

**VALIDACION DEL SOFTWARE QUAL2K PARA LA ESTIMACION DEL  
COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CASO DE UN  
VERTIMIENTO**

**PATRICIA MARIN IBARRA  
SIERVO ANTONIO GALLO REY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**VALIDACION DEL SOFTWARE QUAL2K PARA LA ESTIMACION DEL  
COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CASO DE UN  
VERTIMIENTO**

**PATRICIA MARIN IBARRA  
SIERVO ANTONIO GALLO REY**

**Monografía presentada como requisito para optar al título  
de Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:  
Msc. Guillermo Cardozo Correa**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2014**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION .....	12
1. MARCO CONCEPTUAL .....	14
1.1. GENERALIDADES DEL MODELO QUAL2K.....	16
2. METODOLOGÍA .....	25
2.1 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DEL MODELO Y DE DATOS.....	27
3. SIMULACION CON EL MODELO QUAL2K.....	30
4. RESULTADOS.....	36
5. CONCLUSIONES .....	43
6. RECOMENDACIONES .....	44
BIBLIOGRAFIA.....	45

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resultados del Comportamiento de la Materia orgánica del Río Frío (Observados) .....	36
Tabla 2. Resultados de calidad de las Fuentes puntuales (Observados) .....	37

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Comandos para ejecución del programa .....	17
Figura 2. Pestaña 1. Entrada de datos .....	18
Figura 3. Pestaña 2 'headwater' .....	19
Figura 4. Pestaña 3. Geometría de los sub-tramos .....	20
Figura 5. Pestaña 9. Parámetros de velocidad del modelo.....	23
Figura 6. Esquema de segmentación QUAL2K para un río o sección de río sin tributarios .....	25
Figura 7. Representación tramo Q2K .....	26
Figura 8. Segmento hidráulico de estudio, micro cuenca río Frío .....	31
Figura 10. Fuentes Puntuales del Segmento hidráulico.....	32
Figura 11. Cartografía Segmento Rio Frío (ESC: 1 – 10000) .....	33

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Perfil longitudinal y transversal del segmento del río Frío .....	32
Gráfica 2. Balance hidráulico. Resultados vs. Simulación .....	38
Gráfica 3. Oxigenación. Resultados vs. Simulación.....	38
Gráfica 4. Modelado de DBOC Rápida. Resultados vs. Simulación .....	39
Gráfica 5. Modelado de DBOC Lenta. Resultados vs. Simulación.....	40
Gráfica 6. Modelado de Nitrógeno Orgánico. Resultados vs. Simulación.....	41

## RESUMEN

**TÍTULO: VALIDACION DEL SOFTWARE QUAL2K PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CASO DE UN VERTIMIENTO\***

**AUTOR: PATRICIA MARIN IBARRA, SIERVO ANTONIO GALLO \*\***

**PALABRAS CLAVE:** Simulación, Qual2k, Carga Orgánica.

### RESUMEN:

El presente trabajo tiene como objetivo validar la implementación del software Qual2K, para estimar la calidad del agua, en el caso de un vertimiento. El crecimiento poblacional a lo largo de un río, genera descargas contaminantes a lo largo de su cauce, en la mayoría de los casos con vertimientos no controlados.

Para realizar un diagnóstico de calidad de agua, es necesario llevar a cabo varias inspecciones, planear por tramos o zonas teniendo en cuenta una serie de parámetros a detallar en campo. Una vez establecida la carga orgánica, y su degradación a lo largo del río, es necesario hacer un seguimiento periódico a los parámetros evaluados. Este seguimiento implica realizar más inspecciones en cada uno de los tramos fijados. Al realizar el diagnóstico de calidad, por medio de modelación, en este caso del modelo Qual2K, es posible evaluar el comportamiento, y la composición físico química de la carga orgánica, así como la respuesta hidrológica del río, ante posibles vertimientos de origen doméstico e industrial.

En este caso, el modelamiento se realizó a un segmento hidráulico de Río Frío, ubicado entre el municipio de Floridablanca y Girón en el Departamento de Santander, con una longitud de 5,8 km de un total de 31,5 km.

Si bien es cierto que el modelo QUAL2K requiere información hidráulica, meteorológica, fisicoquímica, biológica y microbiológica, resulta ser una herramienta eficaz para determinar el grado de contaminación de un cauce, en forma periódica, a partir de los datos iniciales obtenidos en campo, y de este modo, continuar con los diagnósticos periódicos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Msc. Guillermo Cardozo Correa

## ABSTRACT

**TITLE: VALIDATION OF SOFTWARE QUAL2K FOR ESTIMATING THE BEHAVIOR OF WATER QUALITY IN THE CASE OF A SPILLAGE \***

**AUTHOR: PATRICIA MARIN IBARRA, SIERVO ANTONIO GALLO \*\***

**KEY WORDS::** Simulation, Qual2k, Organic Load.

### **ABSTRACT:**

This study aims to validate the software implementation QUAL2K to estimate water quality in the case of spillage. The population along a river, growth generates pollution discharges along its banks, in most cases with uncontrolled dumping.

For a diagnosis of water quality is necessary to carry out several inspections, plan sections or areas by taking into account a number of parameters to specify in field. Once the organic load, and degradation along the river is established, it is necessary to periodically monitor the parameters evaluated. This monitoring involves further inspection in each of the sections set. When performing quality diagnostic, through modeling, in this case QUAL2K model, it is possible to evaluate the behavior and the physical chemical composition of the organic load and the hydrological response of the river to possible dumping of domestic and industrial waste.

In this case, the modeling of a hydraulic segment Rio Frio, located between the town of Floridablanca and Girón in the Department of Santander, with a length of 5.8 km with a total of 31.5 km was performed.

Although the model requires QUAL2K hydraulic, meteorological, physicochemical, biological and microbiological information turns out to be effective for determining the degree of contamination of a bed, periodically, from initial field data tool and thus continue periodic diagnostic.

---

\* Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director: Msc. Guillermo Cardozo Correa

## INTRODUCCION

El recurso agua es cada vez más apreciado, tanto para uso doméstico industrial o agrícola. Su escasez, sobre todo en las zonas áridas y semiáridas, la sitúan como prioridad vital para el desarrollo de las poblaciones: "si no hay agua, no hay vida"

Para ser utilizada sin riesgo para el consumo humano, este recurso tal como se encuentra en la naturaleza, requiere de tratamientos que permitan eliminar las partículas y organismos que pueden ser dañinos para la salud.

El aumento de las necesidades generadas por el desarrollo económico y demográfico, ha hecho crecer también la dependencia de este elemento. Pese a su indiscutible valor, la contaminación causada por los efluentes domésticos e industriales, la deforestación y las prácticas del uso del suelo, está reduciendo notablemente la disponibilidad de agua utilizable.

Como consecuencia, este recurso es objeto de una atención especial por parte de las Administraciones Públicas, y de técnicos, involucrándose más en la planificación y gestión de su uso, con el fin de controlar su calidad.

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estas características afectan la capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal. Las aguas naturales sin contaminar presentan concentraciones de materia orgánica muy bajas. La contaminación por materia orgánica tiene en general tres orígenes: doméstico/urbano, agrícola e industrial.

Los parámetros que se suelen utilizar para medir la cantidad de materia orgánica presente en un agua abarcan muchos compuestos, ya que son medidas globales de la materia orgánica. Los más importantes se basan en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer u oxidar los productos orgánicos.

El DBO5 es el parámetro que se maneja para tener una medida de la materia orgánica biodegradable. Se calcula midiendo la disminución en la concentración de oxígeno disuelto del agua después de incubar una muestra durante 5 días a 20°C. La reacción se lleva a cabo en la oscuridad, para evitar la producción de oxígeno por las algas, a dilución adecuada, y manteniendo el pH entre 7-7,5. En estas condiciones de reacción en 5 días se degrada un 60-70% de la materia orgánica carbonada, la nitrificación del amoníaco producido por las proteínas comienza entre los 6 y 10 días. Unos valores elevados de DBO5 indican una alta concentración de materia orgánica biodegradables.

La complejidad de los fenómenos físico-químicos que intervienen en los procesos contaminantes hace indispensable la utilización de modelos de simulación asistida por ordenador como herramienta de ayuda al técnico en el desarrollo de su actividad.

Con el uso del modelo Qual2K, se pretende establecer una alternativa de diagnóstico hidrológico basado en la modelación del impacto de la materia orgánica en un río. El software Qual2K, es un modelo dinámico que simula la hidrodinámica de la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, asume zonas anóxicas y tramos longitudinalmente heterogéneos, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas.

## 1. MARCO CONCEPTUAL

El agua residual se caracteriza por su alta concentración de sólidos en suspensión y su alto contenido de materia orgánica. El vertido de agua residual sin tratar en un río inducirá, por tanto, un aumento en la concentración de materia orgánica y sólidos en suspensión.

El aumento de los sólidos en suspensión inducirá, de un lado, un incremento en la turbidez del agua. Como consecuencia de ello, el nivel de luz en el agua y el crecimiento de las algas disminuyen. Parte de los sólidos en suspensión sedimenta y crea un fondo con fangos que emite malos olores. La materia orgánica, por otro lado, sirve de sustento para los organismos heterótrofos. En el proceso de descomposición de la materia orgánica, estos organismos consumen oxígeno.

El consumo de oxígeno también se produce en el fango que se forma en las inmediaciones del punto de vertido.

A medida que la concentración de oxígeno disminuye, el oxígeno que hay en la atmósfera entra en el agua. Al principio, el ritmo al cual el oxígeno es consumido por los organismos heterótrofos es mayor que el ritmo al cual el agua se re-oxigena. Este ritmo de re-oxigenación es proporcional al déficit de oxígeno en el agua, en relación a la concentración de oxígeno disuelto a saturación. Más aguas abajo, a medida que la materia orgánica es degradada, el ritmo de consumo de oxígeno se hace más pequeño.

También el déficit de oxígeno se hace mayor, y por tanto, crece el flujo de re-oxigenación. Llega un punto en que los ritmos de consumo de oxígeno y re-oxigenación se hacen iguales.

Es el punto 'crítico', en que los niveles de oxígeno en agua son mínimos. Aguas abajo de este punto, los procesos de re-oxigenación dominan a los procesos de descomposición/consumo de oxígeno y la concentración de oxígeno disuelto vuelve a aumentar. Esta última zona se conoce como zona de recuperación.

El modelo Qual2K evalúa la cinética de oxidación e hidrólisis del carbono y nitrógeno así como el decaimiento de patógenos. El estudio de las tasas cinéticas requiere la realización de pruebas de campo y de laboratorio para establecer los rangos de validación en el río.

Con el uso del modelo Qual2K, se pretende establecer una alternativa de diagnóstico hidrológico basado en la modelación del impacto de la materia orgánica en un río.

La EPA (U.S. Environmental Protection Agency) lo aprobó en el 2007 y lo utilizó en el arroyo "Southampton", en el Condado de Montgomery y Bucks, en Pennsylvania, USA en el 2008. En Colombia, ha sido ejecutado para parámetros obtenidos en el río Bogotá.

Para esta investigación, se utiliza el segmento hidráulico ubicado entre el municipio de Floridablanca y Girón en el Departamento de Santander, con una longitud de 5,8 km de un total de 31,5 km. La cabecera se localiza en la estación limnimétrica "el pórtico" y la parte final del canal modelado en la confluencia con el río de Oro, denominado "Los Caneyes" en el municipio de Girón.

## 1.1. GENERALIDADES DEL MODELO QUAL2K

Toda la entrada y salida de la información, así como la ejecución del modelo se implementan dentro de Excel. Se debe tener en cuenta, que al utilizar este programa, no se esté utilizando una versión antigua de Microsoft Office. Aunque Excel es compatible para algunas versiones anteriores, Q2K no funcionará con versiones muy antiguas.

Todas las funciones de la interfaz son programados en lenguaje de macros de Excel : Visual Basic para Aplicaciones (VBA). Todos los cálculos numéricos se implementan en Fortran 90 por la velocidad de ejecución.

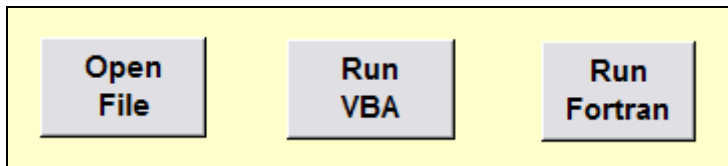
La interfase entre el modelo QUAL2K y el usuario está escrita en EXCEL. Este programa tiene una serie de pestañas/hojas (de color celeste) que se utilizan para introducir la información. El resto incluye los resultados del modelo en forma gráfica (color rosa) o en forma de tablas (pestañas de color verde claro).

Todas las hojas de trabajo incluyen tres botones:

- Open File. El navegador de archivos se abrirá automáticamente para permitirle acceder a un archivo de datos. Todos los archivos de datos QUAL2K tienen la extensión \*. Q2K.
- Run VBA. Este botón hace que Q2K ejecute la versión de VBA del modelo y crear un archivo de datos que contiene los valores de entrada. El archivo de datos se puede acceder después usando el botón anterior (Open File).
- Run Fortran. Este botón se usa para ejecutar la versión de Fortran del modelo y crear un archivo de datos que contiene los valores de entrada. El archivo de datos se puede acceder después usando el botón Open File. Las versiones de Fortran y de VBA dan resultados idénticos, solo que la versión en Fortran corre mucho más rápido porque es un programa ejecutable compilado, es decir

traduce el programa escrito en un lenguaje de programación (lenguaje de máquina, más manejable por la computadora).

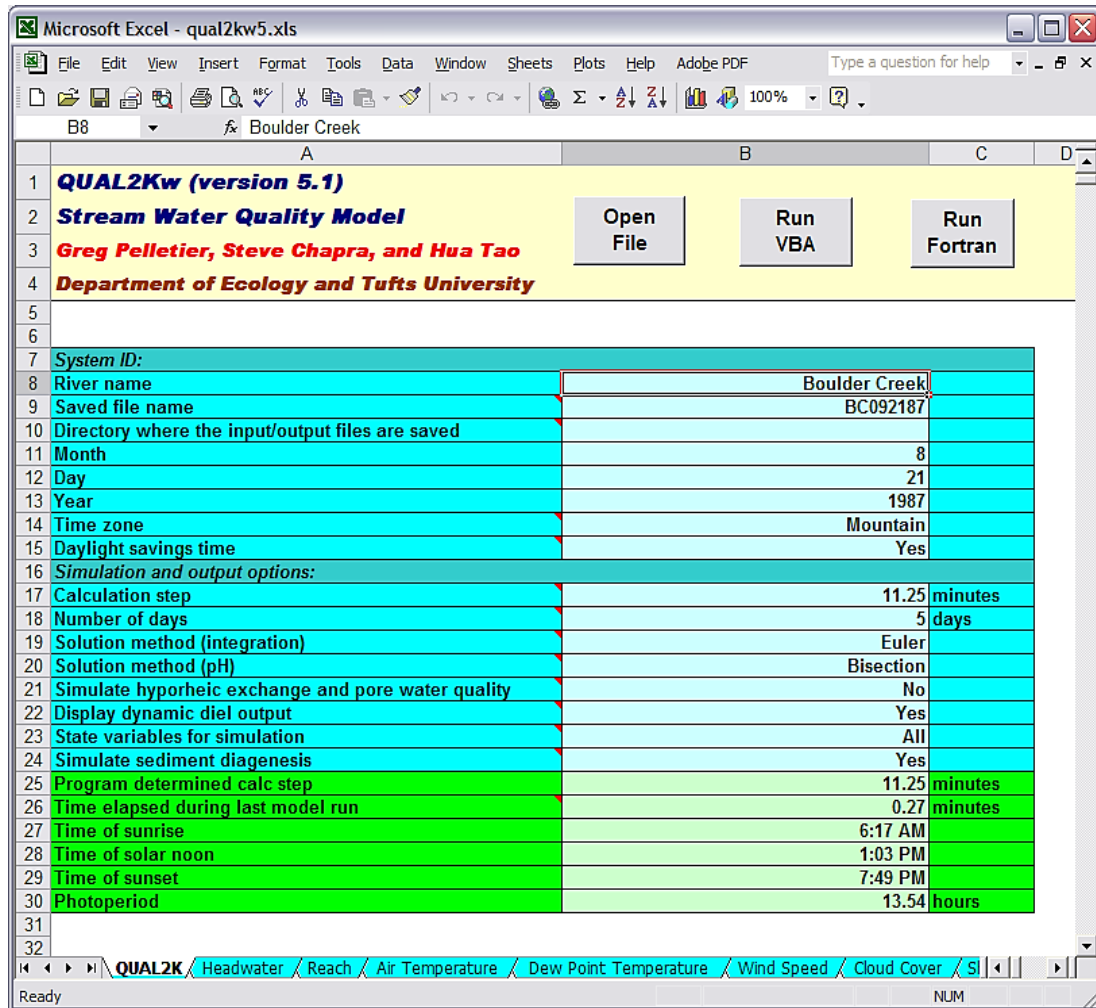
**Figura 1. Comandos para ejecución del programa**



Inicialmente, las pestañas de entrada de datos son:

1. Qual2k
2. Headwater
3. Reach
4. Air Temperature
5. Dew point temperatures
6. Wind speed
7. Cloud Cover
8. Shade
9. Rates
10. Light and heat
11. Diffuse Sources
12. Point Sources

Figura 2. Pestaña 1. Entrada de datos



En la pestaña 1, se identifica el río y se define el nombre del archivo de texto (con la extensión .q2k) en el que se guarda toda la información.

Este archivo guarda todos los datos de entrada y los resultados de la ejecución, y permite cargar el ejercicio que se realiza y seguir trabajando en él, en caso de no acabar.

En la pestaña 2 'headwater' se proporciona al modelo los datos de caudal de agua entrante, y se define su calidad en función de una serie de parámetros

indicadores. En este caso, solo interesa, el contenido de materia orgánica (expresada como D.B.O) oxígeno y temperatura.

**Figura 3. Pestaña 2 'headwater'**

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'Microsoft Excel - qual2kw5.xls'. The active tab is 'Headwater'. The spreadsheet contains the following data:

Headwater Water Quality	Units	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM
Temperature	C	14.88	14.04	13.29	12.69	12.26
Conductivity	umhos	276.42	277.23	279.22	282.26	286.14
Inorganic Solids	mgD/L	11.94	12.13	12.07	11.78	11.27
Dissolved Oxygen	mg/L	6.98	6.98	7.08	7.25	7.49
CBODslow	mgO2/L	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
CBODfast	mgO2/L	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
Organic Nitrogen	ugN/L	1561.00	1560.27	1565.73	1577.01	1593.33
NH4-Nitrogen	ugN/L	87.59	87.59	87.59	87.59	87.59
NO3-Nitrogen	ugN/L	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56
Organic Phosphorus	ugP/L	18.15	25.31	33.43	41.96	50.32
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	73.46	69.42	64.07	57.80	51.01
Phytoplankton	ugA/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Detritus (POM)	mgD/L	1.29	1.43	1.54	1.61	1.65
Pathogen	cfu/100 mL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alkalinity	mgCaCO3/L	90.91	91.18	91.93	93.09	94.60
pH	s.u.	7.33	7.21	7.13	7.10	7.12

Additional data from the spreadsheet:

- Headwater Flow: 0.713 m3/s
- Prescribed downstream boundary?: No
- Downstream Boundary Water Quality (optional):
 

Units	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM
Temperature	C				
Conductivity	umhos				

El modelo permite estudiar las variaciones de la calidad del agua que se producen en distintos momentos del día, y por tanto, se debe suministrar información de contenido de materia orgánica, oxígeno y temperatura, a distintas horas.

Si lo que se busca es simular el comportamiento del oxígeno y la materia orgánica en el río en estado estacionario los valores de las variables de estado para las distintas horas debe ser la misma.

Además en esta pestaña se definen las condiciones hidráulicas de flujo en la entrada del tramo de río.

La geometría de cada uno de los sub-tramos de río se define en la pestaña 3. Allí también se definen las condiciones hidráulicas del cauce.

**Figura 4. Pestaña 3. Geometría de los sub-tramos**

Reach Label	Downstream end of reach label	Number	Reach length (km)	Downstream Latitude	Downstream Longitude	Downstream location (km)	Upstream (m)	Downstream (m)
	Headwater	0		40.04	105.20	13.600		167
MP 0.4		1	0.42	40.05	105.20	13.175	1676.000	167
		2	0.43	40.05	105.20	12.750	1674.300	167
		3	0.85	40.05	105.19	11.900	1672.600	166
		4	0.85	40.05	105.18	11.050	1669.200	166
		5	0.85	40.05	105.17	10.200	1665.800	166
		6	0.85	40.05	105.16	9.350	1662.400	165
		7	0.85	40.05	105.15	8.500	1659.425	165
MP 3.5		8	0.85	40.05	105.14	7.650	1656.450	165
		9	0.85	40.05	105.13	6.800	1653.475	165
		10	0.85	40.05	105.12	5.950	1650.500	164
		11	0.85	40.06	105.11	5.100	1647.525	164
		12	0.85	40.06	105.10	4.250	1644.975	164
MP 5.6		13	0.85	40.06	105.09	3.400	1642.425	163
		14	0.85	40.07	105.09	2.550	1639.875	163
		15	0.85	40.07	105.08	1.700	1637.325	163
	Above Coal Ck	16	0.85	40.08	105.07	0.850	1634.775	163
Last Segment	Coal Creek	17	0.85	40.08	105.06	0.000	1632.225	162

La primera parte de la Hoja de Reach se utiliza para especificar las etiquetas de distancias y alturas.

En el modelo el río se divide en sub-tramos, y éstos a su vez se dividen en segmentos o elementos de cálculo. En el caso del estudio, Las muestras fueron

tomadas en el centro de cada tramo uno de los siete tramos en que se dividió el segmento del Río Frío, y se realizaron monitoreos de 24 horas tanto en la cabecera como en el final del segmento.

El modelo permite estimar las variaciones de temperatura del agua que se producen entre el día y la noche, ya que estas pueden afectar a la calidad del agua.

Las pestañas 4-8 son importantes cuando se quiere simular variaciones horarias de calidad del agua. Se utilizan para introducir los datos meteorológicos y de sombra. Todos tienen el mismo estilo general:

4. Air Temperature (Temperatura del Aire, en grados Celsius por hora)
5. Dew point temperatures (Temperatura del punto de rocío, por hora en grados centígrados)
6. Wind speed (Velocidad del viento, por hora, metros por segundo)
7. Cloud Cover (Cobertura de nubes, por hora % de cielo cubierto)
8. Shade (Sombreado por hora, se define como el porcentaje de la radiación solar que está bloqueado a causa de la sombra de la topografía y la vegetación)

Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario (total del follaje o el río fluye a lo largo de una tubería), se introduce el valor medio en la columna G (es decir, de 12:00 AM) y se dejan las otras celdas ( de la columna H hasta la columna AD ) en blanco. Q2K aplicará automáticamente el valor de 12:00 AM a las otras horas del día.

Si lo que se pretende es simular el comportamiento del oxígeno y la materia orgánica en el río, en estado estacionario, en estas pestañas no se introduce nada o se pueden introducir valores constantes para todas las variables.

Las constantes de reacción, velocidad de re oxigenación, los parámetros que permiten cuantificar el efecto de la temperatura en las reacciones, etc. se definen bien sub-tramo a sub-tramo en la pestaña 'Reach rates', o se les da un valor único al tramo de río en la pestaña 'rates'. Por lo general, se utiliza esta última opción.

La pestaña 9. Rates se utiliza para introducir los parámetros de velocidad del modelo y las opciones para la calibración automática (opcional).

Calibración automática: Q2K tiene la capacidad para calibrar automáticamente los parámetros seleccionados. El usuario tiene la opción de especificar los valores para cada tipo de parámetro que se utilizarán, o permitir a Q2K para auto-calibrar estos parámetros

La columna E de esta hoja de cálculo, se utiliza para seleccionar si un parámetro de tipo específico se calibra automáticamente. Si se selecciona "No" en la columna E para un parámetro de tipo específico, los valores consignados en la columna B serán utilizados para la simulación. Los valores en la columna B, siempre se usan cuando se corre el programa utilizando "Fortran Run" o "Run VBA".

Las columnas E, F, G, sólo se utilizan si el programa de calibración automática Q2K se ejecuta utilizando "Run Auto-Cal" en esta Hoja de Cálculo.

En la pestaña 'Point Sources' se definen las características del vertido de agua residual, su localización, caudal y la calidad de este (su contenido en materia orgánica, oxígeno disuelto y temperatura), así como las características del afluente.

Una vez introducida toda la información, se recurre al botón 'Run Fortran' en cualquiera de las pestañas, y el código se ejecuta. Al ejecutarse se abre una pantalla en negro en la que aparecen una serie de números.

**Figura 5. Pestaña 9. Parámetros de velocidad del modelo.**

The screenshot shows the 'RATES' worksheet in Microsoft Excel. The title bar reads 'Microsoft Excel - qual2kw5.xls'. The worksheet contains the following information:

**QUAL2Kw Stream Water Quality Model**  
**Boulder Creek (8/21/1987)**  
**Water Column Rates**

Buttons: Open File, Run VBA, Run Fortran, Run Auto-cal, Fitness: 1.15098

Parameter	Value	Units	Symbol	Auto-calibration inputs		
				Auto-cal	Min value	Max value
<b>Stoichiometry:</b>						
Carbon		40 gC	gC	No	30	50
Nitrogen		7.2 gN	gN	No	3	9
Phosphorus		1 gP	gP	No	0.4	2
Dry weight		100 gD	gD	No	100	100
Chlorophyll		1 gA	gA	No	0.4	2
<b>Inorganic suspended solids:</b>						
Settling velocity		0.81006 m/d	$v_i$	Yes	0	2
<b>Oxygen:</b>						
Reaeration model		USGS(pool-riffle)				
Temp correction		1.024	$\theta_a$			
Reaeration wind effect		None				
O2 for carbon oxidation		2.69 gO <sub>2</sub> /gC	$r_{oc}$			
O2 for NH <sub>4</sub> nitrification		4.57 gO <sub>2</sub> /gN	$r_{on}$			
Oxygen inhib model CBOD oxidation		Exponential				
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation		0.60 L/mgO <sub>2</sub>	$K_{socf}$	No	0.60	0.60
Oxygen inhib model nitrification		Exponential				
Oxygen inhib parameter nitrification		0.60 L/mgO <sub>2</sub>	$K_{sona}$	No	0.60	0.60
Oxygen enhance model denitrification		Exponential				
Oxygen enhance parameter denitrification		0.60 L/mgO <sub>2</sub>	$K_{sodn}$	No	0.60	0.60
Oxygen inhib model phyto resp		Exponential				
Oxygen inhib parameter phyto resp		0.60 L/mgO <sub>2</sub>	$K_{sop}$	No	0.60	0.60
Oxygen enhance model bot alg resp		Exponential				
Oxygen enhance parameter bot alg resp		0.60 L/mgO <sub>2</sub>	$K_{sob}$	No	0.60	0.60

Al acabar de ejecutarse, aparece una pantalla diciendo que todo ha ido bien, y preguntando el tramo cuyos resultados se quiere visualizar. Esta ventana muestra el progreso de los cálculos modelo como ejecutado en Fortran. Esto le permite seguir la evolución de un modelo de ejecución. Revisando las pestañas en rosa se observan los resultados de caudal, velocidad, oxígeno disuelto y materia orgánica. Si el programa funciona correctamente, aparece un cuadro de diálogo

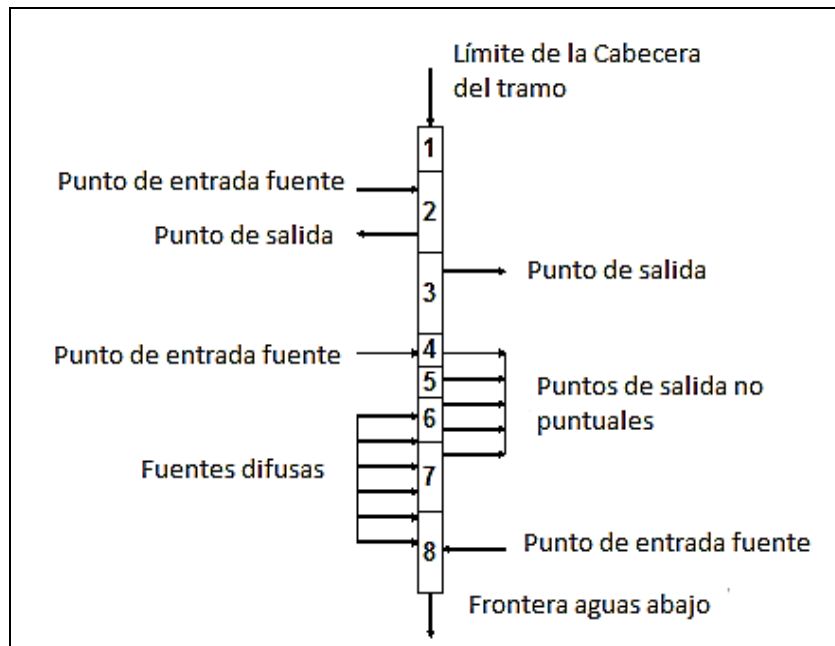
cuando se completa la ejecución. Inicialmente, y por defecto, se muestra el curso principal del río.

## 2. METODOLOGÍA

El programa está configurado para simular un río ficticio con un cauce principal junto con dos tributarios.

El modelo representa el río como una serie de tramos. Estos representan tramos de río que tienen constantes características hidráulicas (por ejemplo, la pendiente, de ancho inferior, etc.) Como se muestra en la Figura, los tramos se numeran en orden ascendente, empezando por la cabecera del tronco principal del río.

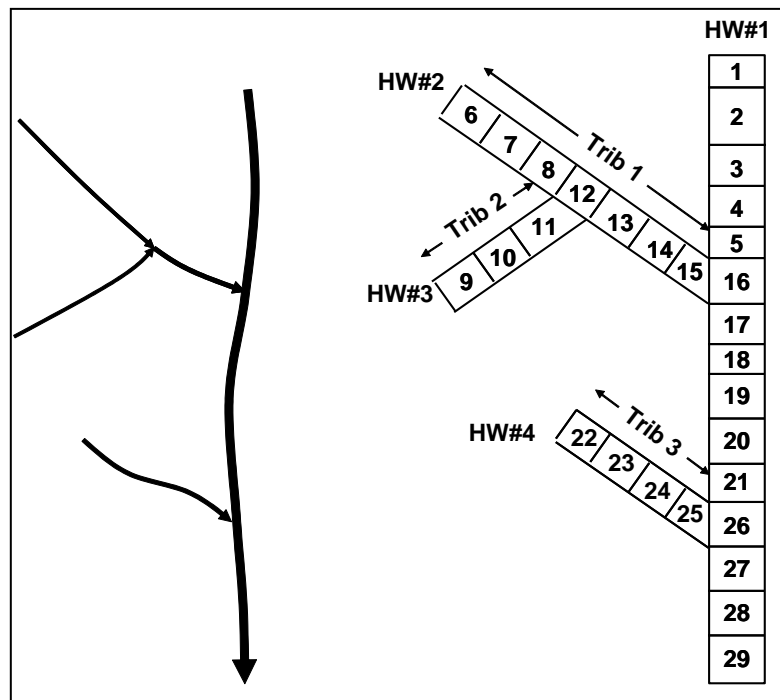
**Figura 6. Esquema de segmentación QUAL2K para un río o sección de río sin tributarios**



Para sistemas con afluentes (siguiente figura), los tramos se numeran en orden ascendente a partir de la cabecera del tallo principal. Cuando se alcanza un cruce con un afluente, la numeración sigue a la cabecera de ese afluente.

Red Principal

**Figura 7. Representación tramo Q2K**



Observe que tanto la cabecera y los afluentes también están numerados consecutivamente siguiendo un esquema de secuencia similar a los tramos.

Las principales ramas del sistema (es decir, el tallo principal y cada uno de los tributarios) se denominan segmentos.

Esta distinción tiene importancia práctica debido a que el software proporciona gráficos de salida del modelo en base a segmentos. Es decir, el software genera parcelas individuales para el tallo principal, así como cada uno de los tributarios.

Cualquier modelo de estudio, puede ser dividido en una serie de elementos igualmente espaciados. Esto se hace simplemente especificando el número de elementos que se deseen.

## 2.1 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DEL MODELO Y DE DATOS

Para todas las variables, menos CBOD lenta y rápida (cf y cs), existe una relación relativamente directa entre las variables de estado del modelo y las medidas estándares de calidad del agua.

Las siguientes medidas son las que se necesitan para la comparación de las variables con los resultados obtenidos en el modelo Q2K.:

TEMP = Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

TKN = nitrógeno total Kjeldahl ( $\mu\text{g N / l}$ ) o TN = nitrógeno total ( $\mu\text{g N / L}$ )

NH<sub>4</sub> = nitrógeno amoniacal ( $\mu\text{g N / L}$ )

NO<sub>2</sub> = nitrógeno nitrito ( $\mu\text{g N / L}$ )

NO<sub>3</sub> = nitrato de nitrógeno ( $\mu\text{g N / L}$ )

CHLA = clorofila a ( $\mu\text{g A / L}$ )

TP = fósforo total ( $\mu\text{GP / L}$ )

SRP = fósforo reactivo soluble ( $\mu\text{GP / L}$ )

TSS = sólidos totales en suspensión ( $\text{mgD / L}$ )

VSS = sólidos suspendidos volátiles ( $\text{mgD / L}$ )

TOC = carbono orgánico total ( $\text{mgC / L}$ )

DOC = carbono orgánico disuelto (en  $\text{mg C / L}$ )

DO = oxígeno disuelto ( $\text{mg O}_2 / \text{L}$ )

PH = pH

ALK = alcalinidad ( $\text{mgCaCO}_3 / \text{L}$ )

COND = conductancia específica ( $\mu$  mhos)

La dificultad de las mediciones de DBO, en las aguas naturales, se debe principalmente a tres factores.

- Filtrado. Si la muestra es filtrada, el DBO se refleja tanto en la oxidación del carbono orgánico disuelto y particulado. En el modelo Q2K se distingue entre DBO disuelto ( $c_s$  y  $c_f$ ) y particulado ( $m_o$  y  $a_p$ ), y una medida sin filtrar no solo proporciona una base adecuada para distinguir estas formas individuales.
- Además, uno de los componentes de la DBO de partículas, el fitoplancton (AP) puede complicar aún más la prueba a través de la generación de oxígeno fotosintético.
- DBO Nitrogenados. Junto con la oxidación de carbono orgánico (CBOD), la nitrificación también contribuye a la reducción de oxígeno (NBOD). Por lo tanto, si la muestra (a) contiene nitrógeno reducido y (b) la nitrificación no se anula, la medición incluye ambos tipos de DBO.
- El tiempo de incubación. A corto plazo, por lo general el DBO se realiza normalmente de 5 días, y el modelo Q2K utiliza el último CBOD.

En la práctica se debe tener en cuenta los factores antes mencionados para medir CBOD de modo que los resultados sean compatibles con Q2K.

Para ello, se sugiere que la muestra sea filtrada antes de la incubación, con el fin de separar el carbono orgánico disuelto, del carbono orgánico particulado.

La nitrificación se puede suprimir mediante la adición de un agente químico como la inhibición de TCMP (2 - cloro - 6 - (tricloro metil) piridina). Con ello, la medición reflejará el verdadero contenido de CBOD. En caso de que la inhibición no sea posible, el valor medido se puede corregir para el nitrógeno restando los equivalentes de oxígeno de la atmósfera de nitrógeno en la muestra. Sin embargo,

como con todos los ajustes quedan basados en la diferencia, esta corrección puede generar un error sustancial.

El tiempo de incubación. El modelo se basa en última instancia CBOD, por lo que es posible realizar la toma de dos formas: (1) utilizar un período suficientemente largo para que el valor máximo sea medible, o (2) usar una medición de 5 días y extrapolar el resultado al final.

### 3. SIMULACION CON EL MODELO QUAL2K

Como se ha indicado con el programa QUAL2K es posible valorar la evolución de la DBO, nutrientes y partículas en suspensión en la descargas a un río incluyendo la posibilidad de anoxia y la interacción con el sedimento, teniendo en cuenta lo siguiente:

- En el caso del DBO, ya se mencionó que el modelo QUAL2K utiliza dos formas de DBO carbonosa para representar carbono orgánico: de oxidación lenta (CBOD lenta) y de oxidación rápida (CBOD rápido).
- Además, se simulan detritus, o partículas no vivas en la materia orgánica. Este material detrítico se compone de partículas de carbono, nitrógeno y fósforo.
- El Q2K acomoda la anoxia mediante la reducción de las reacciones de oxidación a cero en los niveles bajos de oxígeno. Además, la desnitrificación se modela como una reacción de primer orden que se hace mayor a bajas concentraciones de oxígeno.
- La extinción de la luz se calcula como una función de algas, detritus y los sólidos inorgánicos. La alcalinidad (pH) y carbono inorgánico total son simuladas.
- El pH del río se simula teniendo en cuenta estas dos cantidades.
- Los patógenos cuando son genéricos son simulados. La eliminación de patógenos se determina como una función de la temperatura, la luz, y sedimentación.
- La simulación continua se puede realizar en las cuencas que tengan alcantarillas y drenaje natural, para la predicción de los flujos, las etapas y concentraciones de contaminantes.
- - Cada modelo de calidad del agua tiene su propio propósito y características únicas de simulación, por lo que debe considerarse el tipo de descarga y los

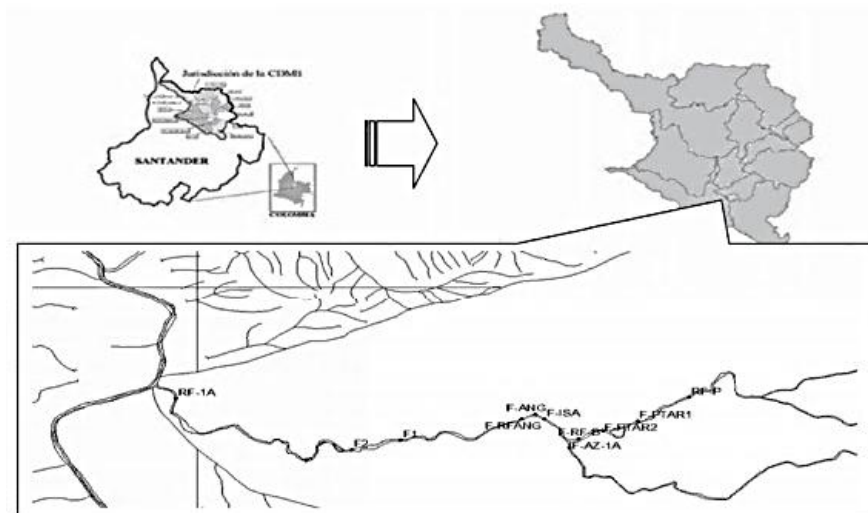
datos de entrada para cada modelo. Además del flujo, también se simulan el porcentaje de calor, temperatura y todas las variables de calidad.

Con esta investigación se pretende validar la utilización del software QUAL2K, para la estimación de la calidad del agua, en una fuente hídrica local, y cuyas características se ven afectadas por un vertimiento lateral y determinar el grado de eficiencia del uso de este software para el diagnóstico de la calidad del agua en los ríos.

El proceso de investigación comenzó con la evaluación del modelo, estableciendo el fenómeno o variable a simular aplicando los datos obtenidos en un estudio en campo realizado por la CDMB, y verificar los resultados obtenidos en los dos casos.

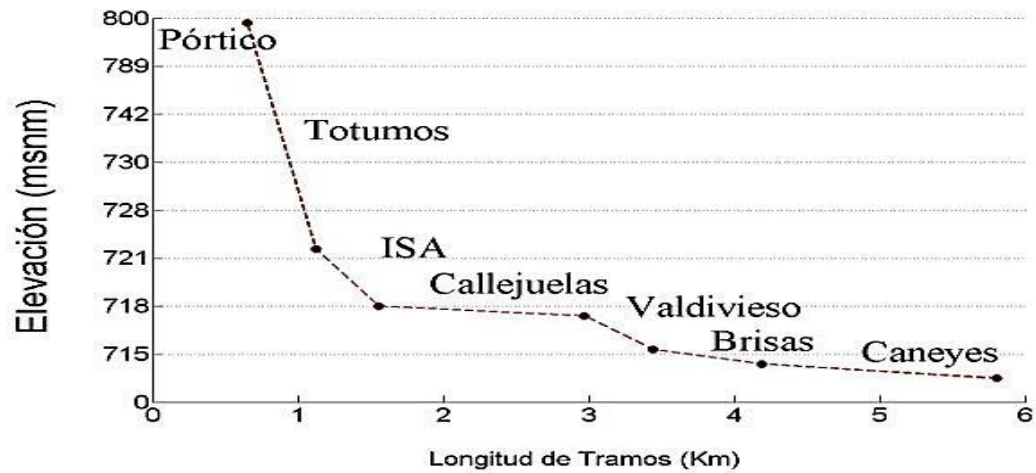
El segmento hidráulico del estudio se encuentra ubicado entre el Municipio de Floridablanca y Girón en los meridianos  $73^{\circ} 3'$  y  $73^{\circ} 9'$  de longitud y los paralelos  $7^{\circ} 3' 40,93''$  y  $7^{\circ} 3' 58,78''$  de latitud norte en el Departamento de Santander, Colombia con una longitud de 5,8 km, de un total de 31,5 km.

**Figura 8. Segmento hidráulico de estudio, micro cuenca río Frío**



La cabecera se localiza en la estación limnimétrica “el pórtico” y la parte final del canal modelado en la confluencia con el río de Oro, denominado “Caneyes” en el Municipio de Girón.

**Gráfica 1. Perfil longitudinal y transversal del segmento del río Frío**



Se realizó una simulación en 7 tramos dentro de los cuales existen 5 vertidos, 1 dilución y 1 abstracción clandestina, con la cual se balancea un caudal de  $2,03\text{m}^3\text{s}^{-1}$  al final del segmento.

**Figura 9. Fuentes Puntuales del Segmento hidráulico**

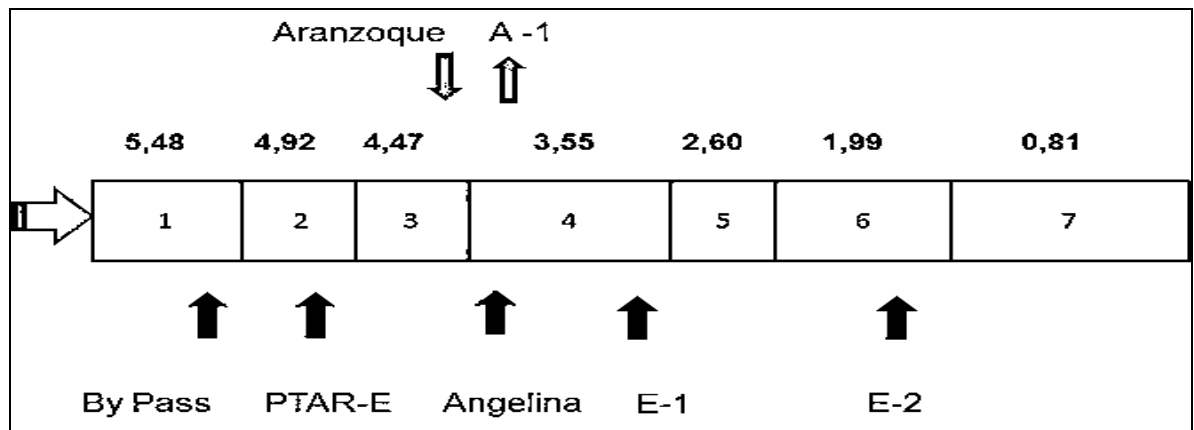
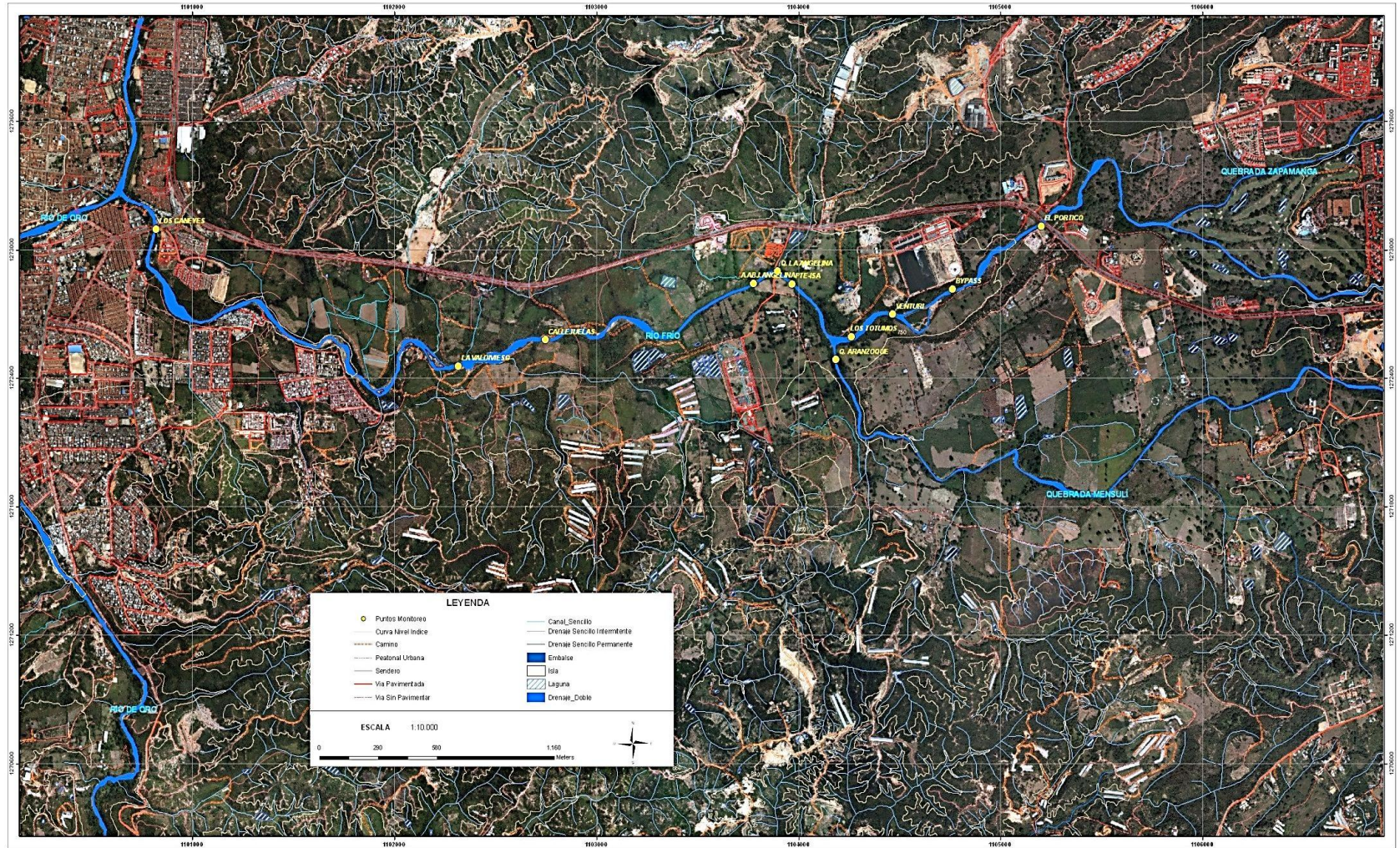


Figura 10. Cartografía Segmento Río Frío (ESC: 1 – 10000)



La toma de muestras se realizó en época de estiaje (mayo 2013) cumpliendo con las normas del IDEAM e ICONTEC (Guía para el Muestreo de Aguas de Ríos y Corrientes NTC-ISO 5667-6, Bogotá, 2006). En el monitoreo se tiene en cuenta el tiempo de viaje del río, para la determinación de la DBO.

Para determinar el punto de monitoreo se desarrollaron visitas de inspección aplicando un trazador conservativo (NaCl) con el fin de determinar el tiempo de viaje y capacidad de dilución del río. Con la finalidad de evitar errores en la valoración, la muestra se toma en el centro de cada tramo y se evaluó durante 24 horas la cabecera y último tramo, con el fin de recoger una muestra representativa del segmento.

Se examinó la oxidación del carbono orgánico del agua por medio del ensayo de la DBO<sub>5</sub>. La tasa de desoxigenación se evaluó implementando la incubación a 20°C con muestras inhibidas y filtradas encapsuladas en botellas winkler durante 24 días. Se aplicó el método de mínimos cuadrados para establecer la tasa decreciente de oxígeno.

La decadencia de patógenos se estableció de acuerdo al cambio de concentración en el perfil longitudinal del río. El comportamiento de la concentración contaminante en el río depende de la cantidad de contaminante, el flujo (del río y del vertimiento), el volumen de agua, el coeficiente de dispersión longitudinal, la carga contaminante y los mecanismos de transferencia de masas.

El carbono inorgánico se validó por medio del bicarbonato y el carbonato presente en el agua como consecuencia del arrastre de material calcáreo o asimilación del CO<sub>2</sub> contaminante. El nitrógeno es degradado de acuerdo a las reacciones de amonificación, nitrificación y des nitrificación secuencial, limitada por la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y el sedimento.

La simulación requiere de información hidrológica, química y meteorológica en el canal y las fuentes puntuales que intervienen en la degradación. El modelo Qual2k, aplica una solución analítica de diferencias finitas tipo Euler definidas por la hidrogeometría del canal.

Se asumió la materia orgánica en la fase disuelta y particulada expresada como DBOC (de reacción lenta y rápida), además las diferentes fracciones de nitrógeno presentes en la descomposición orgánica.

La modelación identifica zonas de impacto en tiempo y espacio, aplicando fuentes puntuales o difusas para analizar los impactos que ocasiona la variación en la concentración del carbono y nitrógeno orgánicos, identificadas en este software, como variables de entrada.

La base del cálculo del transporte de la masa contaminante, se logra aplicando la integración numérica en tiempo y espacio para cada parámetro de calidad del agua. Esta ecuación incluye los efectos de advección, dispersión, dilución, reacciones de los componentes e interacciones, fuentes y vertimientos de Floridablanca y Bucaramanga.

El caudal de aprovechamiento en el canal es fundamental para realizar el balance de masa de la carga contaminante del río. La volatilización y los flujos gaseosos no se tienen en cuenta para ésta investigación.

El modelo describe la materia orgánica con una estequiometría definida respecto a la relación entre la materia en base seca (D) el carbono (C), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y las algas (A) presentes en el agua del río.

#### 4. RESULTADOS

El abscisado se realiza en sentido contrario al recorrido del río, ya que las condiciones de modelación exigen que la ubicación aguas abajo sea inferior a la de la cabecera. Se hizo una evaluación preliminar de la capacidad de dilución del río, mediante la validación de la conductividad en los 7 tramos.

El comportamiento de la materia orgánica observada en los 7 tramos del canal hidráulico se ilustra en la tabla anterior, en la cual se evidencian las variables monitoreadas en condiciones de estiaje del río Frío. Por otro lado, el comportamiento de las fuentes puntuales (vertidos y dilución) se ilustran en la tabla 1, en donde se detecta 4 veces más de carga orgánica que la presente en el río.

**Tabla 1. Resultados del Comportamiento de la Materia orgánica del Río Frío (Observados)**

Tramo	OD (mg/L)	C <sub>s</sub> (mg/L)	C <sub>f</sub> (mg/L)	No (ug/L)	NH <sub>4</sub> (ug/L)	N <sub>n</sub> (ug/L)	MOP (mg/L)	NT (ug/L)	SST (mg/L)
Pórtico	6,7	0,2	5	610	1590	1110	17	3310	12
Totumos	0	6,9	150	4100	32400	103	86	56603	152
ISA	0,3	3,1	68	3900	27400	125	88	51421	147
Callejuelas	0	3,8	82	7200	19600	116	52	40916	115
Valdivieso	0	3,7	80	10500	19500	123	53	36123	108
Brisas	0	4,3	93	5300	24100	103	55	33503	98
Caneyes	0	2,3	51	700	26300	103	47	31103	66

C<sub>f</sub> = DBO5 filtrada, inhibida y C<sub>s</sub> = DBOCU – C<sub>f</sub>

MOP = materia orgánica particulada

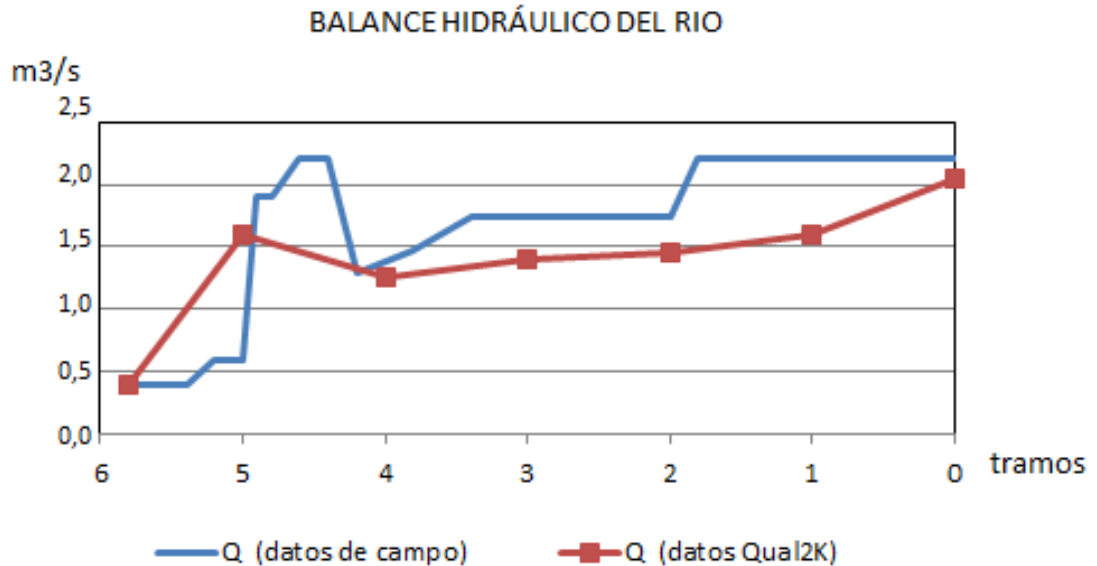
**Tabla 2. Resultados de calidad de las Fuentes puntuales (Observados)**

Fuente Puntual	OD mg/L	Cs mgO <sub>2</sub> /L	Cf mgO <sub>2</sub> /L	N o ugN/L	NH4 ugN/L	Coli Fec ufc/100mL	SST mg/L
Vto 1. By Pass	0	19,5	424	19400	26100	1720	339
Vto 2. PTAR -E	0	6,0	131	16800	59200	2120	172
Q. Aranzoque	6,7	0,0	1	800	300	1710	8
A-1	0	3,8	82	7200	19600	18700	115
Vto 3. Angelina	0	13,4	292	13400	20800	2020	220
Vertido E-1	0	11,5	334	17400	21100	1121	233
Vertido E-2	0	13,7	124	13400	16100	722	189

En el canal se detectó un bajo coeficiente de dispersión que oscila entre 0,34 y 20 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. La dispersión es directamente proporcional a la velocidad media que presenta un valor de 0,4 m.s<sup>-1</sup>. En los tramos I, III, IV y VII se detectó descensos de la velocidad a 0,2 m.s<sup>-1</sup> y dispersiones de 0 a 2 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. Estas dispersiones son bajas comparadas con otros ríos de montaña que superan los 50 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> como es el caso del río Bogotá.

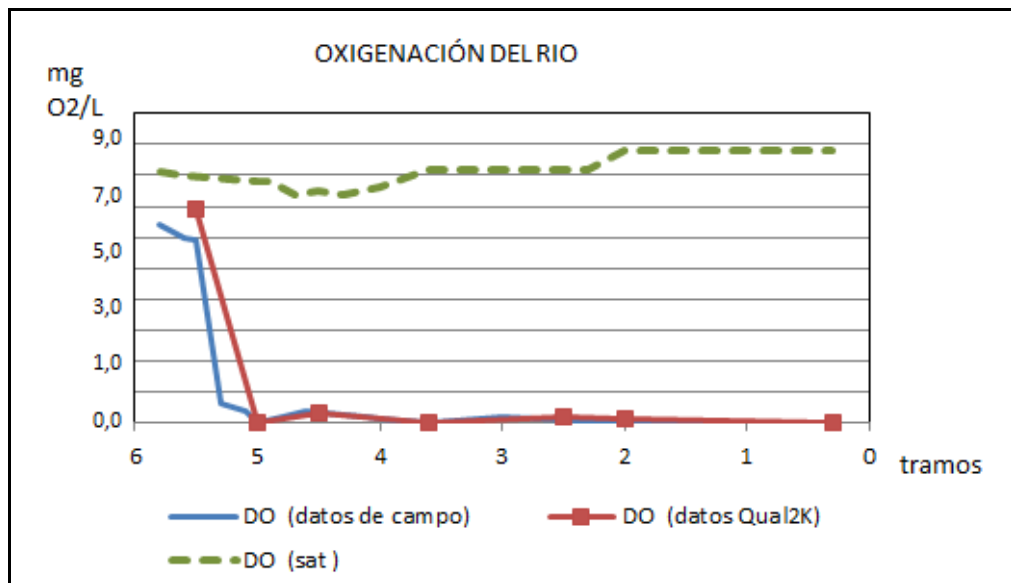
El caudal inicial de 0,43 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, se aumenta a 2,7 m<sup>3</sup>, esto permite un aumento en el balance hidráulico de 1,63 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> debido a los afluentes contaminantes domésticos. Las secciones transversales oscilaron entre 1,8 y 6,9 m<sup>2</sup> de área, permitiendo que el río tenga zonas húmedas amplias donde se expande la corriente disminuyendo la profundidad y la velocidad. El caudal perdido es calculado en 0,87 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> como consecuencia de la extracción clandestina y la evaporación, ya que la temperatura oscila entre 28 y 35 °C en la zona.

**Gráfica 2. Balance hidráulico. Resultados vs. Simulación**



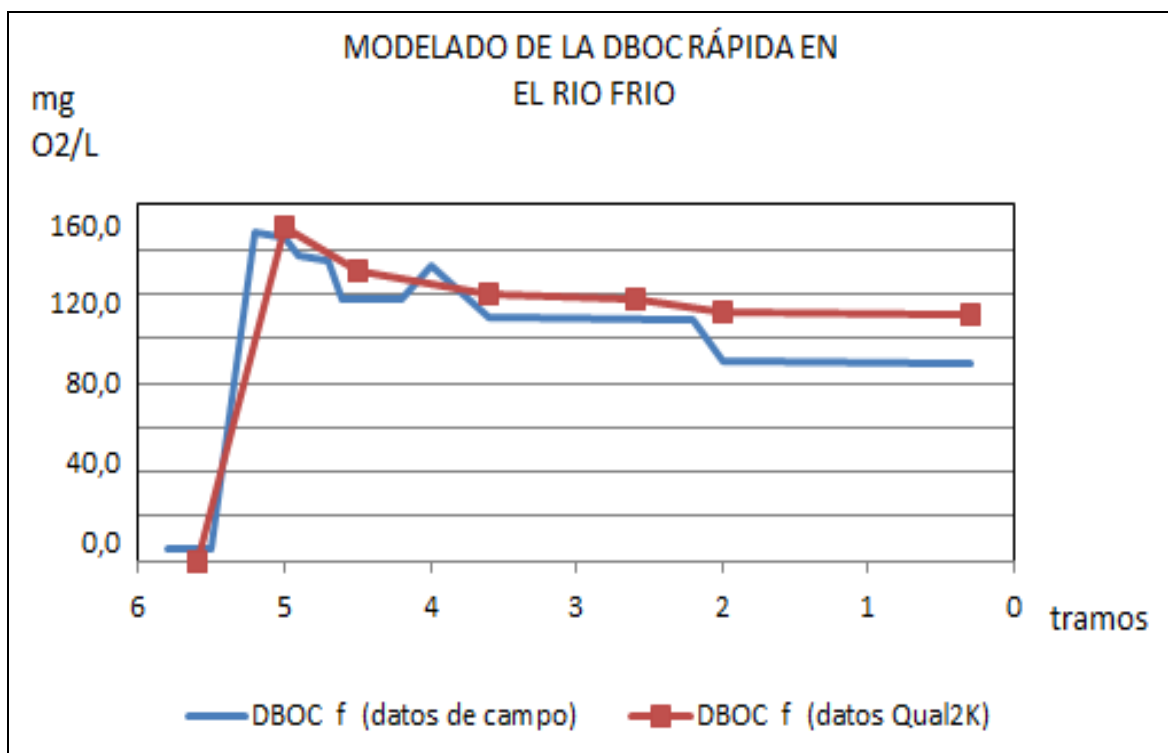
El comportamiento del oxígeno disuelto no tiene un balance positivo, por el contrario existe una pérdida del 95% aun cuando en el canal existe una saturación de oxígeno cercana a 8 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>. El oxígeno no superó los 0,5 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> aguas abajo del primer tramo.

**Gráfica 3. Oxigenación. Resultados vs. Simulación**

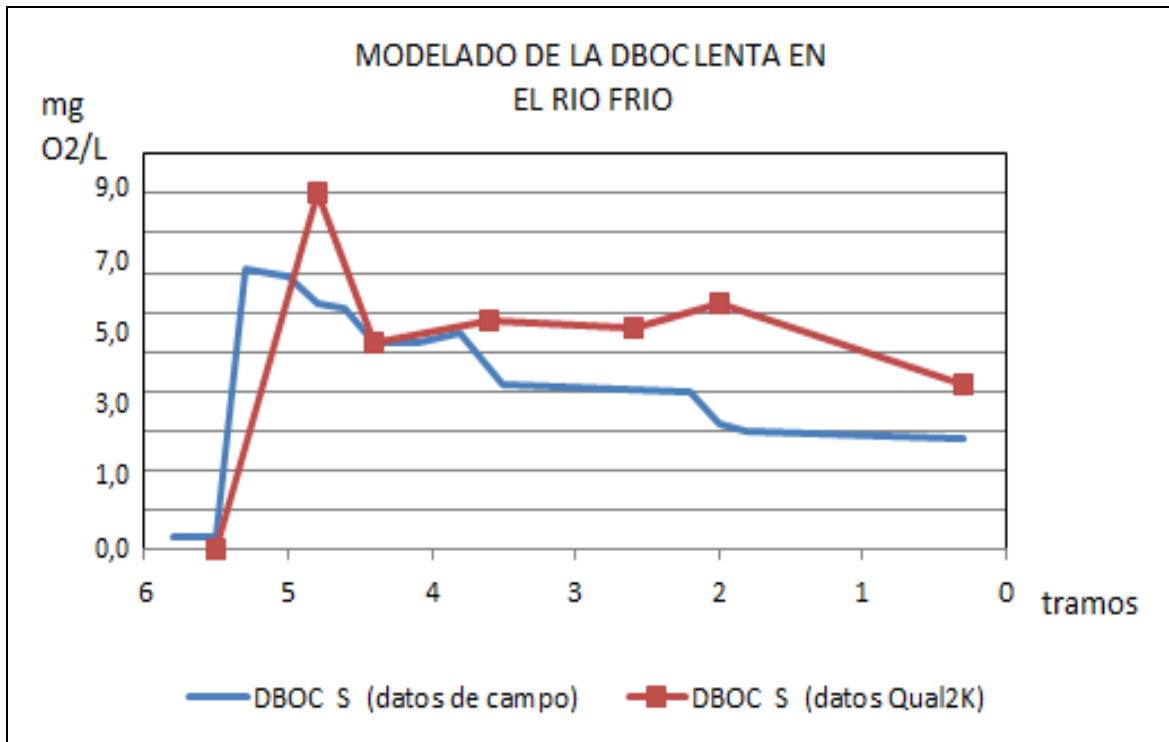


Los ríos impactados por materia orgánica permiten un máximo de DBO de 6 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>. y DQO de 30 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> para uso doméstico o pecuario. La DBO<sub>5</sub> completa, sin inhibir en promedio en el río aguas abajo del primer vertido fue de 130 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> y La DQO se fijó en promedio de 450 mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> especialmente en los tramos de totumos y caneyes, es decir un 10% más de lo establecido en la norma.

**Gráfica 4. Modelado de DBOC Rápida. Resultados vs. Simulación**



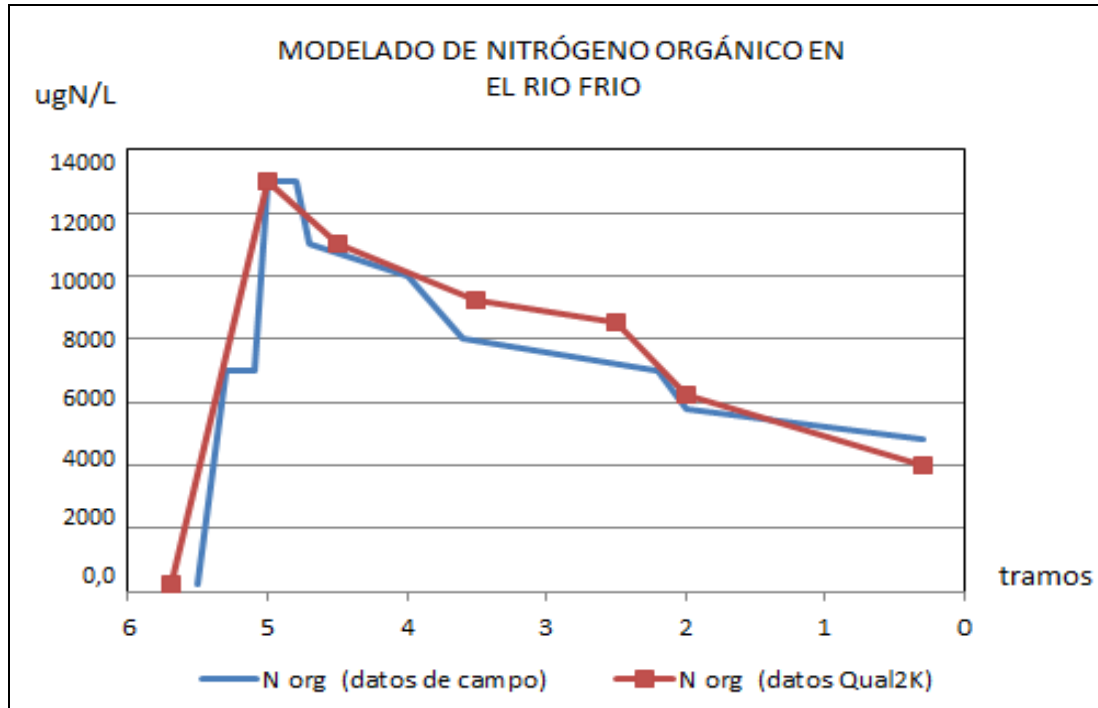
**Gráfica 5. Modelado de DBOC Lenta. Resultados vs. Simulación**



El IDEAM, propone la presencia de nitrógeno amoniacal en ríos para uso doméstico en concentraciones de 0,04 mgNL-1, 10 mgNL-1 como nitritos y 1 mgNL-1 como nitratos. El nitrógeno total promedio en los ríos en Colombia es de 65 mgNL-1, de los cuales 43,4 mgNL-1 como nitrógeno orgánico y 21,6 mgNL-1 nitrógeno amoniacal.

Comparando estos datos con la situación de Río Frío, según se muestra en la Figura 15, es posible establecer una concentración moderada de nitrógeno orgánico en el canal mezclado, ya que la máxima concentración en Río Frío es de 14 mgNL-1, pero aun así ésta cantidad es muy alta para el impacto.

**Gráfica 6. Modelado de Nitrógeno Orgánico. Resultados vs. Simulación**



El tramo I es el único de los siete existentes en canal, que mantiene una carga orgánica aproximada de 30 veces inferior ( $C_f = 2 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ ,  $N \text{ org} = 0,6 \text{ mgNL}^{-1}$ ).

Existe una temperatura media en todo el segmento de  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , erosión y baja pendiente ( $<1\%$ ), en particular en los tramos V y VI, esto permite una mayor evaporación, desoxigenación y menor reaeración ( $< 5\text{d}^{-1}$ ), lo cual es negativo para un río de montaña.

El sistema hidrogeométrico del segmento hidráulico modelado, presenta una alta rugosidad con un promedio de 0,13 de coeficiente manning y una profundidad media de 0,6 m. La velocidad media registrada es  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  y el balance hidráulico se evaluó en  $2,03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con una ganancia  $1,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  generadas por vertidos domésticos clandestinos y difusos.

El modelo Qual2k V2.07, logra simular con una parametrización promedio de  $R^2 = 0,9$ , esto indica que el modelo se adecua a las condiciones de modelamiento dinámico en estos ríos de montaña de alta rugosidad y baja profundidad.

Las variables más ajustadas son el oxígeno disuelto, la DBOC rápida, el nitrógeno total, el amonio y los coliformes fecales con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) promedio de 0,97.

La materia orgánica particulada presente en el río, se valida en una concentración promedio de  $50 \text{ mgL}^{-1}$  con un registro elevado ya que representa un 60% de la DBOC rápida es decir el carbono orgánico fácilmente soluble en el agua.

## 5. CONCLUSIONES

La investigación arrojó interesantes resultados con respecto a la generación de una herramienta eficaz para el diagnóstico de calidad del agua en ríos.

El modelo se evaluó encontrando gran aplicabilidad en los ríos con alta rugosidad en el sedimento y efectos de erosión y evaporación. Inicialmente se identificaron las variables de entrada del modelo con las se simula las determinantes de calidad como el carbono, nitrógeno, oxígeno disuelto, fósforo, sólidos, algas y patógenos en el perfil longitudinal del canal adoptado como de tipo manning, es decir (cauce trapezoidal) sin meandros ni saltos en el segmento del río.

El sistema hidrogeométrico, las variables meteorológicas y el comportamiento de la calidad del agua son variables definitivas para simular la degradación del oxígeno en el río.

El estudio de la simulación muestra como  $61,9 \text{ ton.d}^{-1}$  de carga orgánica vertidas por 383.000 habitantes de Floridablanca y Bucaramanga, acumulan en el río  $16,85 \text{ ton.d}^{-1}$  generando cambios en el balance del oxígeno disuelto como resultado del aumento del carbono y nitrógeno orgánico.

El modelamiento de la DBO condicionó la calibración de las tasas cinéticas y el estudio de la forma de transporte de la carga orgánica, basado en la aplicación de un trazador conservativo de cloruro de sodio NaCl, con el fin de validar el coeficiente de dispersión longitudinal, el tiempo de viaje y la capacidad de dilución del río.

## 6. RECOMENDACIONES

El uso del software Qual2k es aceptado para todo vertimiento en un efluente con condiciones estables en su recorrido como pendiente y caudal.

Los resultados evidencian la necesidad de vigilar la reducción de los impactos en los efluentes, aumentar los controles de los vertimientos, disminuir las concentraciones permitidas en razón a las continuas descargas o vertimientos a lo largo del efluente.

Teniendo en cuenta la afectación ambiental, se deben realizar modelamientos continuos a la calidad del río. Utilizando este modelo, se pueden realizar las simulaciones en períodos cortos.

Es necesario colocar indicadores ecológicos para moderar la carga orgánica de los vertidos, y de este modo lograr cierto control sobre las descargas que se realizan en forma continua al río.

Se recomienda establecer estrategias de mitigación del daño y del uso del agua en el Río Frío. Así mismo, junto con su aplicación, se debe realizar un seguimiento al plan que se adopte para verificar su eficiencia, o de ser necesario, hacer las modificaciones pertinentes.

## BIBLIOGRAFIA

- CHAPRA, S. C., Surface Water-quality Modeling, 850 P, New York, 1997
- CHAPRA, S.C., Pelletier. G.J y Tao H., Documentation and User's Manual. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. Versión 2.07: [en línea] Disponible en:  
<http://www.epa.gov/ATHENS/wwqtsc/html/qual2k.html>
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua. 2a versión, Bogotá D.C., Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios
- OMM, Guía de Prácticas Hidrológicas 168: [en línea] Disponible en:  
<http://www.inamhi.gov.ec/educativa/WMOSPA.pdf>