de agentes patógenos.

Gráfica 42: Patógenos simulado - Calibración río Paila.

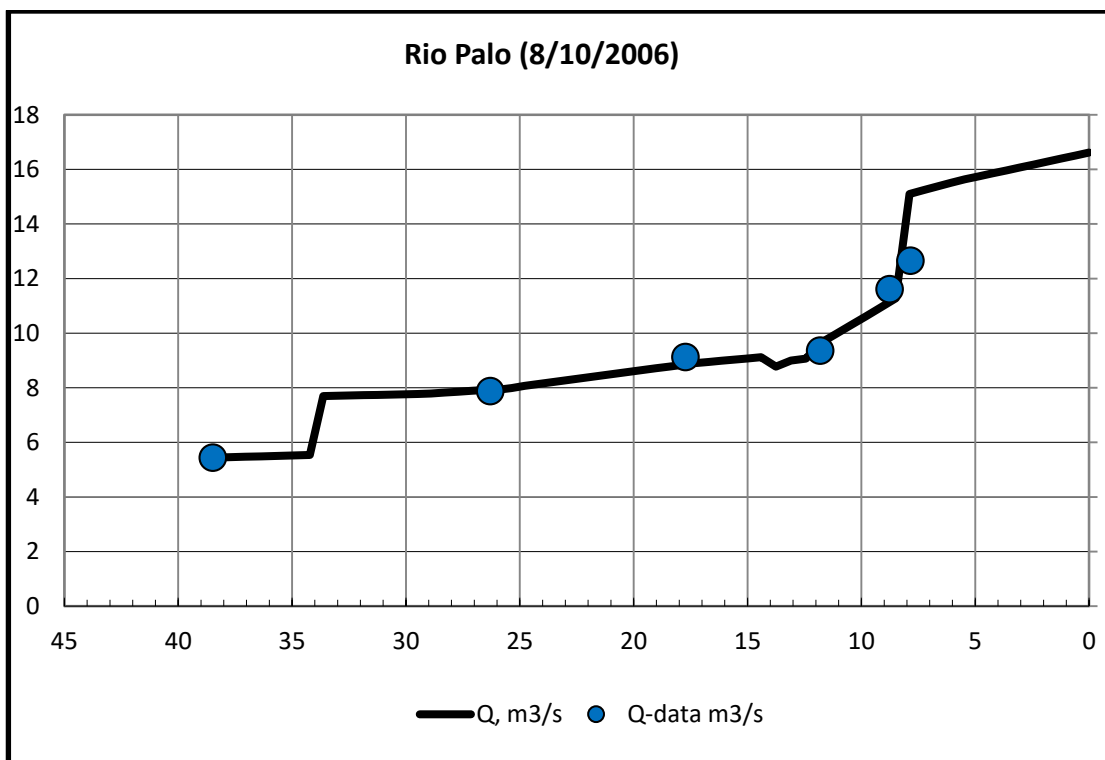


7. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS PARA LOS RÍOS PALO Y PAILA PARA LA FORMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AGUA

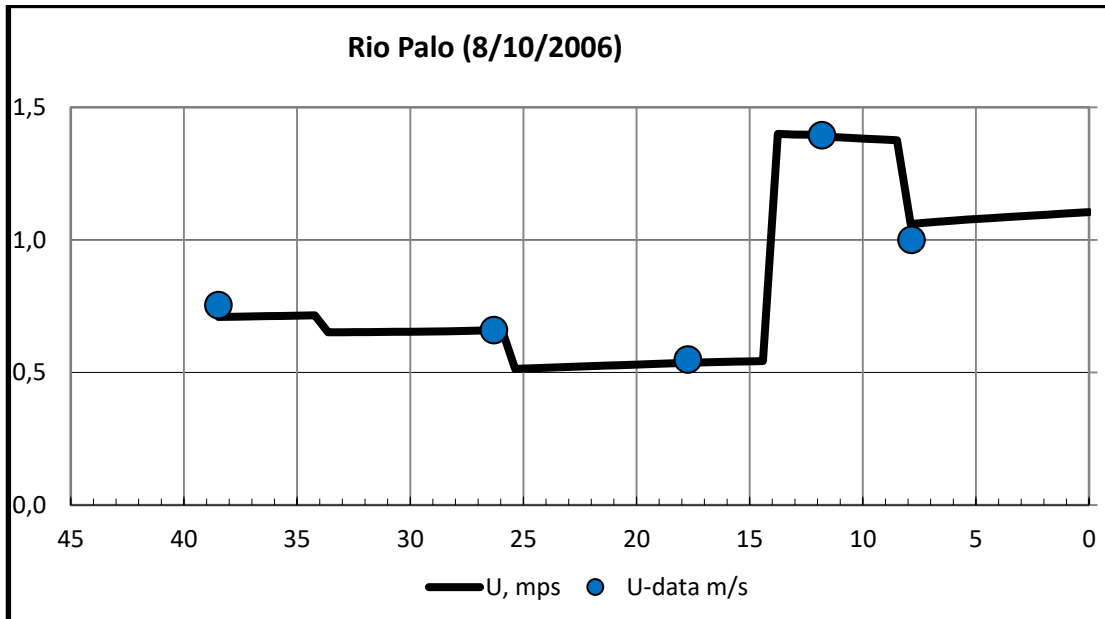
Con el propósito de realizar la formulación de escenarios de calidad del agua para el río Palo y su principal tributario el río Paila se procedió a efectuar la implementación del modelo calibrado y validado para el río Palo integrándolo con el modelo calibrado para el río Paila.

Respecto a los parámetros hidráulicos correspondientes a caudal, velocidad y profundidad presentados en las gráficas 43, 44 y 45 respectivamente, se muestra un ajuste adecuado de dichos parámetros, lo cual indica un buen ajuste de las calibraciones individuales de las dos corrientes objeto de estudio.

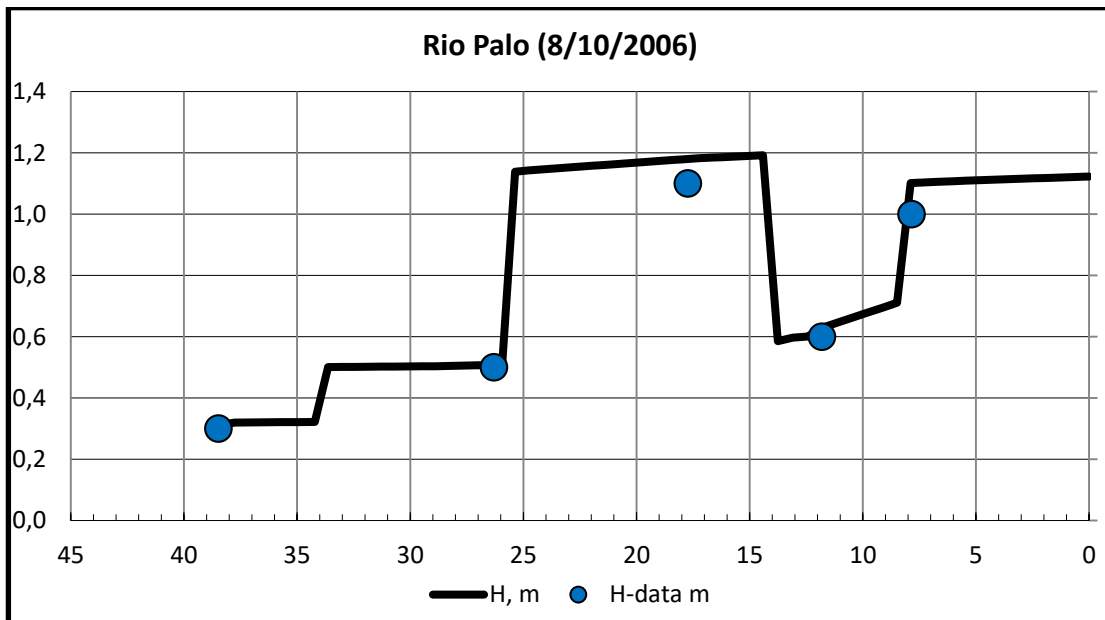
Gráfica 43: Caudal simulado - Integración ríos Palo y Paila.



Gráfica 44: Velocidad simulada - Integración ríos Palo y Paila.



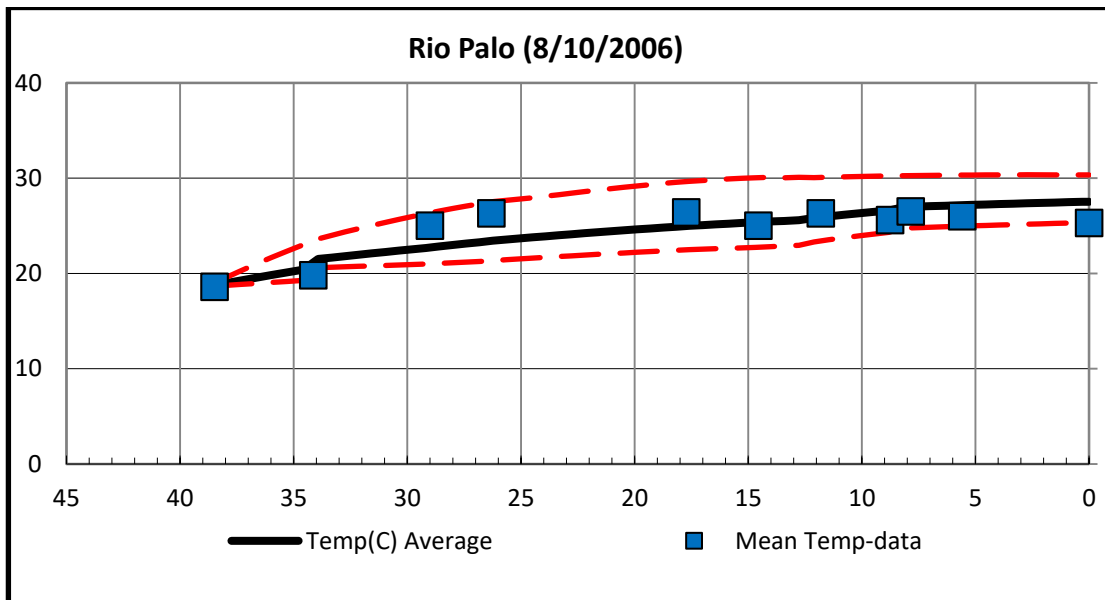
Gráfica 45: Profundidad simulada - Integración ríos Palo y Paila.



La temperatura resultante de la integración de los modelos del río Palo y Paila, presenta un promedio de 25.2 °C, lo cual es característico de las aguas superficiales; a continuación se presenta la Gráfica 46, en la cual se observa el comportamiento de este parámetro de gran influencia sobre los procesos físicos, químicos y biológicos²⁴.

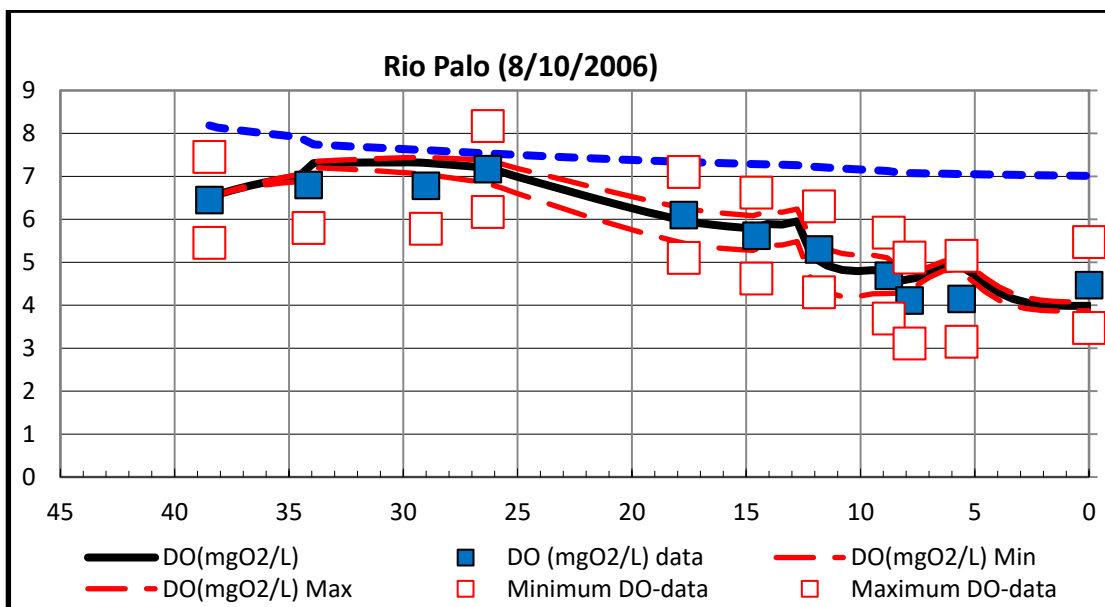
²⁴ <http://www.ideam.gov.co/indicadores>.

Gráfica 46: Temperatura simulada - Integración ríos Palo y Paila.

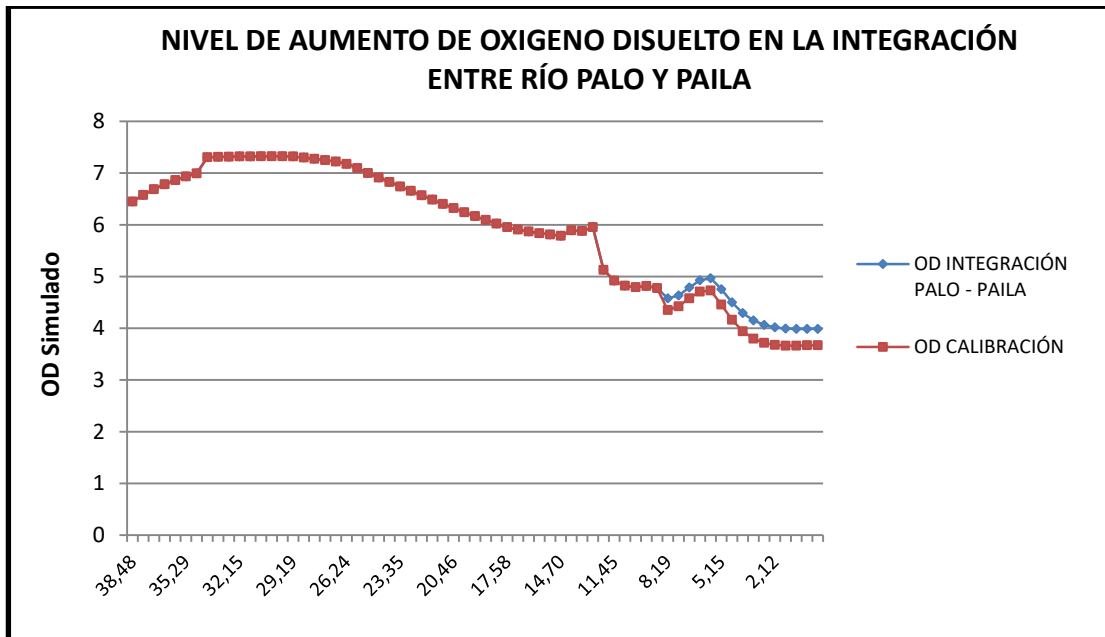


En las gráficas resultantes de la integración de los modelos calibrados para el río Palo y Paila se puede observar que los parámetros fisicoquímicos analizados presentan básicamente el mismo comportamiento que las gráficas presentadas para la calibración del río Palo, no obstante, se observa un mejoramiento de la calidad del agua del río Palo al incorporarse el río Paila; en la Gráfica 47 se presentan los resultados obtenidos para el parámetro de Oxígeno Disuelto y en la gráfica 48 se presenta el aumento de este al incorporarse el río Paila y como consecuencia de ello se presenta una disminución de la concentración de DBO_u , como se observa en la Gráfica 49 y 50:

Gráfica 47: Oxígeno Disuelto simulado - Integración ríos Palo y Paila.

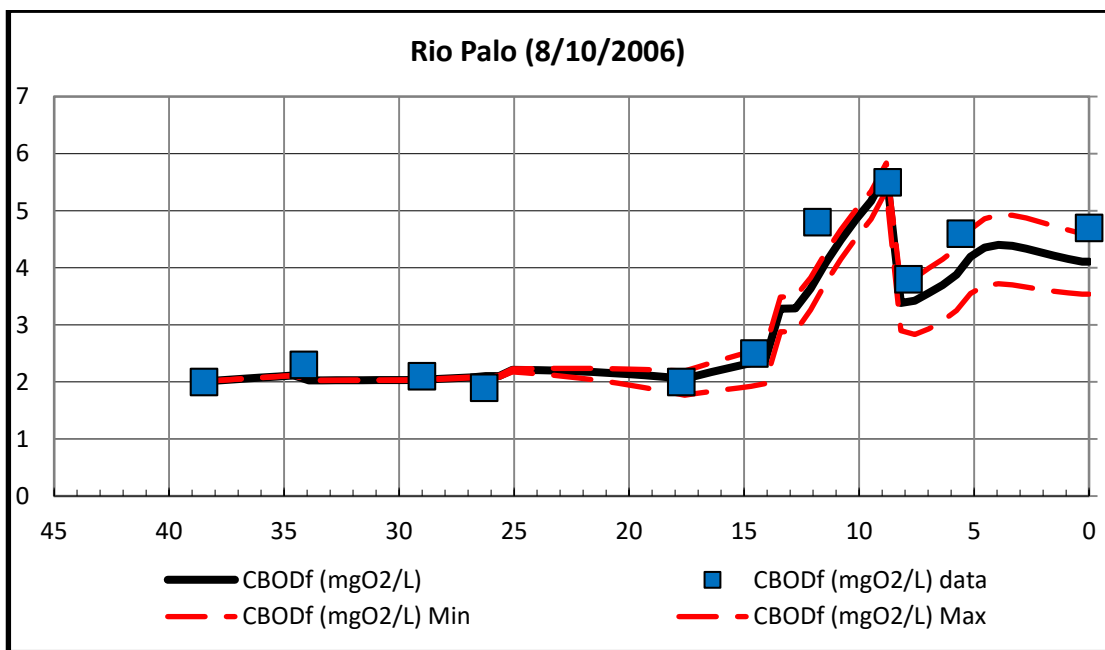


Gráfica 48: Nivel de aumento de oxígeno disuelto en la integración entre río Palo y Paila.

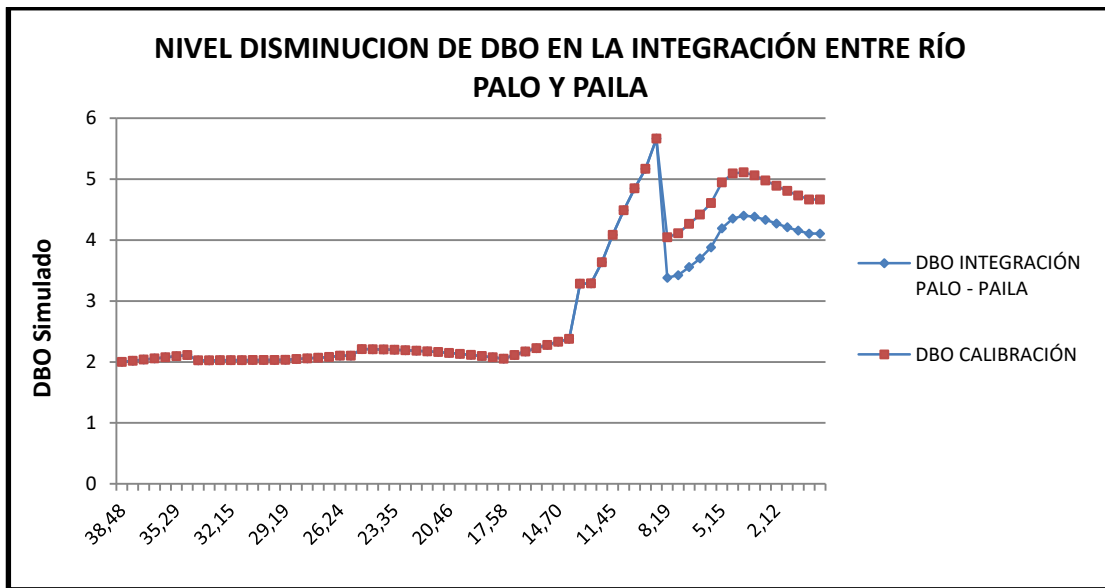


Como se observa en la Gráfica 48, a partir del kilómetro 8, sitio en el cual se incorpora el río Paila, se evidencia un aumento en el parámetro de Oxígeno Disuelto en un porcentaje que varía desde 4 a 8% a lo largo del recorrido del último tramo del río Palo.

Gráfica 49: DBO_u simulada - Integración ríos Palo y Paila.



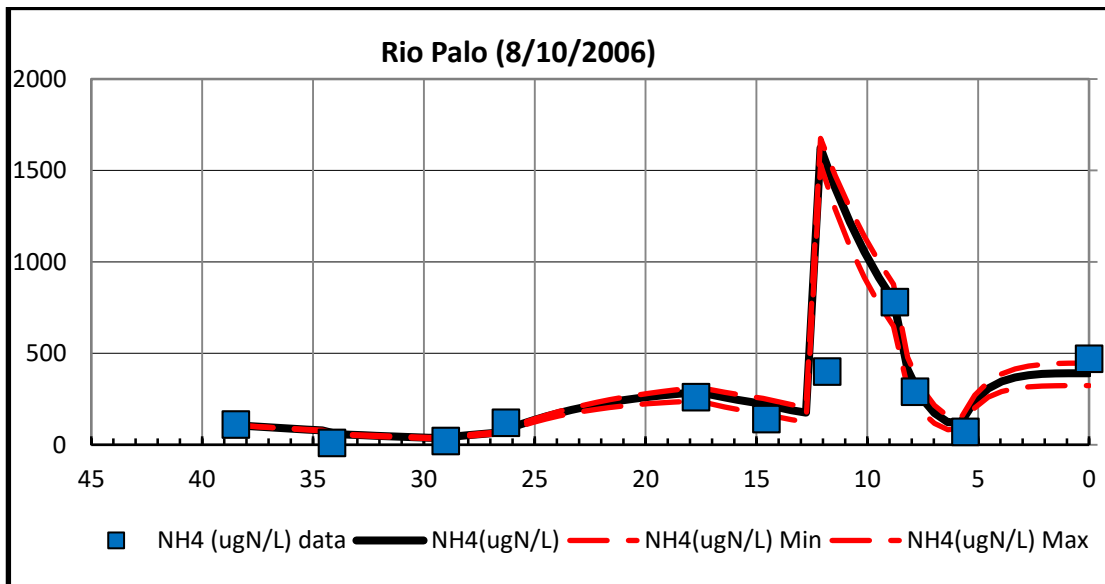
Gráfica 50: Nivel de disminución de DBO_u en la integración entre río Palo



Como se observa en la Gráfica 50, a partir del kilómetro 8, sitio en el cual se incorpora el río Paila, se evidencia una disminución del parámetro de DBO_u en un porcentaje que varía desde 13 a 19% a lo largo del recorrido del último tramo del río Palo.

En la Gráfica 51, se presenta los resultados obtenidos para el parámetro fisicoquímico de Amonio, el cual muestra el mismo comportamiento resultante en la calibración para el río Palo (Gráfica 13), concluyendo que el río la incorporación del río Paila no disminuye la carga contaminante de amonio en el cuerpo de agua.

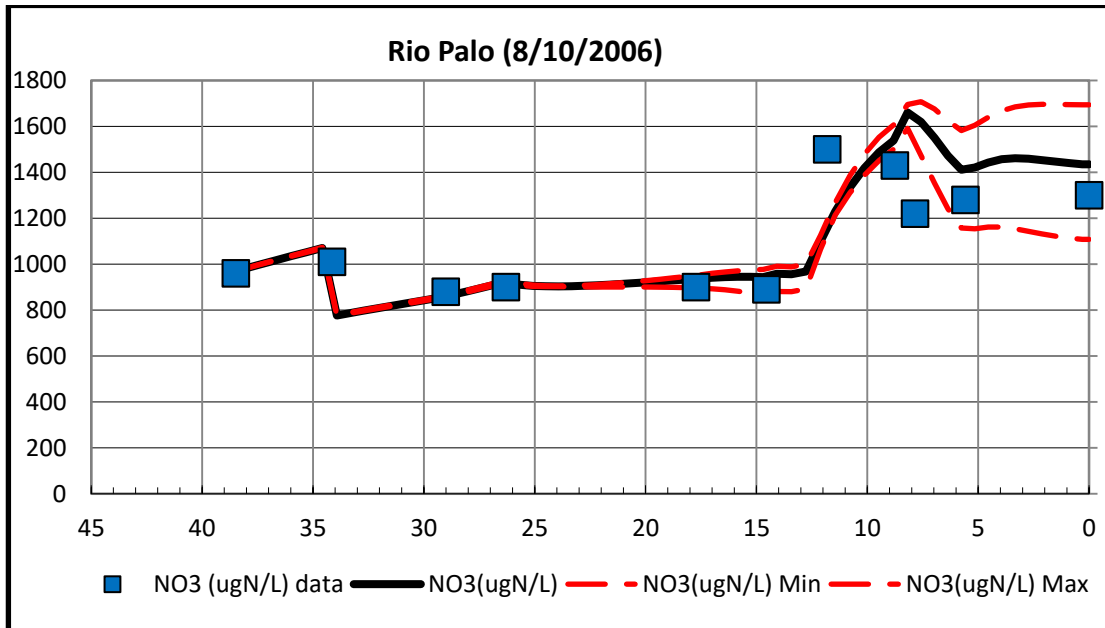
Gráfica 51: Amonio simulado - Integración ríos Palo y Paila.



IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

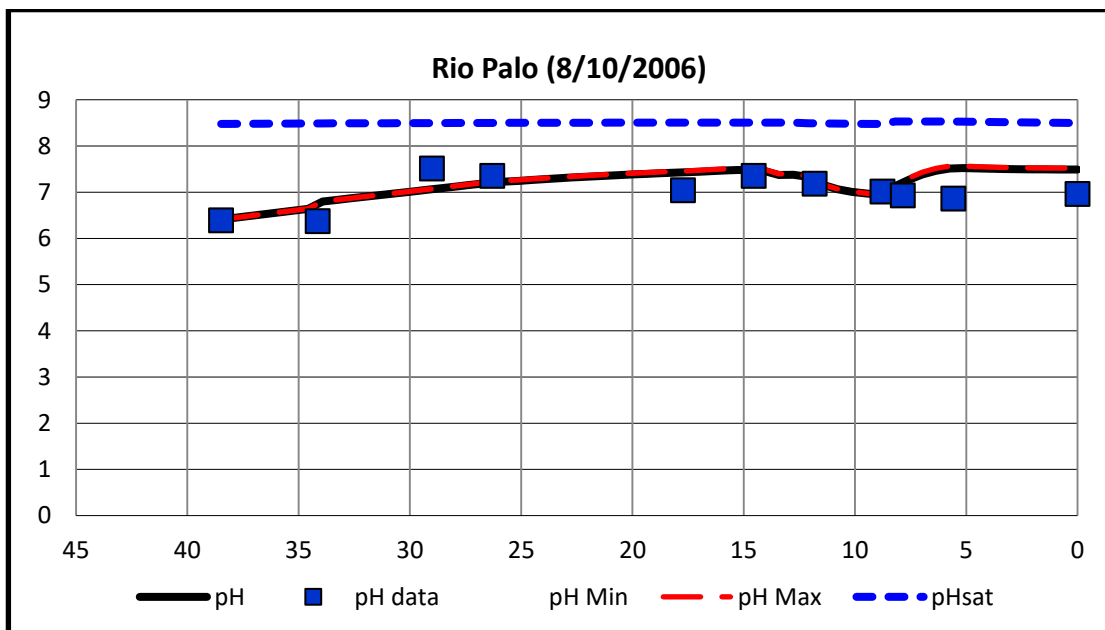
El nivel de nitratos presentado en la Gráfica 52, se incrementa en el río Palo debido a que el río Paila incorpora una carga considerable de este parámetro en el último tramo de la zona de estudio.

Gráfica 52: Nitrato simulado - Integración ríos Palo y Paila.



En la gráfica 53 se presenta los resultados de pH, el cual oscila entre un rango de 6.39 y 7.51, con un promedio de 7, lo cual indica que son aguas neutras, lo cual indica que el río Paila no influye en el comportamiento de este parámetro.

Gráfica 53: pH simulado - Integración ríos Palo y Paila.



7.1 ESCENARIOS DE CALIDAD.

Para el desarrollo de este proceso, se tendrán en cuenta los escenarios hidrológicos generados en el modelo SWAT, los cuales predicen bajo el conjunto de condiciones propuestas los caudales de estiaje para los ríos Palo y La Paila en la estación de muestreo N°. 1 para ambos. Estos escenarios de caudal se relacionan a continuación en la Tabla 21.

Tabla 21: Valores de caudales mínimos para los ríos Palo y Paila según el modelo SWAT.

Valores de caudales mínimos de los ríos sobre la cota 1100 condiciones actuales													
Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Palo	2.60	3.64	2.30	3.81	3.02	3.42	4.93	4.22	1.10	0.43	4.93	5.60	3.33
Paila	2.07	2.48	2.42	2.97	1.47	0.8	0.6	0.7	1.8	3.71	4.09	1.88	2.08

Valores de caudales mínimos de los ríos sobre la cota 1100 Escenario tendencia													
Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Palo	2.26	3.17	2.00	3.31	2.63	2.98	4.29	3.67	0.96	0.37	4.29	4.87	2.90
Paila	1.8	2.16	2.1	2.59	1.28	0.7	0.5	0.6	1.57	3.23	3.56	1.64	1.81

Valores de caudales mínimos de los ríos sobre la cota 1100 Escenario Conif													
Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Palo	2.53	3.55	2.24	3.71	2.94	3.33	4.80	4.11	1.07	0.42	4.80	5.46	3.25
Paila	2.02	2.42	2.35	2.9	1.43	0.8	0.6	0.6	1.76	3.61	3.99	1.83	2.03

Valores de caudales mínimos de los ríos sobre la cota 1100 Escenario Ideal													
Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Palo	2.99	4.18	2.65	4.38	3.47	3.93	5.66	4.85	1.27	0.49	5.67	6.44	3.83
Paila	2.07	2.48	2.42	2.97	1.47	0.8	0.6	0.7	1.8	3.71	4.09	1.88	2.08

7.1.1 Escenario 1: Disminución de Caudal.

La modelación de este escenario consistió en suponer una reducción del caudal tanto en el cauce principal como en su principal tributario, asumiendo una época de sequía para la zona, el anterior supuesto se basa en los datos arrojados por el modelo SWAT (Tabla 21 - Escenario tendencia) los cuales predicen bajo el conjunto de condiciones propuestas los caudales de estiaje para los ríos Palo y Paila en la estación de muestreo N°. 1. Teniendo en cuenta la anterior información, se tomaron los datos correspondientes al mes de Junio, debido a que en este mes se presentan condiciones críticas para los dos ríos, ya que históricamente es una época en la cual los niveles de precipitación disminuyen considerablemente, por tanto se asume un caudal en la cabecera del río Palo de 2.98 m³/s, lo que significa una reducción del 46%, del mismo modo, el caudal en la cabecera del río Paila se asume de 0.7 m³/s, es decir que se reduce en un 54%; adicionalmente se genera la misma reducción en

porcentaje para los caudales de las extracciones de las corrientes de estudio, excepto para la Bocatoma Propal la cual posee una estructura de entrada y control que estabiliza el caudal que se extrae del río.

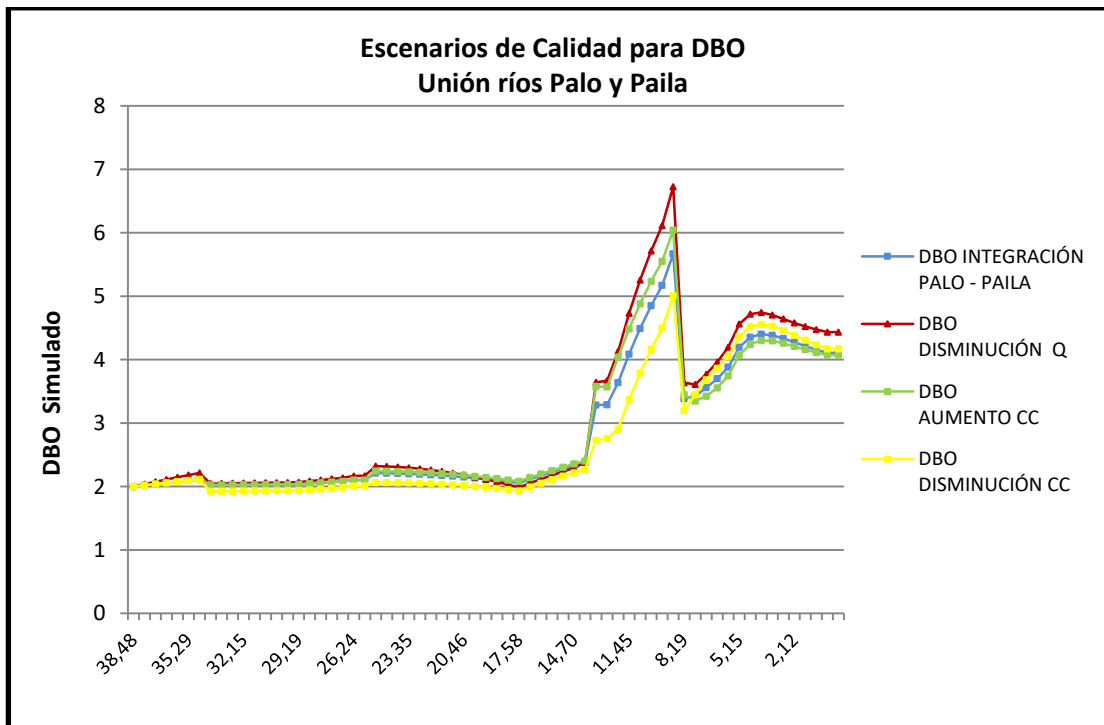
7.1.2 Escenario 2: Disminución de Cargas Contaminantes.

Para la modelación de este escenario, se mantuvo el caudal de la cabecera utilizado en la modelación de los respectivos ríos, y se redujo en un 50% las cargas contaminaste vertidas, asumiendo un mejoramiento en las eficiencias de remoción de los sistemas de tratamiento, tanto de las aguas residuales domésticas como industriales. En este contexto se asume una reducción de las cargas contaminantes del 50%.

7.1.3 Escenario 3: Aumento de Cargas Contaminante

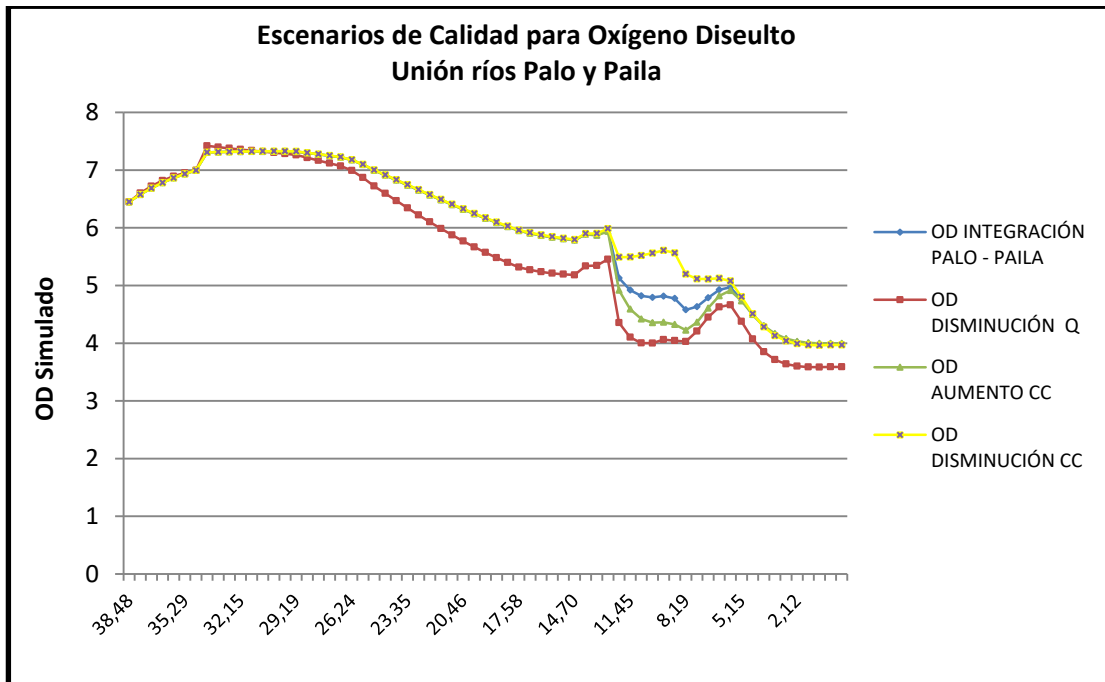
Para la modelación de este escenario, se mantuvo el caudal de la cabecera utilizado en la modelación de los respectivos ríos, y se aumentó en un 30% las cargas contaminantes vertidas, asumiendo un aumento de producción de las industrias que vierten sus aguas al cauce de los ríos objeto de estudio, de igual manera, se asume que la PTAR Guachené aumenta la carga contaminante vertida en un 30%. Derivado de las hipótesis planteadas anteriormente, se obtiene los siguientes resultados, presentados en las Graficas 54 a 57, tanto para el río Palo como para el Paila:

Gráfica 54: Comparación del parámetro DBO_u en los diferentes escenarios de calidad – Unión ríos Palo y Paila.

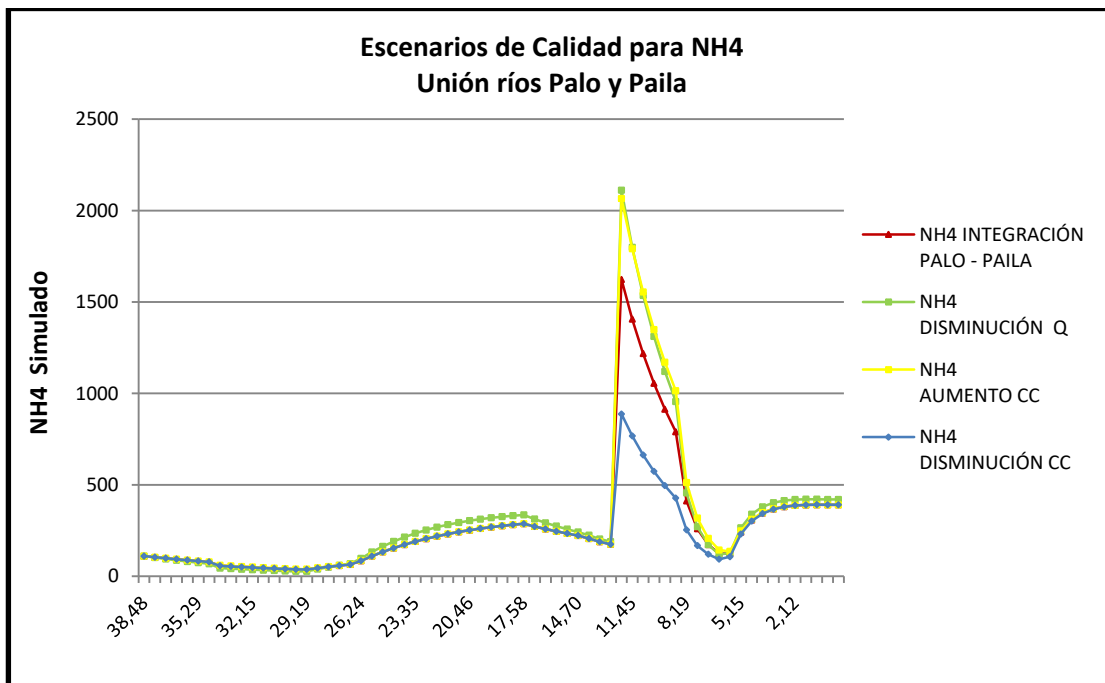


CC: Carga Contaminante.

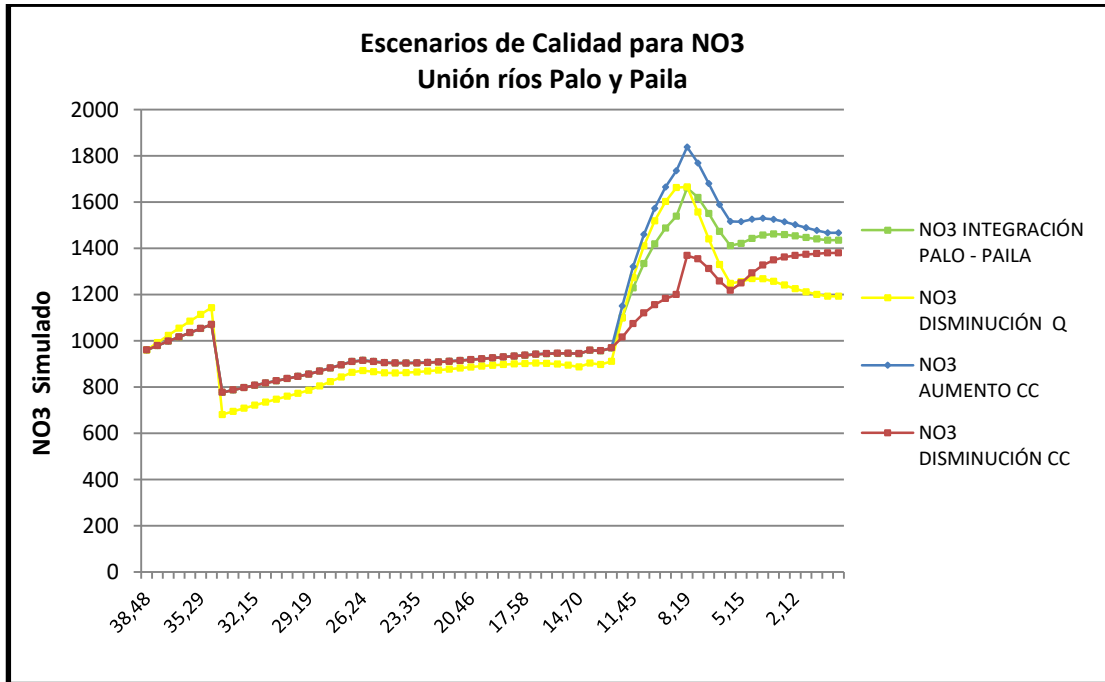
Gráfica 55: Comparación del parámetro de Oxígeno Disuelto en los diferentes escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.



Gráfica 56: Comparación del parámetro de Amonio (NH_4^+) en los diferentes escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.



Gráfica 57: Comparación del parámetro de Nitrato (NO_3) en los diferentes escenarios de calidad. Unión ríos Palo y Paila.



A continuación se presenta la Tabla 22, en la cual se establecen los resultados obtenidos de los escenarios de calidad en cuanto al impacto que representa cada uno de éstos sobre los parámetros de DBO_u , Oxígeno Disuelto y NH_4^+ :

Tabla 22: Resultado de escenarios de Calidad

Parámetros de Calidad	Escenarios de calidad		
	Disminución de Caudal	Disminución Cargas Contaminantes	Aumento Cargas Contaminantes
DBO_u	Aumenta en un promedio de 10%	Disminuye en un promedio de 7%	Aumenta en un promedio de 4%
Oxígeno Disuelto	Disminuye en un promedio de 8%	Aumenta en un promedio de 5%	Disminuye en un promedio de 2%
NH_4^+	Aumenta en un promedio de 15%	Disminuye en un promedio de 8%	Aumenta en un promedio de 6%

8. CONCLUSIONES

- ❖ La etapa de migración del modelo matemático de simulación de la calidad del agua QUAL2E hacia la versión actualizada QUAL2K, se llevó a cabo mediante el traspaso de información previamente calibrada en Q2E hacia la versión Q2K, de lo cual se obtuvo un ajuste positivo por defecto, que se evidencia mediante los coeficientes de correlación obtenidos para los parámetros de: Caudal (0,93), Oxígeno de Disuelto (0,85) y DBO_u (0,83), teniendo en consideración que la proximidad a 1, indica una asociación positiva entre las variables analizadas, es decir, que cuando la variable de Q2E aumenta, la variable en Q2K aumenta de forma proporcional, pero en este caso lo hace con valores menores a los simulados en Q2E.
- ❖ La etapa de calibración del modelo QUAL2K para el río Palo se efectuó con la campaña de verano con fines de modelación, realizada en el año 2006 por parte de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). De la implementación de dicha información se obtiene un ajuste positivo de los parámetros hidráulicos y fisicoquímicos analizados, dado que el modelo representa el comportamiento del río en base a datos reales de la campaña realizada, lo cual se corrobora a través de los coeficientes de correlación para los parámetros de Caudal, Oxígeno Disuelto y DBO_u con valores de 0,97, 0,85 y 0,72 respectivamente, teniendo en consideración lo expresado anteriormente en cuanto a coeficientes de correlación, cabe resaltar que las desviaciones que se presentan, se deben a que no se cuenta con información más detallada acerca de las variables hidrológicas y fisicoquímicas tales como: temperatura de la zona (air temperatura), velocidad del viento (wind speed) cobertura de nubes (cloud cover), sombras (shade), sólidos, fosfatos, nitrógeno, cubrimiento de algas, entre otros, los cuales inciden en el comportamiento presentado de las variables simuladas, dado que, los procesos que se desarrollan en el río se interrelacionan, en este contexto, el Oxígeno Disuelto se ve influenciado por parámetros tales como fósforo, nitrógeno, algas, entre otros, los cuales utilizan este parámetro para llevar a cabo sus procesos, de igual manera, los niveles de oxígeno en un cuerpo de agua incurren en el comportamiento presentado de la DBO_u , ya que son variables con una relación inversa.

Cabe resaltar que todos los modelos de simulación de la calidad del agua representan de manera aproximada los procesos que se llevan a cabo en los cuerpos de agua, puesto que en éstos se llevan a cabo múltiples interacciones que son complejas de representar en un solo modelo.

- ❖ La etapa de validación del modelo, se llevó a cabo mediante la implementación de la información de la campaña realizada para la época de invierno de 2006, de lo cual se obtiene un ajuste positivo de los diferentes parámetros simulados conforme a los resultados de los coeficientes de correlación presentados para los parámetros de Caudal, Oxígeno Disuelto y DBO_u con valores 0.9, 0,71 y 0,65 respectivamente, las desviaciones que se presentan se deben a que la validación se realiza con unas condiciones hidrológicas muy diferentes a las cuales se realizó la calibración del modelo

para el río Palo y para las cuales se carece de la información completa como por ejemplo de los perfiles hidráulicos para esta condición.

- ❖ La etapa de calibración para el río Paila, se llevó a cabo con los datos recopilados en la campaña realizada en el mes de Julio de 2008, de lo cual se obtuvo de manera aproximada las condiciones de comportamiento del río, esto se debe a que la alimentación del programa se realizó con datos actuales, lo cual permitió un buen ajuste del modelo; sin embargo, el parámetro de DBO_u presentó resultados de laboratorio inferiores al límite de detección recomendado para la DBO_u , dado que éstos se encuentran por debajo de 1 mg/l, adicionalmente los valores presentados para las estaciones estudiadas se encuentran en un rango muy pequeño (0,15 y 0,73) lo cual incrementa la incertidumbre de la información.
- ❖ La etapa de integración se llevó a cabo con cada uno de los modelos previamente calibrados para los ríos Palo y Paila, lo cual arrojó resultados con los que se puede dilucidar el impacto que representa sobre el río Palo la incorporación del río Paila, ya que éste último mejora la calidad del agua en cuanto a Oxígeno Disuelto en un promedio de 6%, así mismo, disminuye el parámetro de DBO_u en un promedio de 15%.
- ❖ Los escenarios de calidad, representan un ejercicio muy significativo puesto que permiten establecer situaciones hipotéticas de calidad y mirar el comportamiento del río frente a las mismas; en los escenarios de calidad abordados en el presente estudio, se puede observar que uno de los factores que genera mayor impacto sobre la calidad del río es una disminución del caudal, dado que las cargas contaminantes permanecen constantes y por tal motivo el río tiene menor capacidad de autodepuración. El impacto que genera este escenario de calidad se refleja en un aumento de DBO_u en un promedio de 10%, disminución de Oxígeno Disuelto en un promedio de 8% y un aumento de NH_4^+ en un promedio de 15%; los impactos mas significativos se presentan alrededor del kilómetro 11, dado que, en esta ubicación se encuentran los vertimientos de Propal y PACC II, generando un aumento de DBO_u y NH_4^+ de 18% y 30% respectivamente, de igual manera en este punto se presenta una disminución de oxígeno disuelto en un 17%, lo anterior se ve reflejado en la alteración de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, puesto que el Oxígeno Disuelto alcanza valores por debajo de 4 mg/l, lo cual afecta la biota acuática presente en el ecosistema.
- ❖ La disminución de cargas contaminantes presenta un menor impacto en la calidad del río frente a la disminución de caudal, dado que se obtiene un incremento de oxígeno disuelto de 5% y una disminución de DBO_u y NH_4^+ de 7% y 8%.
- ❖ El aumento de cargas contaminantes genera el menor impacto de los escenarios planteados en el presente estudio, teniendo que se presenta un aumento promedio en cuanto a DBO_u y NH_4^+ de 4% y 6% respectivamente, así como, una disminución de oxígeno disuelto de 2%. Dichos valores reflejan que el río posee una buena capacidad de autodepuración.

9. RECOMENDACIONES.

- ❖ Para futuros estudios, no solo del río Palo si no de otros cuerpos de agua que hagan uso del modelo QUAL2K, es importante incluir los tributarios que vierten sus aguas sobre el río objeto de estudio, puesto que como se mencionó anteriormente, permite dilucidar de una mejor manera el comportamiento del cuerpo de agua, puesto que los tributarios así como pueden mejorar la calidad de las aguas del río, también pueden representar un incremento de cargas contaminantes, las cuales pueden generar detrimento en la calidad del agua del río principal. En este contexto, los planes y programas que se realicen sobre el río permitirán enfocar los esfuerzos hacia la causa del problema.

- ❖ Se recomienda que en posteriores monitoreos se realice la toma completa de los parámetros de entrada que requiere el modelo matemático Qual2k, para que de esta manera los resultados arrojados por el modelo sea más adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ CHAPRA, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. 2008. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. Pg. 38.
- ❖ Clair N. Sawyer, Perry L. Macarty, Gen F. Parlam, Química para ingeniería ambiental. Mc Graw Hill 4ta Edición. Octubre 2000. Pag 494, 556, 569 y 589
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. “Caracterización de vertimientos y evaluación de la calidad del agua en corrientes receptoras del Departamento del Cauca. Popayán, 2006. 76 p.
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. “Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio Corinto – Cauca”. Popayán”, 2001. 319 p.
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA – INGENIERÍA DE SANEAMIENTO AMBIENTAL. “Estudio de modelación de la calidad del agua y disposición de cargas contaminantes sobre el río Palo”. Santiago de Cali, 2002.
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL CAUCA. “Estudio de los comportamientos de los ríos Desbaratado, Palo, Paila y Guengué” Popayán, 2004. 65 p
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL CAUCA. “Modelación de contaminantes superficiales del río Desbaratado en la formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Desbaratado”. Popayán, 2006. 81 p.
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. “Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Municipio Puerto Tejada – Cauca”. Popayán, 2005. 109 p.
- ❖ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA – UNIVERSIDAD DEL CAUCA. “Propuesta Ordenación del recurso hídrico superficial en la parte baja de la subcuenca del río Palo”. Popayán, 2007. 2 p.
- ❖ HOLGUÍN, J. “Propuesta para la asesoría técnica en la optimización del modelo de calidad del agua del río Palo y la realización de escenarios con fines de establecer los objetivos de calidad del agua”. Popayán, 2006. 2 p.
- ❖ Ibíd., 3 p
- ❖ INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). “Caja de herramientas sobre instrumentos económicos en la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas”. Bogotá D.C., 2006. 1 p.

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

- ❖ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Diagonal 97 No. 17-60, Santafé de Bogotá D.C., Colombia, E-mail: claudiac@ideam.gov.co.
- ❖ IDEAM. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. 2004.
- ❖ Propuesta “Ordenación del recurso hídrico superficial en la parte baja de la subcuenca del río Palo”, Universidad del Cauca – CRC. 2007.
- ❖ Roldán, G., Fundamentos de limnología neotropical, 1992. Pag 297.
- ❖ SAMBONI N, ESCOBAR Y, ESCOBAR J. “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de la calidad y contaminación del agua”. Revista de Ingeniería e Investigación, Vol 27 No 3. Cali, 2007. 172 p.
- ❖ Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring - Second Edition. UNESCO – WHO – UNEP. 1996.
- ❖ www.biologia.unicauca.edu.co
- ❖ www.ideam.gov.co/indicadores.
- ❖ www.es.wikipedia.org

ANEXO 1: ELEMENTOS DE ENTRADA EN EL MODELO MATEMÁTICO QUAL2K

1. HEADWATER

En Headwater se ingresa la información correspondiente al punto de donde parte el tramo a modelar. Determina las condiciones iniciales con las cuales inicia la simulación.

Una vez que el flujo de salida para cada elemento es computado, la profundidad y la velocidad son calculadas de una de las siguientes 3 formas: **Weirs**, **Rating curves** y por la **Ecuación de Manning**. El programa decide entre esas opciones de la siguiente manera:

- Si la altura y el ancho son ingresados, la opción Weirs es implementada.
- Si la altura y el ancho de la presa son cero y los coeficientes hidráulicos son ingresados (α y β), la opción Rating curves es implementada.
- Si ninguna de las condiciones previas son cumplidas, Q2K usa la ecuación de Manning Si ninguna de las condiciones previas son cumplidas, Q2K usa la ecuación de Manning.

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Number of Headwaters		1															
Headwater 0 (Mainstem)																	
Headwater label	Reach No	Flow	Elevation	Weir				Rating Curves				Manning Formula				Prescribed	
		Rate (m ³ /s)	(m)	Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth		Channel	Manning	Bot Width	Side	Side	Dispersion
Mainstem headwater								Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slope	n	m	Slope	Slope	m ² /s
Water Quality Constituents	Units	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM	6:00 AM	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM	3:00 PM
Temperature	C																
Conductivity	umhos																
Inorganic Solids	mgD/L																
Dissolved Oxygen	mg/L																
CBODslow	mgO ₂ /L																
CBODfast	mgO ₂ /L																
Organic Nitrogen	ugN/L																
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L																
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L																
Organic Phosphorus	ugP/L																
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L																
Phytoplankton	ugA/L																
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L																
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L																
Detritus (POM)	mgD/L																
Pathogen	cfu/100 mL																
Alkalinity	mgCaCO ₃ /L																
Constituent i																	
Constituent ii																	
Constituent iii																	
pH	s.u.																

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

2. DOWNSTREAM

En ésta hoja de cálculo se definen las condiciones de la frontera aguas abajo del modelo.

Prescribed downstream boundary?	No																
<i>Downstream Boundary Water Quality (optional)</i>	<i>Units</i>	<i>12:00 AM</i>	<i>1:00 AM</i>	<i>2:00 AM</i>	<i>3:00 AM</i>	<i>4:00 AM</i>	<i>5:00 AM</i>	<i>6:00 AM</i>	<i>7:00 AM</i>	<i>8:00 AM</i>	<i>9:00 AM</i>	<i>10:00 AM</i>	<i>11:00 AM</i>	<i>12:00 PM</i>	<i>1:00 PM</i>	<i>2:00 PM</i>	<i>3:00 PM</i>
Temperature	C																
Conductivity	umhos																
Inorganic Solids	mgD/L																
Dissolved Oxygen	mg/L																
CBODslow	mgO2/L																
CBODfast	mgO2/L																
Organic Nitrogen	ugN/L																
NH4-Nitrogen	ugN/L																
NO3-Nitrogen	ugN/L																
Organic Phosphorus	ugP/L																
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L																
Phytoplankton	ugA/L																
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L																
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L																
Detritus (POM)	mgD/L																
Pathogen	cfu/100 mL																
Alkalinity	mgCaCO3/L																
Constituent i																	
Constituent ii																	
Constituent iii																	
pH	s.u.																

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

3. REACH

Las denominaciones para cada tramo son las que aparecen en la columna reach label, El respectivo downstream (aguas abajo) para cada uno de ellos es la estación inmediatamente consecutiva. El modelo autocompleta la numeración de cada tramo, identifica el headwater y computa la longitud del mismo. También genera el dato de latitud y longitud de lo que ha sido ingresado al modelo.

En ésta hoja también se ingresan los valores de localización del punto inicial y final de cada tramo (upstream y downstream) con respecto al abcisado con que se cuenta. Así mismo el perfil de alturas determinado para estos puntos. El campo Element Number corresponde al número de elementos computacionales con que cuenta cada tramo.

Para los campos requeridos en las columnas correspondientes a rating curves, se ingresan los valores del modelo hidráulico seleccionado.

Reach for diel plot	2															Hydraulic Model (Weir Overrides Manning Formula; Manning Formula Override Rating Curves)																
Element for diel plot	1	Reach	Headwater	Reach	Location				Element	Elevation		Downstream				Weir				Rating Curves				Manning Formula								
Reach	Downstream	Number	Reach	length	Downstream		Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude			Height	Width	adam	bdam	Velocity		Depth		Channel	Manning	Bot Width	Side	Side		
Label	End of reach label			(km)	Latitude	Longitude	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slope	n	m	Slope	Slope		

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

<i>Prescribed Dispersion</i>	<i>Bottom Algae</i>	<i>Bottom SOD</i>	<i>Prescribed SOD</i>	<i>Prescribed CH4 flux</i>	<i>Prescribed NH4 flux</i>	<i>Prescribed Inorg P flux</i>
<i>m2/s</i>	<i>Coverage</i>	<i>Coverage</i>	<i>gO2/m2/d</i>	<i>gO2/m2/d</i>	<i>mgN/m2/d</i>	<i>mgP/m2/d</i>

4. REACH RATES

Los campos requeridos corresponden a tasas de ajuste para parámetros específicos en cada uno de los tramos. Son determinados experimentalmente para cada parámetro.

<i>Reach Number</i>	<i>Reach Label</i>	<i>ISS Reaeration</i>	<i>ISS Settling Velocity</i>	<i>Slow CBOD Hydrolysis Rate</i>	<i>Slow CBOD Oxidation Rate</i>	<i>Fast CBOD Oxidation Rate</i>	<i>Organic N Hydrolysis Rate</i>	<i>Organic N Settling Velocity</i>	<i>Ammonium Nitrification Rate</i>	<i>Nitrate Denitri Rate</i>	<i>Nitrate Sed Denitri transfer coeff</i>
		<i>/d</i>	<i>m/d</i>	<i>/d</i>	<i>/d</i>	<i>/d</i>	<i>/d</i>	<i>m/d</i>	<i>/d</i>	<i>m/d</i>	<i>m/d</i>

6. DEW POINT TEMPERATURE

Se ingresa el valor del punto de rocío de la zona, el cual se puede obtener a partir de la temperatura; del mismo modo que la temperatura, el modelo adopta un valor constante si no hay datos adicionales.

				<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>12:00 AM</i>	<i>1:00 AM</i>	<i>2:00 AM</i>	<i>3:00 AM</i>	<i>4:00 AM</i>	<i>5:00 AM</i>	<i>6:00 AM</i>
<i>Upstream</i>	<i>Reach</i>	<i>Downstream</i>	<i>Reach</i>	<i>Distance</i>	<i>Distance</i>	<i>Hourly dewpoint temperature for each reach (degrees C)</i>						
<i>Label</i>	<i>Label</i>	<i>Label</i>	<i>Number</i>	<i>km</i>	<i>km</i>	<i>Linear interpolation is used to estimate values between the hourly inputs.)</i>						

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

7. WIND SPEED

Se ingresa el valor tomado para velocidad del viento, es aproximado ya que no se cuenta con el dato exacto de la zona en cuanto a condiciones climáticas y estacionales; ni es concordante con el requerido por el modelo (a 7m de altura sobre la superficie del agua). Este valor igualmente se toma como constante al no tener datos adicionales.

				<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>12:00 AM</i>	<i>1:00 AM</i>	<i>2:00 AM</i>	<i>3:00 AM</i>	<i>4:00 AM</i>
<i>Upstream</i>	<i>Reach</i>	<i>Downstream</i>	<i>Reach</i>	<i>Distance</i>	<i>Distance</i>	<i>Wind speed for each reach 7m above water surface (m/s)</i>				
<i>Label</i>	<i>Label</i>	<i>Label</i>	<i>Number</i>	<i>km</i>	<i>km</i>					

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

10. RATES

La siguiente tabla es la interfase de entrada de constantes y tasas para el modelo. Los valores utilizados son los parámetros por defecto del modelo QUAL2K, siendo reportados en literatura como típicos para este tipo de reacciones.

Ammonium:			
Nitrification	1.649	/d	k_{na}
Temp correction	1.07		θ_{na}
Nitrate:			
Denitrification	0	/d	k_{dn}
Temp correction	1.07		θ_{dn}
Sed denitrification transfer coeff	0	m/d	v_{di}
Temp correction	1.07		θ_{di}
Organic P:			
Hydrolysis	0	/d	k_{hp}
Temp correction	1.07		θ_{hp}
Settling velocity	1.999	m/d	v_{op}
Inorganic P:			
Settling velocity	0	m/d	v_{ip}
Inorganic P sorption coefficient	0.073	L/mgD	K_{dpi}
Sed P oxygen attenuation half sat constant	1.831	mgO ₂ /L	k_{spi}
Phytoplankton:			
Max Growth rate	2.5	/d	k_{gp}
Temp correction	1.07		θ_{gp}
Respiration rate	0.1	/d	k_{rp}
Temp correction	1.07		θ_{rp}
Excretion rate	0	/d	k_{ep}
Temp correction	1.07		θ_{dp}
Death rate	0	/d	k_{dp}
Temp correction	1		θ_{dp}
External Nitrogen half sat constant	15	ugN/L	k_{sPp}
External Phosphorus half sat constant	2	ugP/L	k_{sNp}
Inorganic carbon half sat constant	2.00E-05	moles/L	k_{sCp}
Light model	Half saturation		
Light constant	57.6	langleys/d	K_{Lp}
Ammonia preference	25	ugN/L	k_{hnxp}
Subsistence quota for nitrogen	0	mgN/mgA	q_{0Np}
Subsistence quota for phosphorus	0	mgP/mgA	q_{0Pp}
Maximum uptake rate for nitrogen	0	mgN/mgA/d	ρ_{mNp}
Maximum uptake rate for phosphorus	0	mgP/mgA/d	ρ_{mPp}
Internal nitrogen half sat constant	0	mgN/mgA	K_{qNp}
Internal phosphorus half sat constant	0	mgP/mgA	K_{qPp}
Settling velocity	0.15	m/d	v_a

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

Bottom Algae:			
Growth model	Zero-order		
Max Growth rate	999.991	mgA/m ² /d or /d	C_{gb}
Temp correction	1.07		θ_{gb}
First-order model carrying capacity	1000	mgA/m ²	$a_{b,max}$
Respiration rate	1	/d	k_{rb}
Temp correction	1.07		θ_{rb}
Excretion rate	0.5	/d	k_{eb}
Temp correction	1.05		θ_{db}
Death rate	0.09	/d	k_{db}
Temp correction	1.07		θ_{db}
External nitrogen half sat constant	0.052	ugN/L	k_{sPb}
External phosphorus half sat constant	96.379	ugP/L	k_{sNb}
Inorganic carbon half sat constant	1.00E-05	moles/L	k_{sCb}
Light model	Half saturation		
Light constant	76.319	langleys/d	K_{Lb}
Ammonia preference	99.982	ugN/L	k_{hnxb}
Subsistence quota for nitrogen	2.524	mgN/mgA	q_{0N}
Subsistence quota for phosphorus	0.002	mgP/mgA	q_{0P}
Maximum uptake rate for nitrogen	149.913	mgN/mgA/d	ρ_{mN}
Maximum uptake rate for phosphorus	5.009	mgP/mgA/d	ρ_{mP}
Internal nitrogen half sat constant	0.384	mgN/mgA	K_{qN}
Internal phosphorus half sat constant	0.102	mgP/mgA	K_{qP}
Detritus (POM):			
Dissolution rate	7.179	/d	k_{dt}
Temp correction	1.07		θ_{dt}
Fraction of dissolution to fast CBOD	1.00		F_f
Settling velocity	0.236	m/d	v_{dt}
Pathogens:			
Decay rate	0.8	/d	k_{dx}
Temp correction	1.07		θ_{dx}
Settling velocity	1	m/d	v_x
Light efficiency factor	1.00		α_{path}
pH:			
Partial pressure of carbon dioxide	347	ppm	p_{CO2}
Constituent i			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent ii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent iii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO
PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO**

11. LIGHT AND HEAT

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>	
Photosynthetically Available Radiation	0.47		
Background light extinction	0.2	/m	k_{cb}
Linear chlorophyll light extinction	0.0088	1/m-($\mu\text{gA/L}$)	α_p
Nonlinear chlorophyll light extinction	0.054	1/m-($\mu\text{gA/L}$) ^{2/3}	α_{pn}
ISS light extinction	0.052	1/m-(mgD/L)	α_i
Detritus light extinction	0.174	1/m-(mgD/L)	α_o
Solar shortwave radiation model			
Atmospheric attenuation model for solar	Ryan-Stolzenbach		
<i>Bras solar parameter (used if Bras solar model is selected)</i>			
atmospheric turbidity coefficient (2=clear, 5=smoggy, default=2)	2		n_{fac}
<i>Stolzenbach solar parameter (used if Ryan-Stolzenbach solar model is selected)</i>			
atmospheric transmission coefficient (0.70-0.91, default 0.8)	0.75		a_{tc}
Downwelling atmospheric longwave IR radiation			
atmospheric longwave emissivity model	Brunt		
Evaporation and air convection/conduction			
wind speed function for evaporation and air convection/conduction	Brady-Graves-Geyer		
Sediment heat parameters			
Sediment thermal thickness	10	cm	H_s
Sediment thermal diffusivity	0.005	cm^2/s	α_s
Sediment density	1.6	g/cm^3	ρ_s
Water density	1	g/cm^3	ρ_w
Sediment heat capacity	0.4	$\text{cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$	C_{ps}
Water heat capacity	1	$\text{cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$	C_{pw}
Sediment diagenesis model			
Compute SOD and nutrient fluxes	Yes		

12. DIFFUSE SOURCES

En esta hoja de cálculo, se ingresan las fuentes difusas que aportaran caudal y modifican en algún grado la calidad de la corriente. Las fuentes difusas se consideran como aportes superficiales o subsuperficiales, como escorrentia o recarga de acuíferos, a lo largo de un elemento o tramo en particular dentro del modelo.

	Tributary	Headwater	Location		Diffuse	Diffuse		Spec	Inorg	Diss	CBOD	CBOD
			Up	Down	Abstraction	Inflow	Temp	Cond	SS	Oxygen	slow	fast
Name	No.*	Label	km	km	m3/s	m3/s	C	umhos	mgD/L	mg/L	mgO2/L	mgO2/L

Organic	Ammon	Nitrate	Organic	Inorganic	Phyto	Internal	Internal				Constituent	Constituent	Constituent	
N	N	N	P	P	plankton	Nitrogen	Phosphorus	Detritus	Pathogen	Alk	i	ii	iii	pH
ugN/L	ugN/L	ugN/L	ugP/L	ugP/L	ug/L	ugN/L	ugP/L	mgD/L	cfu/100 mL	mgCaCO3/L				

13. POINT SOURCES

En esta hoja se relacionan las fuentes puntuales definidas para el modelo; con su ubicación y su valor en caudal como descarga (inflow) o extracción (abstraction). Los valores de calidad para las descargas se incluyen en este campo, dando la posibilidad de definir valor promedio, rango y tiempo de valor máximo.

	Tributary	Headwater	Location	Point		Temperature			Specific Conductance			Inorganic Suspended Solids		
				Abstraction	Inflow	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of
Name	No.	Label	km	m3/s	m3/s	°C	°C	max	umhos	umhos	max	mg/L	mg/L	max

Dissolved Oxygen			Slow CBOD			Fast CBOD			Organic N			Ammonia N		
mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of	mean	range/2	time of
mg/L	mg/L	max	mgO2/L	mgO2/L	max	mgO2/L	mgO2/L	max	ugN/L	ugN/L	max	ugN/L	ugN/L	max

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

<i>Nitrate + Nitrite N</i>			<i>Organic P</i>			<i>Inorganic P</i>			<i>Phytoplankton</i>			<i>Internal Nitrogen</i>		
<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>
<i>ugN/L</i>	<i>ugN/L</i>	<i>max</i>	<i>ugP/L</i>	<i>ugP/L</i>	<i>max</i>	<i>ugP/L</i>	<i>ugP/L</i>	<i>max</i>	<i>ugA/L</i>	<i>ugA/L</i>	<i>max</i>	<i>ugN/L</i>	<i>ugN/L</i>	<i>max</i>

<i>Internal Phosphorus</i>			<i>Detritus</i>			<i>Pathogen Indicator Bacteria</i>			<i>Alkalinity</i>		
<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>
<i>ugP/L</i>	<i>ugP/L</i>	<i>max</i>	<i>mgD/L</i>	<i>mgD/L</i>	<i>max</i>	<i>cfu/100ml</i>	<i>cfu/100ml</i>	<i>max</i>	<i>mgCaCO3/L</i>	<i>mgCaCO3/L</i>	<i>max</i>

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

<i>Constituent i</i>			<i>Constituent ii</i>			<i>Constituent iii</i>			<i>pH</i>		
<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>	<i>mean</i>	<i>range/2</i>	<i>time of</i>
		<i>max</i>			<i>max</i>			<i>max</i>	<i>s.u.</i>	<i>s.u.</i>	<i>max</i>

14. HYDRAULICS DATA

En este campo los valores a ingresar corresponden a los valores de campo sobre los cuales el modelo compara las predicciones hechas en base a los parámetros y datos que fueron alimentados. En la anterior tabla se presentan los valores de parámetros hidráulicos de velocidad, caudal y profundidad para las estaciones evaluadas en este estudio.

Tributary	Distance	Q-data	H-data	U-data	Travel time
No.	x(km)	m³/s	m	m/s	data (d)

15. TEMPERATURE DATA

Los datos de temperatura del agua se ingresan en este campo, con la opción de incluir valores medios y maximos dependiendo del detalle con que se pueda realizar el estudio de campo.

Tributary	Distance	Mean	Minimum	Maximum
No.	x(km)	Temp-data	Temp-data	Temp-data

16. WATER QUALITY DATA

En este campo los valores a ingresar corresponden a los de referencia para comparar los resultados del modelo en la simulación para los diferentes parámetros. Al ser datos de comparación, no influyen en las rutinas del modelo para las simulaciones. Su importancia radica en que son datos de comparación con datos reales y con valores para la calibración del modelo. Su número y cantidad dependen del detalle y la robustez de los datos experimentales; ya que se permite el introducir valores mínimos y máximos para las series de datos en estudio.

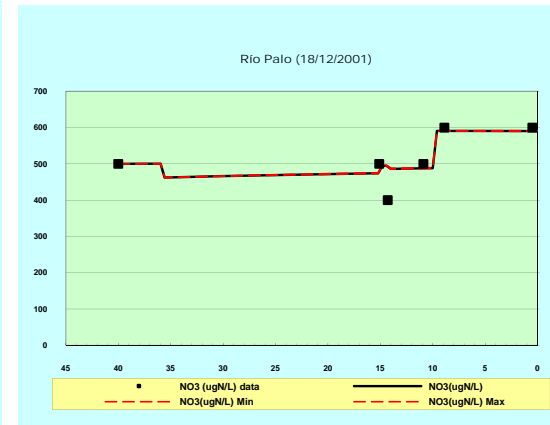
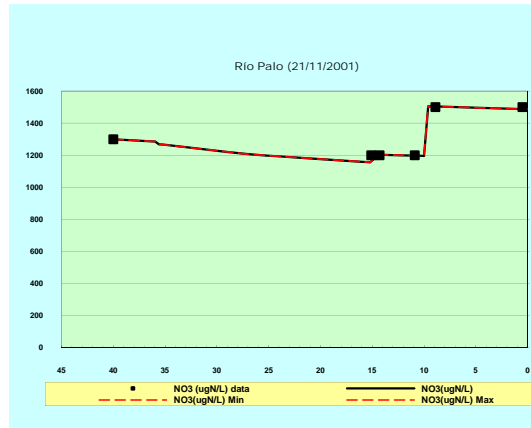
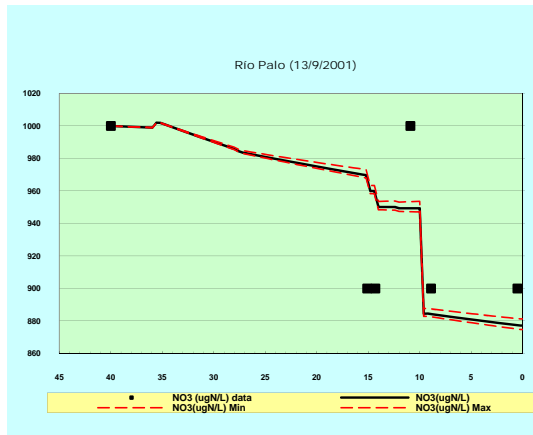
Tributary	Distance	Cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO (mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	Norg (ugN/L)	NH4 (ugN/L)	NO3 (ugN/L)	Porg (ugN/L)	Inorg P (ugP/L)
No.	km	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>

IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

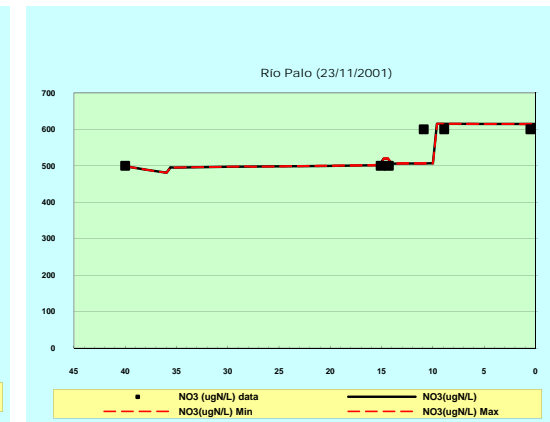
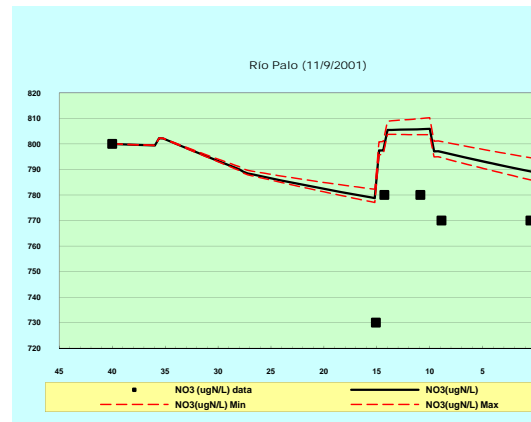
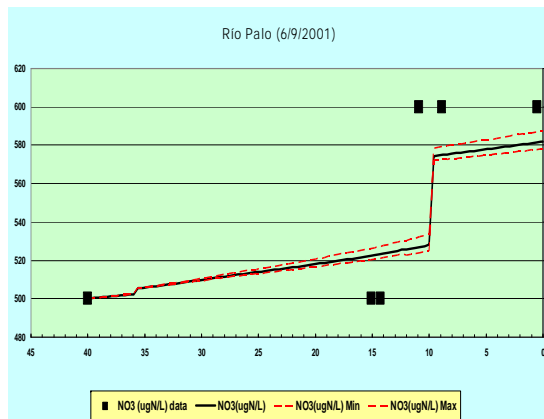
ANEXO 2: Resultado de la Modelación respecto a la Migración de datos.

Gráfica 1: Migración Nitratos - río Palo.

❖ Época de Invierno.



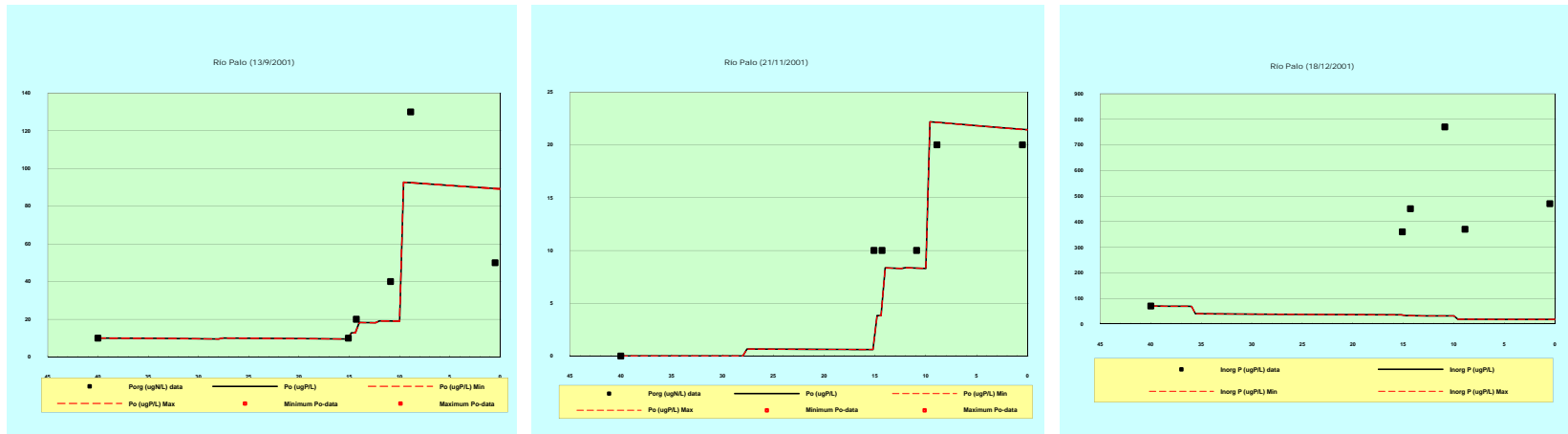
❖ Época de Verano.



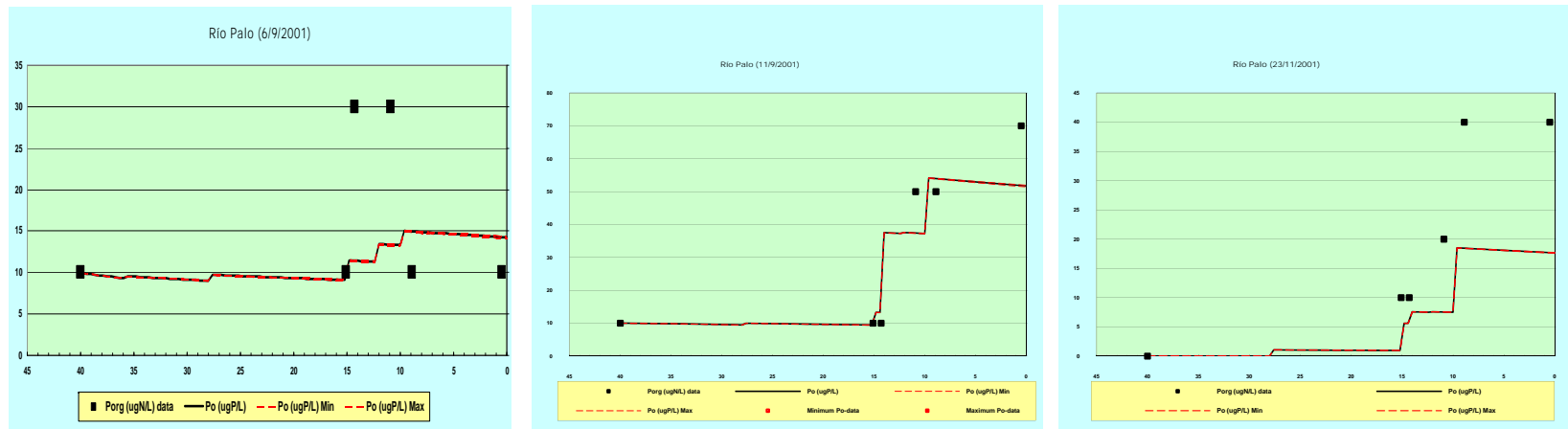
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Gráfica 2: Fósforo - Migración río Palo.

❖ Época de Invierno.



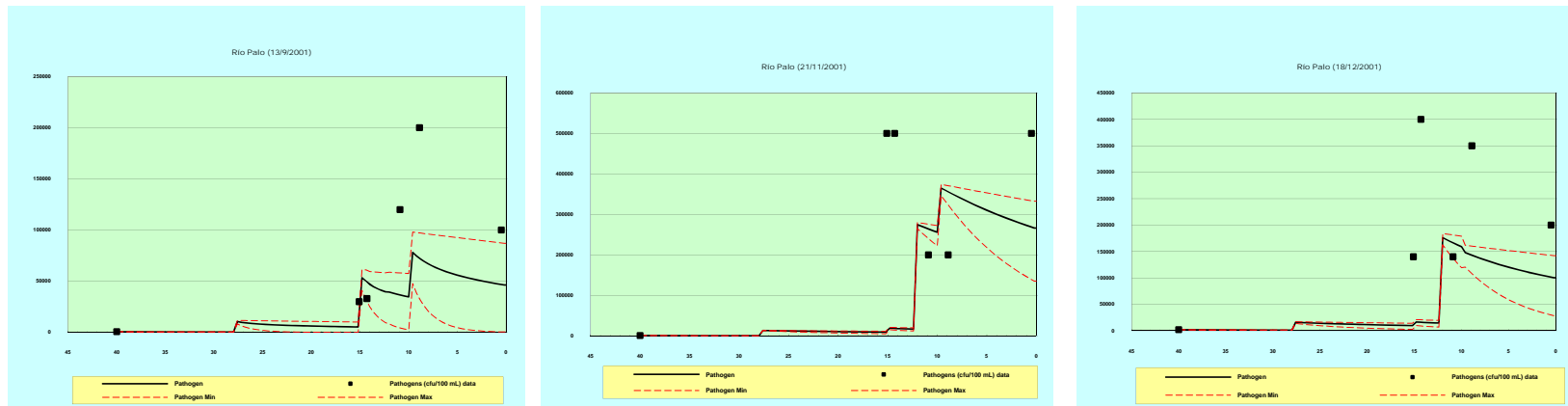
❖ Época de Verano.



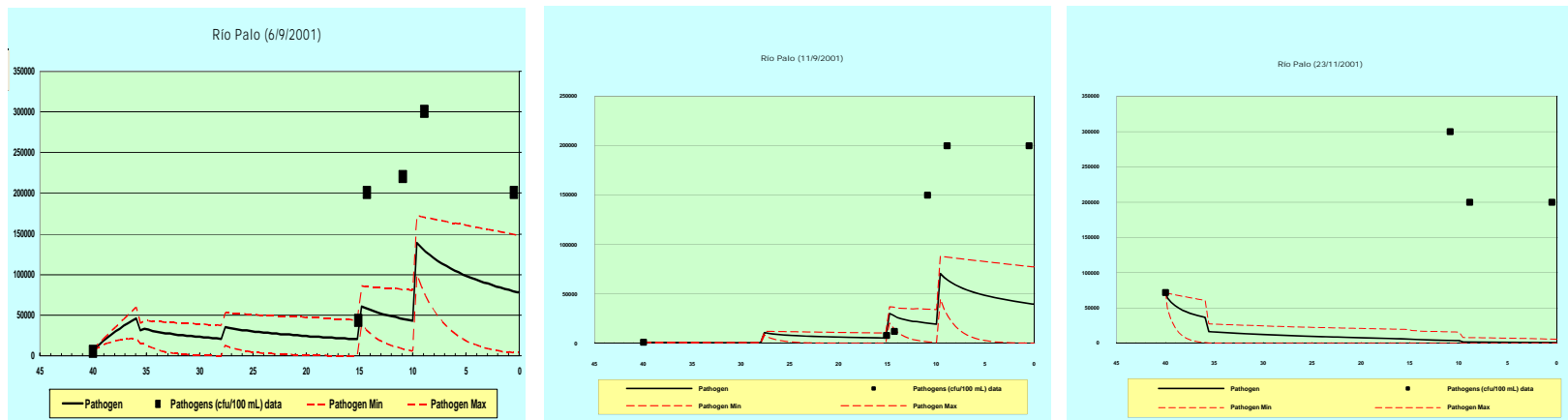
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Gráfica 3: Patógenos - Migración río Palo.

❖ **Época de Invierno.**



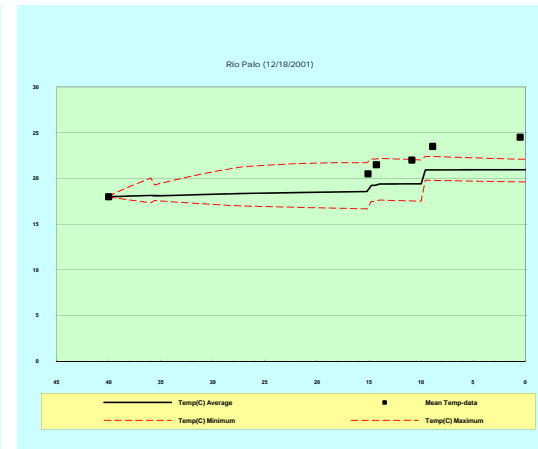
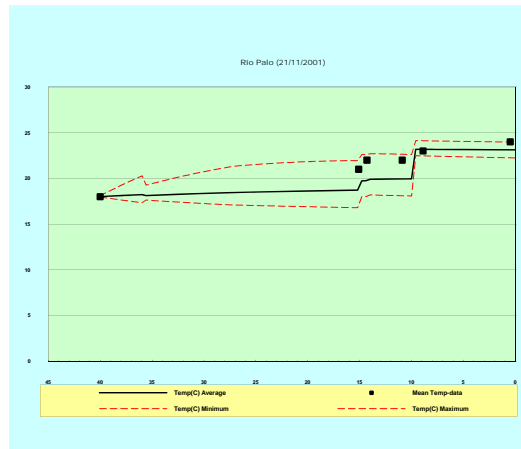
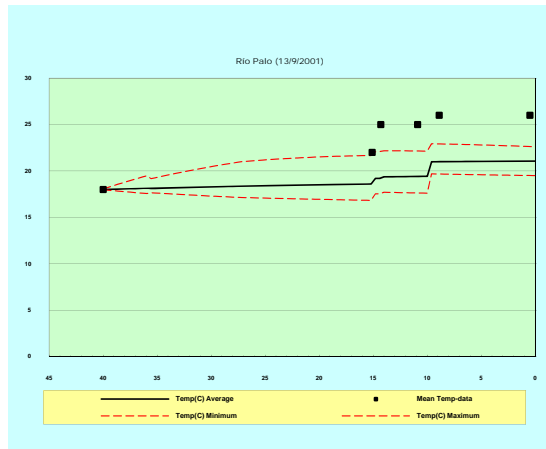
❖ **Época de Verano.**



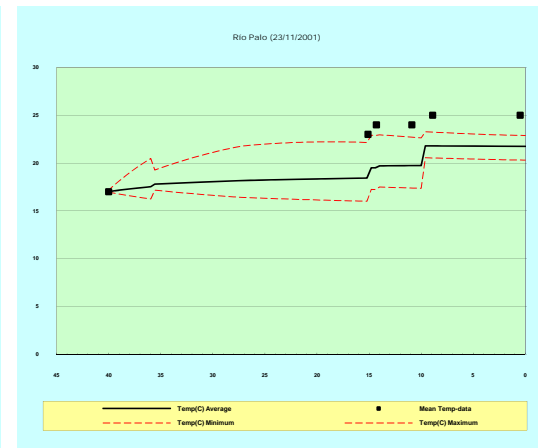
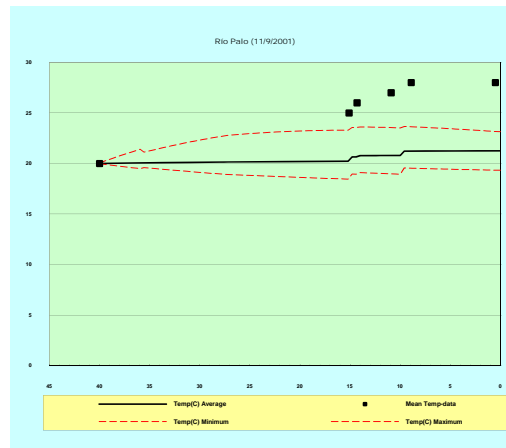
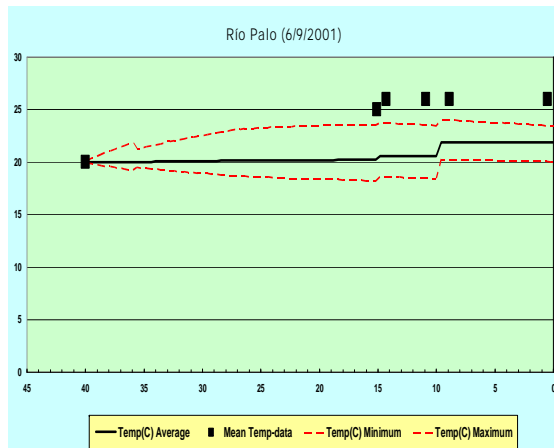
IMPLEMENTACION DEL MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DE AGUA QUAL2K EN EL RIO PAILA Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXISTENTE EN QUAL2E PARA EL RIO PALO

Gráfica 4: Temperatura - Migración río Palo.

❖ Época de Invierno.



❖ Época de Verano.



Anexo 3: Registro fotográficos de puntos preseleccionados del río Paila

Figura 1: Punto 1 Puente de Corinto sobre el río.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo

Figura 2: Punto 2 Vereda Paila.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo

Figura 3: Punto 3 Puente vía Corinto-Padilla.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo

Figura 4: Punto 4 Puente Ingenio La Cabaña vía a Potrero Verde.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo

Figura 5: Punto 5 Puente sobre el río Paila.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo

Figura 6: Punto 6. 100 metros antes de la desembocadura del Paila en Palo.



(a) Aguas Arriba



(b) Aguas Abajo