Simulación de La Calidad del Agua en La Quebrada Chapal
UNA APLICACIÓN DEL MODELO QUAL 2K

Por Gloria Lucía Cárdenas Calvachi
Ingeniera Química
Profesor Asistente, Universidad Mariana
glucardenas@umariana.edu.co

Francisco Mafla Chamorro
Ingeniero Sanitario
Profesor Asistente, Universidad Mariana
fmaffla@umariana.edu.co

Mery Liliana López Martinez
Bióloga
Profesor Asistente, Universidad Mariana
mlopez@umariana.edu.co

Claudia Lorena Duque Villa
Ingeniera Sanitaria
Directora Ingeniería Ambiental,
Universidad Mariana
duque@umariana.edu.co

Fecha de recepción: Diciembre 4 de 2008
Fecha de aprobación: Febrero 27 de 2009

RESUMEN

Los modelos matemáticos son técnicas que permiten representar y simular situaciones reales, dentro de una franja de incertezas, inherente al conocimiento técnico-científico. Específicamente, un modelo matemático de calidad de agua debe ser visto como una herramienta valiosa para evaluar las alternativas propuestas por los planificadores del recurso hídrico, y cuestionadas por la población.

El estudio de simulación de la calidad del agua de la quebrada Chapal se hizo como un ejercicio académico, previo al ejercicio de modelación definitivo del Proyecto en el río Pasto (fase II) actualmente en proceso, utilizando el modelo Qual2K versión 2.04 (2007), desarrollado por la EPA, de muy amplio uso en estudios de modelación de calidad, el cual es desarrollado considerando flujo estacionario, simulación unidimensional y bajo ambiente Windows.

Este estudio es importante porque al ser el principal afluente del río Pasto, recibe una gran carga contaminante proveniente de descargas de aguas residuales domésticas e industriales de la ciudad. Para ello se necesitó la incorporación de información confiable al modelo, con el fin de que las diferentes salidas se aproximen a la realidad. La confiabilidad de los datos se trabajó con la estandarización de metodologías, intercalibración de los laboratorios participantes, y desarrollo de muestreos siguiendo los protocolos recomendados. La información de entrada, esencia del estudio, requiere de datos como: condiciones aguas arriba de los tramos a simular, características físicas e hidráulicas de la corriente, constantes de reacción físicas y químicas, y datos correspondientes a aportes y abstracciones de la corriente principal (puntuales y difusas).

PALABRAS CLAVE

Calidad de agua, Calibración, Simulación, Qual2K, Quebrada Chapal

ABSTRACT

Mathematical model is a representation of the essential aspects of an existing system which presents knowledge of that system in a usable form. It involves technical and scientific knowledge. Specifically, *a mathematical model* of the *water quality* management should be seen as a valuable tool for evaluating alternative proposals for water resource planners, and questioned by the population.

The simulation study of water quality in Chapal Lake was carried on as an academic exercise, prior to the modeling exercise of the final project in Pasto River

(II). Currently in the process is the use of the model QUAL2k version 2.04 (2007), which was developed by the EPA, and used very widely in modeling studies of quality, which are developed considering stationary flow, low-dimensional simulation, and the use of environmental variables windows .

This study is very important because the Chapal Lake is the main tributary of the Pasto River and heavy pollutants discharge from domestic and industrial waste water in the city. This requires reliable information to carry out the process. The reliability of the data was studied using standardized methods, inter-laboratory or *inter-calibration* methods, which require use of the following data: water conditions physical and hydraulic characteristics of flow, physical and chemical reaction data for input and abstractions of the mainstream (point and diffuse).

KEY WORDS

River system; Water quality management; Pollution control; Computer simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La preservación de los sistemas hídricos y de la calidad de sus aguas es una constante preocupación para los investigadores que buscan mitigar las consecuencias de la acción humana sobre el medio ambiente. La multiplicidad de usos de los recursos hídricos, asociada a una característica de recurso natural renovable y también finito, define un escenario que refleja una gran complejidad de relaciones para su preservación.

La política nacional de conservación de los recursos naturales establecida en Colombia, es una importante herramienta legal para la gestión en la conservación de los cursos de agua, y como apoyo a este propósito surgen los modelos matemáticos o programas computacionales, los cuales son utilizados como soporte en la decisión entre alternativas de gestión o uso, o como agentes facilitadores en este proceso.

Los modelos matemáticos son técnicas que permiten representar alternativas propuestas y simular condiciones reales que podrían ocurrir dentro de una franja de incertezas, inherente al conocimiento técnico-científico. Estos modelos se proponen explicar las causas y efectos de los procesos en el medio ambiente, diferenciar las fuentes antrópicas de las fuentes naturales de contaminantes, evaluar la eficiencia de los programas de gestión ambiental, determinar un tiempo o una distancia de recuperación de un cuerpo de agua con el objeto de implementar un programa de reducción de contaminantes, entre otras.

Un modelo matemático de calidad de agua debe ser visto como una herramienta valiosa para evaluar las alternativas propuestas por los planificadores y cuestionadas por la población. La evaluación de la calidad de agua en sistemas complejos, involucra el conocimiento de todos los procesos y ecosistemas de los cuales dependen, lo cual es fundamental para que los resultados de los modelos sean representativos y puedan ser evaluados de forma adecuada.

La quebrada Chapal, también denominada quebrada Miraflores, tiene su nacimiento en el Volcán Galeras, y es el principal afluente del Río Pasto. Su estudio es importante porque esta quebrada recibe en su recorrido las descargas de la zona industrial de Catambuco y del suroriente de Pasto, pasa por el parque ambiental y recreativo "Chapalito", uno de los más importantes para los habitantes de la ciudad, atraviesa la ciudad de sur a suroriente recibiendo el agua residual de un importante número de barrios de las comunas 2 y 5 de la ciudad, y se canaliza en el sector del estadio Libertad, pasando por la Avenida Las Lunas y Av. Chile, constituyéndose en un eje dinamizador de trascendencia y desemboca en el río Pasto a la altura del Hospital Departamental.

El estudio de simulación de la calidad del agua de esta quebrada se hizo como un ejercicio académico, para determinar las entradas importantes y definitivas que se tendrían en cuenta cuando se realice la Modelación del río Pasto en la fase II. Se utilizó el modelo Qual2K versión 2.04 (2007), desarrollado por la EPA, de muy amplio uso en estudios de modelación de calidad, el cual es desarrollado considerando flujo estacionario, simulación unidimensional y bajo ambiente Windows.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 HERRAMIENTA DE MODELACIÓN

Los modelos matemáticos o programas computacionales, son actualmente utilizados como soporte en el proceso de decisión entre alternativas de gestión o uso, o como agentes facilitadores en el mismo. Estos modelos se proponen explicar las causas y efectos de los procesos en el medio ambiente, diferenciar las fuentes antrópicas de las fuentes naturales de contaminantes, evaluar la eficiencia de los programas de gestión ambiental, determinar un tiempo o una distancia de recuperación de un cuerpo de agua con el objeto de implementar un programa de reducción de contaminantes, entre otras.

Un modelo matemático de calidad de agua debe ser visto como una herramienta valiosa para evaluar las alternativas propuestas por los planificadores y cuestionadas por la población. La evaluación de la calidad de agua en sistemas complejos, involucra el conocimiento de todos los procesos y ecosistemas de los cuales dependen, lo cual es fundamental para que los resultados de los modelos sean representativos y puedan ser evaluados de forma adecuada.

Para el desarrollo de este proyecto, el modelo seleccionado fue el "River and Stream Water Quality Model- Qual2K" versión 2.04, desarrollado por la división de investigación en ecosistemas de La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos EPA [1], el cual se caracteriza por aspectos como: modelación unidimensional (en dirección del flujo de la corriente); cauce o canal considerado vertical y horizontalmente bien mezclado; condiciones hidráulicas en estado estacionario y flujo simulado bajo condiciones uniformes; simulación de sistemas hídricos de tipo dendrítico, es decir; aquellos donde la simulación se extiende no solo a la corriente principal, sino también a corrientes tributarias; simulación de los siguientes parámetros: Conductividad, Sólidos Suspendidos Inorgánicos, Oxígeno Disuelto, DBO rápida, DBO lenta, Nitrógeno Orgánico Disuelto, Nitrógeno Amoniacal, Nitratos, Fósforo Orgánico Disuelto, Fósforo Inorgánico, Fitoplancton (algas en el seno de la corriente), Detritus (Materia Orgánica Particulada), Patógenos, Alcalinidad, Carbono Orgánico Total, Algas de fondo, pH, Temperatura y Caudal; introducción de entradas puntuales y no puntuales de cargas contaminantes y caudales; desarrollo en ambiente Windows, cálculos de tipo numérico programados en Fortran 90, interfase gráfica en Excel y operaciones con el usuario bajo Microsoft Office macro language: Visual Basic For Applications; corriente representada como una sucesión de pequeños tramos o segmentos llamados elementos computacionales, a través de los cuales se efectúan los correspondientes balances de masa, flujo y calor y que pueden ser de tamaños distintos; utiliza dos formas para representar el carbono orgánico: DBO rápida (o materia orgánica degradable rápidamente) y DBO lenta (o materia orgánica degradable lentamente); simula condiciones de anoxia reduciendo a cero las tasas de oxidación que implica que la desnitrificación sea modelada como una reacción de primer orden; tiene en cuenta interacciones entre los sedimentos y el agua; simula la influencia de las algas de fondo; la extinción de la luz en la corriente es simulada como una función de la concentración de algas, detritus y material inorgánico; el pH del río es calculado con base en alcalinidad y carbono inorgánico total disponible a través de la corriente y la remoción de patógenos es determinado como una función de la temperatura, la luz y la sedimentación [2].

La simulación de una corriente hídrica exige la incorporación de información confiable al modelo, con el fin de que las diferentes salidas se aproximen con lo que se requiera representar. Entre las principales entradas contempladas en el software, se encuentran: condiciones aguas arribas del tramo o los tramos a simular, características físicas e hidráulicas de la corriente, constantes de reacción físicas y químicas, y datos correspondientes al aporte y abstracción de diferentes fuentes sobre la corriente principal, entre las cuales se contemplan las descargas tanto puntuales como difusas sobre dicha corriente.

Dentro de las condiciones aguas arriba del tramo o tramos a simular se contempla el caudal y las características físico-químicas del agua del río en el punto inicial de los tramos en consideración como: Temperatura, Conductividad, Sólidos Inorgánicos, Oxígeno Disuelto, DBO rápida, DBO lenta, Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Amoniacal, Nitratos, Fósforo Orgánico, Fósforo Inorgánico, Fitoplancton, Detritus, Patógenos, Alcalinidad y pH.

Dentro de las características físicas e hidráulicas de la corriente se contempla la incorporación de información relacionada con la determinación de tramos, longitud y cota de los diferentes elementos computacionales, caracterización hidráulica de cada elemento utilizando las curvas de relación "Velocidad media vs. Caudal" y "Profundidad media vs. Caudal" o las relaciones de Manning dependiendo el caso [1].

En cuanto a las constantes de reacción físicas y químicas, se incluyen las tasas de degradación o aparición de diferentes componentes, producto de las diferentes reacciones dadas en el proceso, lo cual es representado por medio de diferentes coeficientes tales como: reaireación, oxidación e hidrólisis de la materia orgánica, hidrólisis de Nitrógeno orgánico, oxidación de nitrógeno amoniacal, desnitrificación, hidrólisis de Fósforo Orgánico, disolución de Detritus y decaimiento de patógenos principalmente.

Los diferentes aportes o abstracciones sobre la corriente a simular pueden ser puntuales o difusos. Los aportes y abstracciones puntuales tales como: bocatomas, quebradas o descoles de alcantarillado, se puede especificar el sitio exacto donde ocurren. Las descargas o abstracciones difusas se manifiestan como una serie de pequeñas descargas que no pueden caracterizarse una a una, a lo largo de un tramo en el río, del cual debe especificarse su longitud. En los dos es necesario ingresar las características físicoquímicas de las mismas

Una vez incorporada la información de entrada al modelo y realizado su respectivo procesamiento, el software reporta un registro de resultados en forma gráfica y numérica, especificando la concentración de las diferentes variables a lo largo de la corriente

2.2 ÁREA DE ESTUDIO

La quebrada Chapal tiene su nacimiento en las faldas del sistema volcánico Galeras, en la unión de la quebrada Hato Viejo y la quebrada Pisisiqui. (Ver Figura 1). El área de la cuenca hidrográfica es de 71,12 Km² y su cauce principal tiene una longitud de 11,99 Km [3].

En cuanto a los usos del suelo, en el tramo superior se presenta una explotación agropecuaria de tipo minifundista donde predominan cultivos de papa, zanahoria, cebolla, maíz y hortalizas. Frente a la carencia de servicios públicos de calidad, la comunidad se ve obligada a intervenir el sistema ecológico lo que se percibe con la expansión de fronteras agrícolas sobre zonas de importancia para el mantenimiento de las fuentes hídricas. En el tramo inferior, la quebrada recibe descargas de industrias, moteles y alcantarillados de algunos corregimientos y barrios de las comunas 2 y 5 de Pasto, atraviesa el parque "Chapalito", y se canaliza en el sector del estadio Libertad, pasando por las Avenidas Las Lunas y Chile [4]. El uso de suelo en este tramo se vuelve netamente urbano, caracterizado por una alta densidad de población y por ser una zona de futura expansión de la ciudad.

Con relación a la morfología y según Schumm [5], se puede clasificar como un canal tipo carga suspendida en la parte alta, en el tramo quebrada Aserradora - quebrada Botana y como un canal de carga mixta, en el tramo quebrada Botana - desembocadura en el río Pasto.

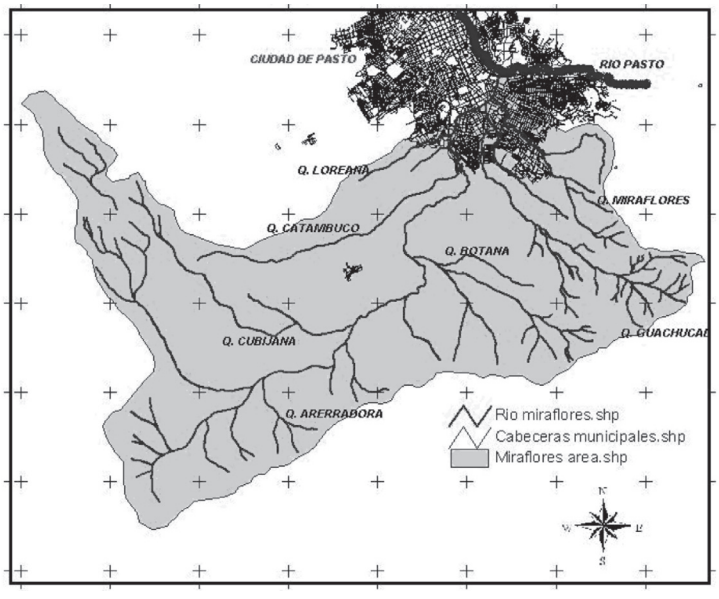

Figura 1. Identificación de la Quebrada Chapal
Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

La quebrada Chapal tiene pendientes que oscilan entre el 7% en el sector conocido como Turupamba y el 1% en la zona urbana. Según la clasificación por pendientes propuesta por Roseen [5], la quebrada Chapal se considera como tipo A en el tramo quebrada Aserradora - canalización en el Estadio Libertad, y de tipo C desde la canalización en el Estadio Libertad hasta su desembocadura en el río Pasto.

2.3 DATOS Y SITIOS DE MONITOREO

Se fijaron un total de 25 puntos de monitoreo que cubren la totalidad de la Quebrada Chapal, basados en el esquema de modelación (Figura 2); su ubicación, tipo y las actividades llevadas a cabo en cada uno de ellos se presentan en el cuadro 1

Cuadro 1. Puntos de monitoreo Quebrada Chapal

No.	Punto de monitoreo	Tipo	Actividades de monitoreo
1	Unión Q. Hato Viejo – Q. Pisisiqui.	Descarga agua residual	Aforo con micromolinete y muestreo.
2	Quebrada Aserradora	Quebrada o arroyo	Aforo con micromolinete y muestreo
3	Puente uno después Q. Aserradora	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
4	Puente dos después Q. Aserradora	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
5	Antes de la Bocatoma Turupamba	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
6	Después de la Bocatoma Turupamba	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
7	Q. Cubijana	Quebrada o arroyo	Aforo volumétrico y muestreo
8	Puente después Q. Cubijana	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
9	Descarga Botanilla 1	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
10	Q. Botana	Quebrada o arroyo	Aforo con micromolinete y muestreo
11	Descarga Botanilla 2	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
12	Descarga Alcantarillado de Catambuco	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
13	Puente antes descarga de moteles	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
14	Puente después descarga de moteles	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
15	Descarga Pollo al Día	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
16	Puente después descarga Pollo al Día	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
17	Descarga B. Los Cristales 1	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
18	Descarga B Los Cristales 2	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
19	Q. Catambuco	Quebrada o arroyo	Aforo volumétrico y muestreo
20	Puente después Q. Catambuco	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo
21	Colector Q. Loreana	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
22	Puente después Q. Loreana	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolin. y muestreo
23	Colector Quebrada Guachucal	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
24	Colector Barrio Miraflores	Descarga agua residual	Aforo volumétrico y muestreo
25	Puente después de Colector Barrio Miraflores	Sobre la Quebrada	Aforo con micromolinete y muestreo

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

Los parámetros de calidad evaluados en campo fueron: conductividad con un conductímetro portátil y pH y temperatura con un pHmetro de campo. En el laboratorio de Corponariño fueron evaluados: Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 y Demanda Química de Oxígeno (DQO) y en el laboratorio de la Universidad Mariana: Acidez, Alcalinidad, Sólidos totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniaco, nitrógeno orgánico, nitrógeno nitrato, Fósforo total, Fósforo disuelto total, Coliformes Totales y Coliformes Fecales.

La velocidad se determinó con un estudio o prueba de trazadores, utilizando Cloruro de Sodio como trazador por sus propiedades conservativas, bajo costo y facilidad de medición a través de la conductividad. Los puntos de medición se seleccionaron de manera que garanticen una longitud mínima para lograr mezcla completa y que no existan efluentes ni afluentes entre los puntos de medición y el punto de inyección en lo posible [6].

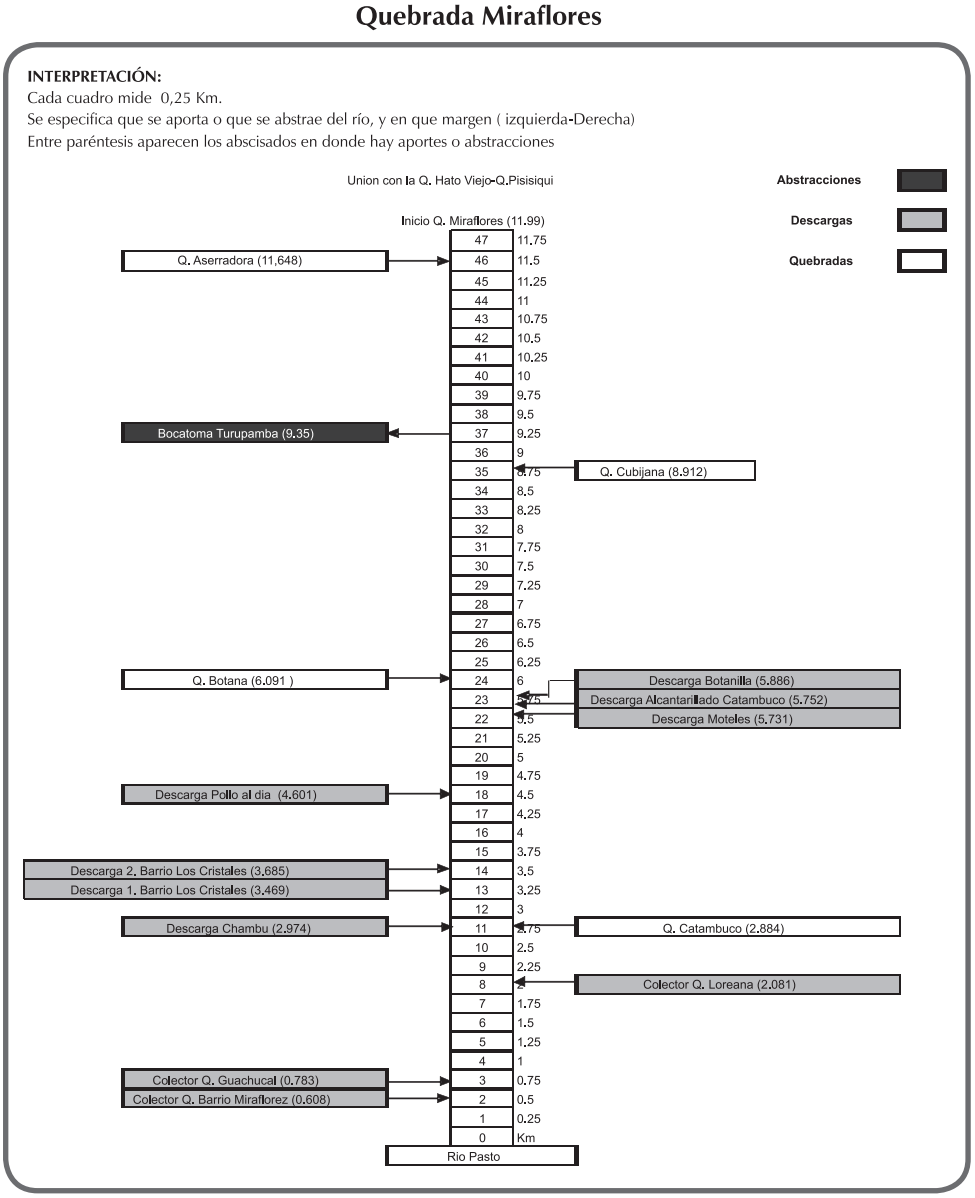

Figura 2. Esquema de modelación Quebrada Chapal
Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

El régimen estacionario del modelo Qual2K hace que el análisis de las condiciones de la calidad de agua de la corriente debido a las variaciones de flujo sea analizado con base en una curva de permanencia de caudales. Dicha curva tiene como objeto proporcionar al modelo diferentes caudales asociados a escenarios de escasez y abundancia del recurso, lo cual influencia de una forma u otra la características de la calidad de agua de las fuentes hídricas en estudio. Las curvas de permanencia construidas se incorporaron como condiciones iníciales de la corriente y de sus principales tributarios. Específicamente la metodología utilizada consistió en la determinación de una curva regional, comparando las curvas normales de permanencia, utilizando caudales diarios de los años de registro disponibles de las tres estaciones hidrométricas del IDEAM: Centenario, Universidad de Nariño y Providencia, debido a que no se cuenta con estaciones que monitoreen caudales en cuencas próximas y con similares características a la cuenca en estudio. La semejanza en el comportamiento de estas curvas de permanencia hace que cualquiera de las anteriores, pueda ser utilizada para la determinación de la curva regional, sin embargo, la curva seleccionada fue la correspondiente a la de la estación Centenario, debido a la similitud de dicha cuenca con la de las diferentes cuencas donde será utilizada la curva regional.

El modelo unidimensional Qual2k representa una corriente hídrica superficial como una serie de elementos computacionales, los cuales transfieren información relacionada con el flujo en forma consecutiva, lo cual es descrito por variables tales como la velocidad y el tirante, entre otros. Para determinar las características o relaciones hidráulicas que definen el comportamiento hidráulico de la Quebrada Chapal se utilizan las curvas de relación para secciones irregulares y las ecuaciones de Manning para el tramo urbano canalizado.

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

3.1 ACTIVIDADES PREVIAS

Antes de realizar la jornada de muestreo en la quebrada Chapal y de ingresar los datos en el modelo computacional, fue necesario realizar unas actividades previas como: estandarización de las metodologías de análisis, intercalibración de laboratorios participantes, prueba de trazadores y determinación de la curva de permanencia regional de caudales y de las características o relaciones hidráulicas que definen el comportamiento hidráulico de la Quebrada Chapal.

En la estandarización de metodologías, se adaptaron los "Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales" [7] traducción del "Estandard Methods for the examination of Water and Wastewater, 17 Edition" para un total de 18 parámetros, 6 clasificados como propiedades físicas y de agregación, 8 como constituyentes inorgánicos no metálicos, 2 como componentes orgánicos y 2 como microbiológicos. Las propiedades físicas y de agregación son: acidez, alcalinidad, conductividad, residuos sólidos totales, residuos sólidos volátiles y temperatura. Los constituyentes inorgánicos no metálicos son: pH, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniaco, nitrógeno orgánico, nitrógeno nitrato, oxígeno disuelto, fósforo total y fósforo disuelto total. Los componentes orgánicos son: demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Los análisis microbiológicos son coliformes totales y coliformes fecales.

La jornada de intercalibración de laboratorios se realizó en Noviembre de 2007, entre los dos laboratorios participantes en el proyecto: el Laboratorio de la Universidad Mariana y el Laboratorio de Corponariño, tomando muestras de agua de diversas características (río no contaminado, río contaminado y agua residual doméstica) por duplicado pero rotuladas de forma diferente. Los dos laboratorios donde se hicieron los análisis, ignoraban por completo que las muestras iban por duplicado. La intención de esta jornada fue analizar la capacidad de los laboratorios de garantizar datos confiables y repetibles.

La prueba de trazadores, que permitió determinar la velocidad de la quebrada Chapal, se realizó en dos puntos, en la segunda semana del mes de junio del 2007. Los datos de velocidad obtenidos, se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2.
Velocidades de la corriente en la quebrada Chapal

Sitio	Velocidad (m/s)
Quebrada Aserradora	0.29
Quebrada Catambuco	0.38

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

Para el caso de la construcción de la curva de permanencia de la quebrada Miraflores, se utiliza la correspondiente a la estación Centenario como curva Regional, porque las condiciones de las sub-cuencas que conforman la cuenca Miraflores son similares a la parte alta de la cuenca del Pasto. En el cuadro 3, se presentan las diferentes curvas de permanencia generadas por medio de la curva regional y del criterio de Caudal medio diario (Qmd) asociado al área de las diferentes microcuencas perteneciente a la sub-cuenca de la quebrada Miraflores.

Cuadro 3. Curvas de Permanencia Afluentes Quebrada Miraflores

Permanencia	Botana	Guachucal	Cubijana	Guaico	Catambuco	Aserradora	Loreana
0.15	0.22	0.20	0.16	0.15	0.12	0.058	0.029
0.15	0.22	0.20	0.16	0.15	0.12	0.058	0.029
0.20	0.19	0.18	0.14	0.13	0.10	0.050	0.025
0.25	0.17	0.16	0.12	0.11	0.09	0.045	0.022
0.30	0.15	0.14	0.11	0.10	0.08	0.040	0.020
0.35	0.14	0.13	0.10	0.09	0.07	0.037	0.019
0.40	0.13	0.12	0.09	0.08	0.07	0.034	0.017
0.45	0.11	0.11	0.08	0.08	0.06	0.031	0.015
0.50	0.10	0.10	0.08	0.07	0.06	0.028	0.014
0.55	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05	0.026	0.013
0.60	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.024	0.012
0.65	0.08	0.08	0.06	0.06	0.04	0.022	0.011
0.70	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.021	0.010
0.75	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.019	0.010
0.80	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.018	0.009
0.85	0.06	0.06	0.04	0.04	0.03	0.016	0.008
0.90	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.014	0.007
0.95	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.012	0.006
1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.002	0.001

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

Dentro de las curvas de relación los parámetros a estimar corresponden a los coeficientes y exponentes de las relaciones Profundidad media vs. Caudal y de Velocidad media vs. Caudal y las relaciones geométricas y de pendiente propias de la ecuación de Manning. Los valores estimados de los coeficientes y exponentes de las curvas de relación para los diferentes sitios estudiados son mostrados en el Cuadro 4.

Cuadro 4.
Coeficientes Hidráulicos
Quebrada Miraflores

Sitio	H-Q		V-Q	
	Á	â	A	B
Aserradora	0.35	0.331	0.886	0.57
Calambuco	0.343	0.375	0.65	0.563

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

3.2 JORNADA DE MUESTREO

Para la calibración del modelo de calidad de agua en la quebrada Miraflores se realizó una jornada de muestreo el 15 de febrero de 2008 en una época de invierno moderado, con una comisión de apoyo de 3 personas, una comisión encargada de medición de conductividad de 2 personas y 3 comisiones que realizaron la toma de muestras y las mediciones a lo largo de la quebrada (ver cuadro 1), con 5 personas cada una. Con las muestras recolectadas se siguió el protocolo de conservación de la muestra y cadena de custodia o vigilancia para asegurar la integridad de la muestra [8] desde el momento de la toma hasta la entrega a los laboratorios correspondientes.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CABECERA DE LA CORRIENTE

El cuadro 5 presenta las características físico-químicas y microbiológicas de la corriente aguas arriba del tramo a modelar, en la unión de las quebradas Hato Viejo con Pisisiqui (Ver figura 4).

Cuadro 5. Características de la corriente aguas arriba del tramo a modelar

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	0.155	m^3/s
Temperatura	11.2	ºC
Conductividad	89.5	ìmhos/cm
Sólidos Inorgánicos	4.95	mg/L
Oxígeno Disuelto	6.2	mg/L
DBO rápida	3.9	mg/L
DBO lenta	14.1	mg/L
Nitrógeno Orgánico Disuelto	1360	ìg/L
Nitrógeno Amoniacal	40	ìg/L
Fósforo Orgánico Disuelto	55	ìg/L
Fósforo inorgánico Disuelto	55	ìg/L
Detritus	13.75	mg/L
Alcalinidad	20	mg $CaCO_3$/L
pH	6	unidades

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

3.4 DESCARGAS PUNTUALES Y DIFUSAS

Las descargas puntuales tomadas el día 15 de febrero del 2008 fueron las contempladas en la topología del modelo y se presentan en el cuadro 6.

El flujo de las cargas difusas se determinó con base en el balance de caudales entre dos puntos comprendidos al inicio y al final del tramo sobre la corriente. Las características fisicoquímicas y biológicas se asumieron con base en las propiedades del agua propias del sector, referidas a descargas puntuales próximas. En el cuadro 7 se presentan las principales características de dichas descargas.

3.5 DATOS DE CALIBRACIÓN

Para la calibración del modelo con la información de campo se utilizaron nueve puntos distribuidos a lo largo de la corriente, su ubicación y características se presentan en el cuadro 8.

3.6 CONSTANTES DE REACCIÓN

Los valores de las constantes de reacción fueron determinados mediante el proceso de ensayo y error. Los valores encontrados fueron:

Modelo de reaireación:
Owens & Gibbs (30 d-1 – 50 d-1)
Constante de Oxidación de la DBO rápida: 2 d-1
Constante de Oxidación de la DBO lenta: 2 d-1
Constante de Hidrólisis de la DBO lenta: 2 d-1
Constante de Hidrólisis de Nitrógeno Orgánico a NH3: 1 d-1
Constante de Oxidación de Nitrógeno Amoniacal: 0.5 d-1
Constante de Desnitrificación: 0.2 d-1
Constante de Hidrólisis de Fósforo Orgánico: 0,7 d-1
Constante de Disolución de Detritus: 0.05 d-1
Constante de Decaimiento de patógenos: 0.1 d-1

3.7 CAUDAL, PH, TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD Y SST

En la figura 6 se puede apreciar un buen ajuste del balance de caudales realizados por el modelo con los puntos tomados en la prueba de campo. Se evidencia un crecimiento paulatino del caudal con la distancia desde el nacimiento, a excepción del

tramo urbano Estadio Libertad - Hospital Departamental donde se encuentra un aumento súbito de caudal debido a las descargas del Box Guachucal y el Colector Miraflores principales afluentes de este tramo y del tramo Puente Bodega Concentrados del Sur – puente Guadalupe, en la parte superior de la corriente, donde el caudal disminuye debido a la presencia de la bocatoma Turupamba.

Con respecto al pH se puede apreciar que a lo largo de toda la corriente el valor tiende a ser neutro. La temperatura varia de forma incremental y constante a través del recorrido de la quebrada desde los 12ºC hasta 15ºC. El mismo comportamiento se aprecia con la Conductividad y con los Sólidos suspendidos totales debido a la continua descarga de aguas residuales a lo largo de toda la corriente. Existe un par de puntos sobre la corriente que no coinciden con lo pronosticado por el modelo, debido a errores en el proceso de estimación (Ver figura 3)

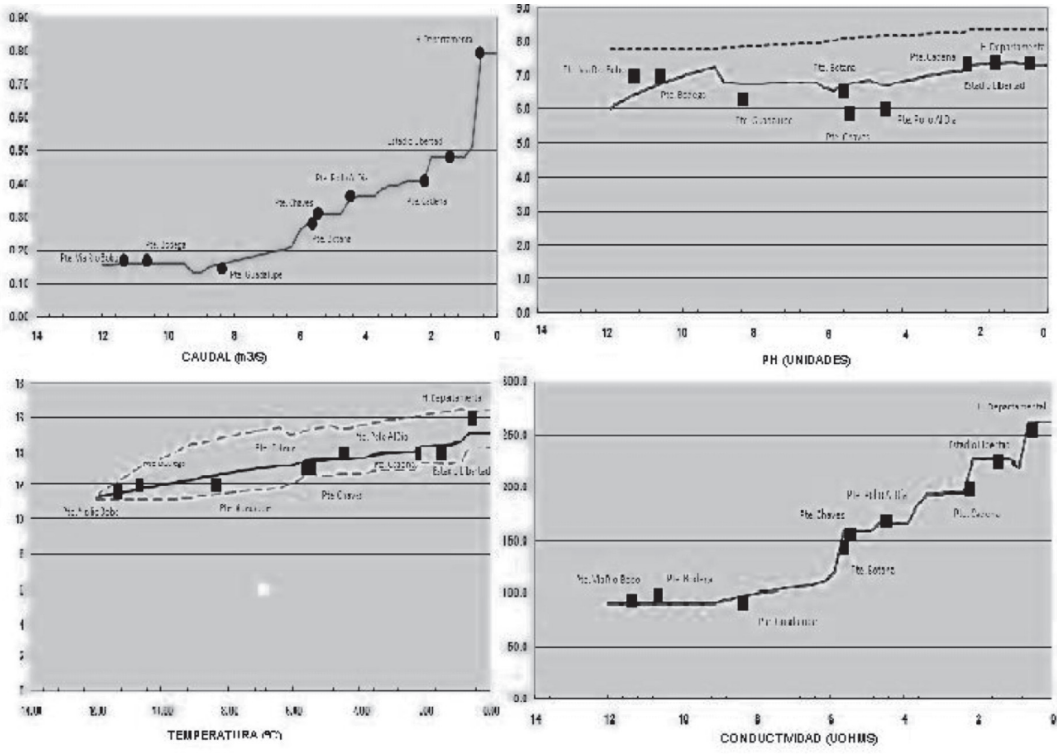

Figura 3. Calibración de Caudal pH, Temperatura, Conductividad - modelo Qual2k.
Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

3.8 OXIGENO DISUELTO, DBO, NITRÓGENO Y FÓSFORO

El oxígeno disuelto decae a medida que ingresan los diferentes tipos de descargas a lo largo de la quebrada Chapal. En la cabecera, se encuentran valores de 6 a 7 mg/L, valor cercano a la capacidad de saturación; en la cuenca media el oxígeno alcanza valores de 4,0 mg/L y en la zona urbana, llega a valores entre 1.5 a 2 mg/L en la desembocadura al río Pasto, producto de las descargas del colector Guachucal y Barrio Miraflores (Ver figura 4).

Cuadro 6. Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos de descargas puntuales

Punto	Ubic. Km	Q m^3/s	T ºC	pH	Conduc. umhos	DBO mg/l	DQO mg/l	OD mg/l	Alcalin. mg/L	Acidez mg/L	NO_3 mg/L	NH_3 mg/lt	P. Tot mg/l	P. Dis Mg/l	NTK mg/lt	ST mg/lt	SV mg/lt	Colif. E+04	
																		Tot.	Fec.
Q. Aserradora	11.65	0.017	11.5	7.0	92.5	3.3	<10	7.3	21	14	0.9	0.02	0.1	0.07	1.4	35	30	3.60	1.06
Q. Cubijana	8.91	0.012	12.2	7.0	104.6	3.8	24.0	6.2	32	14	0.2	0.14	0.17	0.17	2.8	160	30	2.30	0.3
Q. Botana	6.09	0.046	13.0	6.3	117.0	2.3	17.0	5.8	43	12	1.2	<0.05	0.19	0.31	4.2	174	58	1.50	30
Q. Catambuco	2.88	0.011	14.0	7.9	253.0	3.3	<10	5.4	97	18	0.3	0.07	0.67	0.76	5.6	440	105	1.90	0.05
Botanilla 1	6.23	0.000	14.0	5.7	300.0	525	4502	1.9	106	84	0.1	1.55	>5	6.05	58.8	3074	2698	155	0.39
Botanilla 2	6.89	0.003	15.0	6.0	266.0	525	4502	2.6	106	40	<0.5	1.56	1.85	2.03	9.8	437	243	55	0.23
Al. Catambuco	5.75	0.007	15.0	6.0	341.0	73.5	85.0	3.7	124	42	1.1	3.66	1.67	1.81	8.4	550	180	155E	0.32
Pollo al dia	4.60	0.006	16.6	7.0	689.0	570	840	0.3	259	162	<0.5	0.92	6.45	6.42	61.6	1245	1110	MNPC	MNPC
B. Cristales 1	3.47	0.012	15.0	7.3	488.0	41.6	70.0	2.3	263	118	<0.5	1.86	4.95	4.93	2.8	470	175	33	300
B. Cristales 2	3.69	0.021	16.0	7.0	488.0	204	328	0.8	128	86	0.4	2.33	4.73	4.53	2.8	500	180	9.60	2.30
C. Loreana	2.08	0.072	16.0	7.7	401.0	14.3	23.0	5.7	200	16	3.1	1.76	0.55	0.4	5.6	280	90	93	33
C. Guachucal	0.78	0.051	17.0	7.6	130.0	92.2	136	3.0	43	26	0.1	1.09	0.79	0.78	5.6	235	145	7700	100
C. B. Miraflores	0.61	0.280	16.0	7.4	338.0	315	448	1.5	84	116	1	1.63	3.16	2.93	9.8	430	285	2200	1200

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

Cuadro 7. Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos de descargas difusas

Localizac.		Q	Temp	Conduc	ISS	OD	DBOLta	DBORap	N.Org	NH_3	Nitrat	P.Org	P.Ino	Fito	Detrit	ColiT	Alc	pH
Km	Km	m^3/s	ºC	Umhos	mgD/L	mg/L	mgO_2/L	mgO_2/L	ugN/L	ugN/L	ugN/L	ugP/L	ugP/L	ug/L	mgD/L	cfu	mg/L	
8.91	5.75	0.0751	13.00	150.00	30.00	6.00	15.00	3.00	5000	50.00	1000	100	100	0.00	70.00	0.00	50	6.0
4.60	4.46	0.0460	13.00	150.00	30.00	6.00	15.00	3.00	5000	50.00	1000	100	100	0.00	70.00	0.00	50	6.0

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

Cuadro 8. Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos datos de calibración sobre la Quebrada Chapal

Ubicación	Q	T	pH	Conductiv	DBO	DQO	OD	Alcalin.	Acidez	NO_3	NH_3	P tot.	P Dis.	NTK	ST	SV	Coliformes E+04	
Km	m^3/s	ºC		umhos	mg/l	mg/l	Mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/lt	mg/l	mg/l	mg/lt	mg/lt	mg/lt	Totales	Fecales
11.34	0.160	11.6	6.5	93.8	3.2	17.0	6.9	22	12	1	0.09	0.13	0.1	1.4	60	20	2.27	0.95
10.63	0.160	12.0	7.0	98.0	3.9	14.0	6.3	23	12	1.3	0.06	0.13	0.11	1.4	345	110	1.91	0.34
8.36	0.220	12.0	6.3	92.0	7.9	18.0	6.7	29	14	25.4	0.05	0.13	0.21	1.5	1180	1028	0.19	0.007
5.60	0.278	13.0	6.5	143.0	50.2	84.0	5.2	54	24	1.2	0.94	0.76	0.64	5.6	245	105	204	44
5.44	0.310	13.0	5.9	156.0	142.5	200.0	3.6	34	22	0.1	0.65	1.39	1.1	5.6	334	194	140	21
4.46	0.316	14.0	6.0	169.0	58.5	91.0	4.2	68	22	0.7	0.56	0.67	0.7	5.6	222	94	113	400
2.20	0.406	14.0	7.3	199.0	14.1	40.0	5.0	74	28	0.6	0.99	0.72	0.7	4.2	305	200	1.20	4.00
1.44	0.479	14.0	7.4	224.0	30.0	76.0	3.4	81	32	0.3	2.17	0.82	0.87	2.8	320	120	136	122
0.31	0.793	16.0	7.4	254.0	148.0	248.0	1.6	90	52	1	3.22	2.04	1.95	5.6	325	120	3700	1500

Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

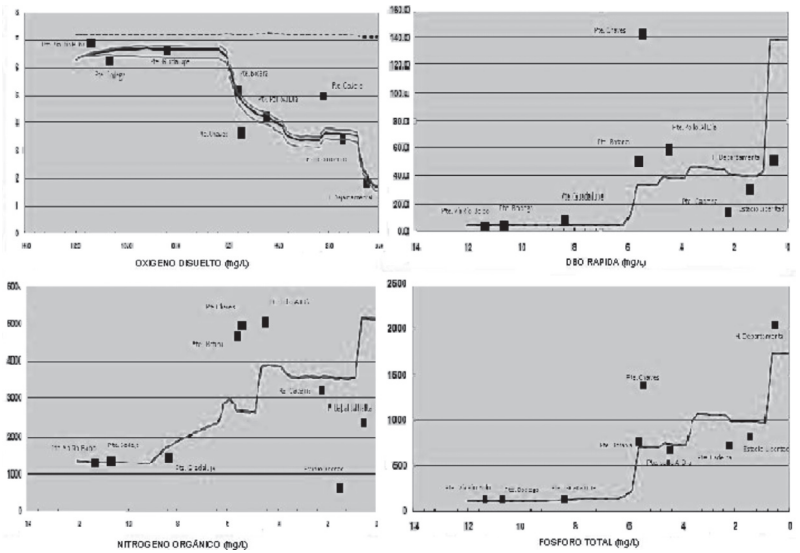

Figura 4. Calibración de Oxigeno Disuelto, DBO, Nitrógeno y Fósforo - modelo Qual2k.
Fuente: Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I", 2008

En cuanto a DBO y Fósforo, la cuenca alta de la quebrada Chapal hasta Botana, se caracteriza por una baja contaminación orgánica, lo que hace que se encuentren valores relativamente bajos. Esta condición cambia por las constantes descargas del corregimiento de Catambuco, incluyendo zona industrial y sector Botanilla y de numerosos vertimientos municipales. Los valores de DBO rápida llegan hasta niveles superiores de 100 mg/L y DBO Lenta de 50 mg/L. En Fósforo se llega a valores que superan los 2 mg/L (Ver figura 4).

Se encontraron contenidos bajos de nitrógeno orgánico y amoniacal, no mayores al 1 mg/L en la cabecera, hasta concentraciones superiores de 3 mg/L en la zona más baja. Sin embargo los datos de calibración no corresponden a los estimados, por lo cual se hace necesario revisar el procedimiento para la determinación del NTK (Ver figura 4).

3.9 COLIFORMES TOTALES

En términos generales este parámetro es de gran inestabilidad, justificado porque su determinación se hace por medio de un muestreo puntual. Dado esto, no existe una aceptable concordancia entre lo medido y lo estimado por el modelo.

4. CONCLUSIONES

Teniendo como base la información existente de la quebrada Chapal, y el análisis de la información requerida por el modelo, se procedió a complementar la información, obteniendo básicamente aspectos como el esquema o topología de modelación, determinación de las variables hidrológicas e hidráulicas de entrada al modelo, estado de la capacidad de los diferentes laboratorios de análisis de agua disponibles en el proyecto y optimización de los procesos de análisis y toma de muestras, encontrándose resultados satisfactorios en la mayoría de los casos.

El proceso de estandarización se realizó exitosamente obteniendo como resultado un manual basado en el Método Estándar (Versión 1998) y ajustado a las necesidades del proyecto, el cual fue debidamente incorporado por el laboratorio de la Universidad Mariana.

Con respecto a la intercalibración, los resultados encontrados fueron razonables a pesar de las diferencias encontradas en algunos de los parámetros. Este proceso fue válido y adicionalmente fue un procedimiento complementario con las pruebas de desempeño presentado por cada uno de los laboratorios.

Para la determinación de las variables hidrológicas del modelo se establecieron las curvas de permanencia con base en una curva normal y extrapolada con respecto al área, criterio que dio un buen grado de aproximación.

La obtención de información hidráulica se hizo con base en prueba de trazadores, los resultados encontrados fueron utilizados como base para la determinación del transporte de masa en las corrientes y esta a la vez para la determinación de las curvas de relación Altura-Caudal y Velocidad-Caudal, los valores encontrados se encuentran dentro del rango establecido en la literatura para las diferentes corrientes en estudio.

Los resultados dados por la calibración de la quebrada Chapal fueron aceptables, permitiendo calibrar el modelo de una forma razonablemente bien, los parámetros adecuadamente representados fueron Caudal, Temperatura, Conductividad, Sólidos Suspendidos Totales, Oxigeno Disuelto, DBO rápida, DBO lenta, NH_4, NO_3 y Fósforo.

Con respecto al Nitrógeno Orgánico el modelo no lo simuló adecuadamente, posiblemente por una inadecuada determinación del NTK en laboratorio.

Los coliformes Totales por su parte son una variable altamente inestable y al ser un muestreo puntual hace que la información tomada en campo difícilmente coincida con la estimada por el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] CHAPRA, S.C. & PELLETIER. QUAL2K: A Modeling Frameswork for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation ans Users Manual. Civil an Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medord, MA., in Steven. Chapra@tufts.edu.

[2] CHAPRA, S.C., PELLETIER, G.J. & TAO, H. (2005). QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.04: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.

[3] GRUPO DE INVESTIGACIÓN AMBIENTAL GIA (2008). Informe final del proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I". Universidad Mariana.

[4] SIGAM Y ALCALDÍA MUNICIPAL DE SAN JUAN DE PASTO (2004). Agenda Ambiental Municipal

[5] FARIAS, H.D. Memorias del Curso de Hidráulica Fluvial, Morfología y Estabilidad de Cauces. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

[6] KILPATRICK F.A. & WILSON JR. (1982). Measurement of Time Of Travel In Streams By Dye Tracing. USGS, Denver, United State.

[7] APHA, AWWA & WPCF (1989). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuals. 17ª Edición. Editorial Diaz de Santos S.A.

[8] CARDENAS, G.L. (2007). Estandarización de Análisis de aguas para el proyecto "Modelación del Río Pasto, una herramienta de planificación del Recurso Hídrico fase I" adaptadas del "Standard Methods 17 Edition" de la APHA, AWWA Y WPCF. Grupo de Investigación ambiental GIA, Universidad Mariana, 2008.