

LA PLANIFICACIÓN DEL RÍO PASTO

a partir de una modelación hidrodinámica

WATER QUALITY SIMULATION

Results from management planning of the Pasto River

Fecha de recepción: 8 de octubre de 2009

Fecha de aprobación: 29 de octubre de 2009

Por Gloria Lucía Cárdenas Calvachi

Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia
Especialista en Docencia Universitaria y Alta Gerencia,
Universidad de Nariño
Profesora Asistente. Facultad de Ingeniería. Universidad
Mariana
glucardenas@umariana.edu.co

Mery Liliana López Martínez

Bióloga, Universidad Nacional de Colombia
Especialista en Microbiología, Universidad Católica de
Manizales
Profesora Asistente. Facultad de Ingeniería. Universidad
Mariana
mlopez@umariana.edu.co

Francisco Ricardo Maffla Chamorro

Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle
Magíster en Hidrología, Universidad Nacional de Córdoba,
Argentina
Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería. Universidad
Mariana
fmafla@umariana.edu.co

RESUMEN

El Río Pasto es una fuente hídrica muy importante porque atraviesa la ciudad que lleva su mismo nombre, convirtiéndose en receptor de todas las aguas residuales generadas. En su parte alta abastece la planta de potabilización de la ciudad, lo que hace que todos los inconvenientes de calidad y cantidad aguas arriba de la bocatoma sean temas de gran importancia para los entes gubernamentales y la población en general.

La modelación del Río Pasto pretende convertirse en una herramienta apropiada para una planificación ordenada y holística del recurso hídrico, gracias a que permite representar alternativas propuestas y simular condiciones reales que podrían ocurrir dentro de toda una gama de posibilidades futuras, involucrando el conocimiento de todos los procesos y ecosistemas de los cuales depende el río en particular, lo cual es fundamental para que los resultados de la modelación sean representativos y puedan ser evaluados de forma adecuada.

PALABRAS CLAVES

Calidad de aguas, Simulación, Topología, Prueba de trazadores, Modelo Qual2Kw, Calibración, Escenarios futuros.

ABSTRACT

Pasto River is a very important water source because it crosses San Juan de Pasto becoming receiver of all wastewater generated. The upper basin supplies the

city purification plant, being the main reason of disadvantages of quality and quantity upstream from the intake, very important issues for the governmental entities and population.

Pasto river modeling tries to turn into an adapted tool for a tidy and holistic planning of the water resource, due to the fact that it allows to represent proposed alternatives and to simulate real conditions that might occur inside a range of future possibilities, involving the knowledge of all the processes and ecosystems on which the river especially depends, fundamental reason to evaluate the results of the modeling in a suitable form.

KEY WORDS

Water quality, simulation, topology, Tracer testing, Qual2Kw model, calibration, future sceneries.

INTRODUCCIÓN

El Río Pasto, aunque no es uno de los ríos más extensos y caudalosos del departamento de Nariño, es uno de los más importantes desde el punto de vista ambiental porque atraviesa el área del municipio en el que se asientan la ciudad de su mismo nombre y otros municipios aledaños que descargan sus aguas residuales en este importante recurso hídrico. Desde el punto de vista sanitario, es la principal fuente de abastecimiento de la planta de potabilización del Municipio de Pasto, que hace que todos los inconvenientes de calidad y cantidad aguas arriba de la bocatoma sean temas que cobran gran importancia para los entes gubernamentales y la población en general.

La modelación del Río Pasto surge como resultado de esta preocupación, que pretende convertirse en una herramienta apropiada para una planificación ordenada y holística de este recurso hídrico, de manera que se tenga en cuenta todos los aspectos técnicos necesarios para tomar decisiones acertadas y adecuadas a la individualidad del sistema, gracias a que la modelación permite representar alternativas propuestas y simular condiciones reales que podrían ocurrir dentro de toda una gama de posibilidades futuras, involucrando el conocimiento de todos los procesos y ecosistemas de los cuales depende el Río en particular, lo cual es

fundamental para que los resultados de la modelación sean representativos y puedan ser evaluados de forma adecuada.

Específicamente se ha propuesto evaluar diferentes alternativas o escenarios con el fin de realizar un pronóstico del cumplimiento de los objetivos de calidad del agua en el Río Pasto y de la normatividad vigente, para lo cual, actividades y obras como la construcción de una o más plantas de tratamiento de aguas residuales, el tiempo en el que se debe construir y el nivel y tipo de tratamiento necesarios de acuerdo al crecimiento poblacional e industrial de la región, serán tenidos en cuenta en los escenarios, teniendo como visión fundamental una gestión integrada del recurso hídrico.

La modelación del Río Pasto se ejecutó en dos fases: en la fase 1 se realizó la selección de la herramienta de modelación escogiéndose el "River and Stream Water Quality Model- Qual2K" versión 2.04. Se llevó a cabo el montaje del modelo con información primaria para la quebrada Chapal y se dejó planteado un esquema topológico y una propuesta metodológica para la modelación del Río Pasto en una segunda etapa. En la Fase 2 se aplicó el modelo a la Cuenca del Río Pasto desde su nacimiento hasta la confluencia con la Quebrada Juanambú, lo que permitió que los resultados de la modelación pudieran ser utilizados para intereses de Empopasto en la zona urbana y de Corponariño en toda la cuenca.

Esta modelación incluyó la adopción de una topología completa con descargas de aguas residuales, tributarios, quebradas y extracciones; la segmentación de los diferentes tramos; la selección de secciones de canales y de parámetros de entrada y coeficientes; la adopción y medición de los datos de caudales, velocidad, profundidad de flujo y dispersión longitudinal de contaminantes con parámetros como: Oxígeno Disuelto, Sólidos Suspendidos totales, Temperatura, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Orgánico Disuelto, NH₃ – Nitrógeno Amoniacal, NO₃ – Nitrógeno Nitrato, Fósforo Orgánico Disuelto, pH y Coliformes; el estudio de los diversos escenarios para caudales y condiciones de flujo y los correspondientes aportes de contaminación, destacándose las condiciones hidrológicas críticas de sequía y las condiciones normales de flujo. Todo esto tuvo como finalidad, obtener perfiles de calidad para cada escenario propuesto.

1. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la Modelación del Río Pasto se utilizó el modelo "River and Stream Water Quality Model- Qual2K" versión 2.07, desarrollado por la división de investigación en ecosistemas de La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos EPA. Adicionalmente se utilizó la Versión 5.1 del Qual2Kw por la posibilidad de aplicar algoritmos genéticos como metodología para la calibración, lo cual optimizó la diferencia entre las concentraciones observadas y las predichas.

En la recopilación y análisis de información se incluyó una revisión bibliográfica y la toma de información secundaria proveniente principalmente de entidades como Alcaldía de Pasto, Empopasto, Corponariño e IDEAM.

La topología definitiva de la modelación fue desarrollada mediante visitas de campo en las cuales se definió los puntos críticos de las jornadas de monitoreo y se formuló los siguientes criterios para la selección de sitios de muestreo:

- Las descargas de aguas residuales son tenidas en cuenta si hay representatividad desde el punto de vista de calidad de agua y de caudal.
- Las descargas que no son monitoreadas, son estimadas con los índices de contaminación por población, obtenida de los estudios históricos que ha realizado Empopasto, sobre sus principales colectores.
- Las quebradas afluentes a la fuente principal son aforadas y monitoreadas si su caudal medio es mayor a 10 Lps y que desde el punto de vista de calidad tengan un impacto sobre el Río.
- Las quebradas no aforadas ni monitoreadas son estimadas con curvas de permanencia para el caudal y con las características fisicoquímicas asociadas a una fuente superficial poco contaminada para calidad.

Con el propósito de garantizar la confiabilidad de los datos de laboratorio se realizó una jornada de intercalibración de los laboratorios de la ciudad de Pasto

que permitió el análisis de la capacidad y calidad de su desempeño.

La determinación de los coeficientes hidráulicos relacionaron la velocidad y la profundidad con el caudal, coeficientes necesarios cuando se utilizó la metodología "rating curves", recomendada para ríos de montaña con geometría irregular y presencia de cantos de gran tamaño como es el caso del Río Pasto. Se realizó Pruebas de trazadores en diferentes secciones del mismo.

En el tema hidrológico se tuvo en cuenta los requerimientos de un modelo para la simulación unidimensional y en régimen estacionario de la calidad de agua del Río Pasto, el cual necesitó adoptar diferentes caudales que reflejaran variados escenarios que muestren las diferentes condiciones hidrológicas que regirán las condiciones de calidad de agua. Para tal fin la metodología utilizada consistió en la determinación de una curva regional, basada en las curvas de permanencia de caudales medios diarios, utilizando los años de registro disponibles de las estaciones hidrométricas del IDEAM ubicadas en Centenario, Universidad de Nariño y Providencia, correspondientes al tramo superior, medio e inferior del Río Pasto respectivamente.

Las campañas de monitoreo necesitaron de la preparación logística previa que incluía la conformación de diferentes comisiones a las cuales se les asignó un determinado número de puntos de monitoreo de acuerdo a la complejidad de acceso. Las muestras fueron llevadas a los laboratorios escogidos por parámetro donde se realizó los análisis fisicoquímicos de calidad de agua correspondientes a las quebradas, descargas de aguas residuales, abstracciones y puntos de control, con los cuales se procedió a realizar el montaje y correr el modelo QUAL2Kw.

Posteriormente se realizó la calibración del modelo, después de la cual se procedió a ajustar las variables correspondientes hasta que la curva calculada por el modelo fuera lo más cercana posible a la realidad.

Finalmente, con el modelo calibrado, se llevó a cabo la propuesta de escenarios y el montaje de ellos en el QUAL2Kw. Estos escenarios fueron planteados teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en los términos de referencia, el PSMV, el Plan maestro de alcantarillado de Empopasto y criterios de vertimiento

dados por Corponariño, desde el punto de vista técnico y económico.

2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS

2.1 TOPOLOGÍA

La definición de la topología involucra conceptos como convergencia, conectividad y continuidad, donde diferentes nodos se muestran conectados entre sí. En la topología del Río Pasto se identificó los siguientes elementos: punto inicial, cauce principal, afluentes o descargas, abstracciones y punto final.

Para obtener una topología que refleje la situación actual del Río fue necesario revisar y analizar principalmente la información existente del material cartográfico de la cuenca, especialmente topografía e hidrografía, el cual fue complementado con información de poblaciones, infraestructura vial, nombres de ríos, quebradas, corregimientos, veredas, identificación de descargas, afluentes y abstracciones con su respectiva geo-referenciación y digitalización.

En el Río Pasto se tomó como punto de partida para la topología la desembocadura en el Río Juanambú. En la parte baja de la cuenca fueron creadas secciones de 500 metros debido a que las descargas de aguas residuales, quebradas y abstracciones son muy pocas y dispersas. En la parte media y alta el Río Pasto fue seccionado cada 200 metros para obtener una mayor apreciación en la gran cantidad de descargas de aguas residuales, quebradas y abstracciones que se presenta. El final de la topología corresponde al inicio del Río Pasto en la unión de las quebradas El Flautal, El Retiro y Las Tiendas.

2.2 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES HIDRÁULICOS

Por medio de un estudio o prueba de trazadores, se determina las características claves en una corriente, tales como la velocidad, el coeficiente de dispersión y la velocidad de decaimiento del contaminante. La prueba consiste básicamente en la inyección instantánea de una sustancia química, que se denomina trazador, en un punto determinado de la corriente, para posteriormente hacer mediciones periódicas de la concentración del trazador en dos puntos aguas abajo del

punto de inyección, que determina la variación en la dispersión del contaminante.

Para la buena realización de la prueba es necesario asegurar que:

- El trazador seleccionado sea conservativo y que su concentración pueda ser medida de manera fácil y confiable, por lo que se empleó como trazador la Rodamina WT, medido con el equipo calibrado de medición y análisis de cauces Inirida Deep Flow a través de la empresa Amazonas Technology. El equipo básicamente consta de un equipo de medición de conductividad y un fluorímetro, que consiste de una sonda que emite un haz de luz que permite determinar el nivel de fluorescencia en la muestra de agua, la cual es transformada a valores de concentración de Rodamina WT, en tiempo real. La cantidad de trazador utilizada debe garantizar que la concentración medida esté por encima de la concentración límite de cuantificación, correspondiente al límite de medición de los equipos. Esto se garantizó aplicando en cada punto entre 1 y 3 gramos por m³/s.
- Los puntos de medición son seleccionados garantizando una longitud mínima para lograr mezcla completa, para lo cual se utilizó la ecuación recomendada por Kilpatrick y Cobb¹, la cual permite calcular la distancia mínima a la que debe estar el primer punto de medición, cuando se tiene una descarga instantánea en el centro del canal. La distancia entre el primero y el segundo punto de medición está entre 50 y 100 veces el ancho medio del tramo.
- No existan efluentes ni afluentes entre los puntos de medición y el punto de inyección en lo posible.
- Thomann y Mueller (1987) recomiendan que las mediciones de las concentraciones deben ser

¹ KILPATRICK, F.A. & COBB, E.D. (1985). Measurement of discharge using tracers. Techniques of water – resources investigations of the United States Geological Survey. Book 3. Chapter A16. Washington D.C. USA.

realizadas hasta que la concentración de la cola de la curva Tiempo-Concentración haya disminuido hasta el 1% de la concentración máxima²

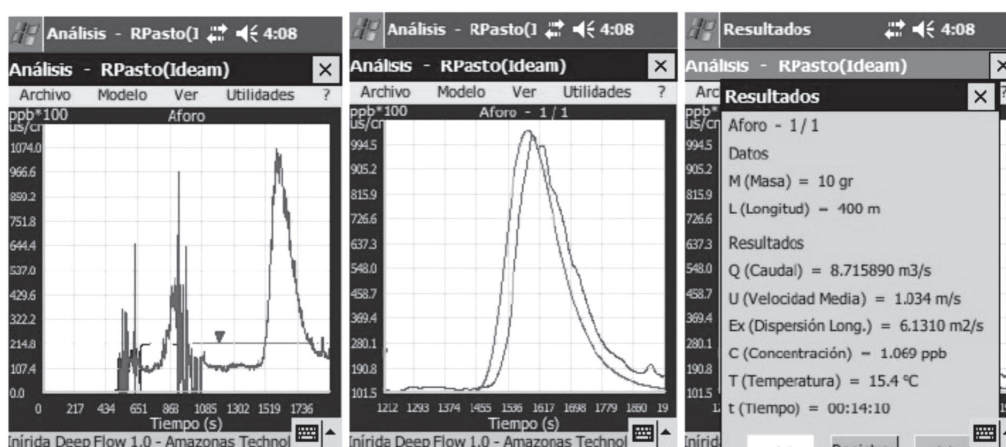
Con las consideraciones anteriores se escogió cuatro puntos sobre el Río Pasto: San Francisco en la cuenca

baja, Estación IDEAM y Hospital Infantil en el perímetro urbano y Flautal-Puente San Agustín en la cuenca alta. El cuadro 1 muestra los resultados obtenidos para todos los puntos y en la Figura 1 se muestra la gráfica obtenida con el equipo de medición para la prueba realizada en la estación IDEAM sobre el Río Pasto.

Cuadro 1. Resumen de resultados de campo obtenidos en la prueba de trazadores

Sitio de aplicación del trazador		Longitud (m)	Masa (gr)	Velocidad (m/s)	Caudal corregido (m³/s)
Río Pasto	San Francisco	660	10.0	0.754	7.308
	IDEAM	400	10.0	1.030	6.306
	Hospital Infantil	500	8.0	1.095	5.072
	Flautal	270	2.0	0.528	0.713

Figura 1. Representación grafica resultados prueba de trazadores Estación IDEAM



El modelo unidimensional Qual2k representa a la corriente hídrica superficial como una serie de elementos computacionales que transfieren información relacionada con el flujo en forma consecutiva, lo cual es descrito por variables tales como la velocidad y el tirante, entre otros, que definen el comportamiento hidráulico como curvas de relación, las cuales se pueden hallar sobre secciones irregulares y por medio de la selección de sitios representativos para, posteriormente, extrapolar estas condiciones a lo largo de todo el río.

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. Los valores estimados para los diferentes sitios estudiados son mostrados en el cuadro 2.

Con los datos de la prueba de trazadores se puede determinar las constantes empíricas (a , b , α y β) que permiten calcular las relaciones Velocidad Media de la Corriente (U) vs Caudal (Q) y Tirante o Profundidad Media (H) vs Caudal (Q) en los elementos computacionales, asumiendo la metodología de curvas de relación debido a las características de cauces irregulares. Las ecuaciones que rigen este comportamiento hidráulico son:

$$U = aQ^b$$

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

² HIBBS, D.E.; PARKHILL, K.L.; KENNETH, L. & GULLIVER, J.S. (1998). Sulfur Hexafluoride gas tracer studies in streams. In: Journal of Environmental Engineering. ASCE. Vol 124 No. 8, P 1-9

En el cuadro 2 se presenta los coeficientes y exponentes empíricos que fueron calculados para cada tramo del Río .

Cuadro 2. Coeficientes Hidráulicos del Río Pasto

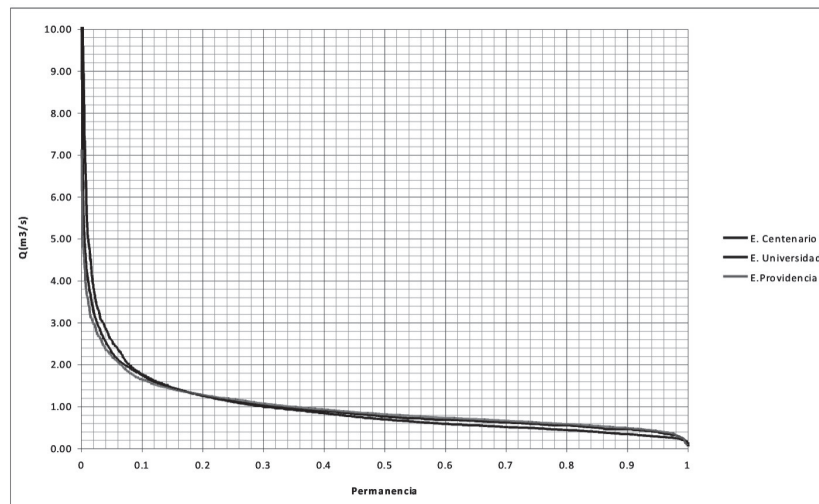
Sitio	Zona	H-Q		U-Q	
		α	β	a	b
Río Pasto	IDEAM – Desembocadura	0.197	0.524	0.456	0.434
	Bocatoma Centenario – IDEAM	0.139	0.518	0.643	0.284
	Nacimiento – Bocatoma Centenario	0.21	0.437	0.596	0.462
	Urbana	0.314	0.416	0.608	0.537

2.3 HIDROLOGÍA

El análisis hidrológico con miras a la modelación de calidad de agua del Río Pasto está enfocado a la estimación de caudales asociados a diferentes duraciones, los cuales van a regir los fenómenos de transporte de solutos y por ende la capacidad asimilativa y regenerativa de la corriente en estudio. Se basó en la determinación de curvas regionales de permanencia normalizadas, con base en la información de caudales medios diarios, utilizando los años de registro disponibles de las estaciones hidrométricas Centenario, Universidad de Nariño y Providencia, ubicadas en el tramo superior, medio e inferior del Río Pasto, respectivamente.

La curva de duración o curva de permanencia es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal (Q), como ordenada y el número de días del año (en % de tiempo) en que ese caudal es excedido o igualado, como abscisa. En la figura 2 se muestra las curvas de permanencia normalizadas de las estaciones Centenario, Universidad de Nariño y Providencia

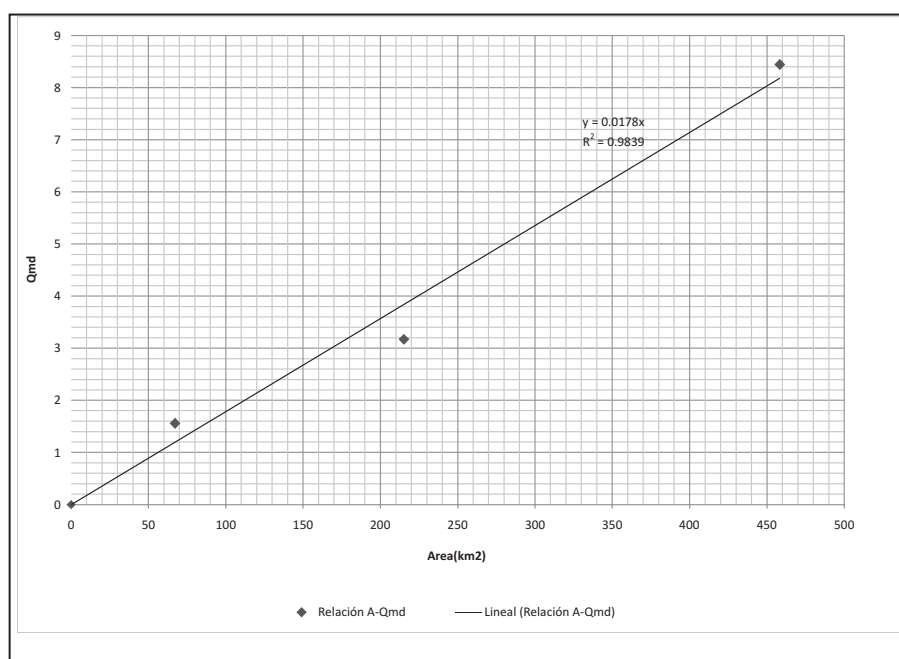
Figura 2. Comparación Curvas de permanencia en Estación Centenario, Universidad de Nariño y Providencia.



Analizando la gráfica, se puede afirmar que la semejanza en el comportamiento de las curvas de permanencia normales hace que cualquiera de ellas pueda ser utilizada para la determinación de la curva regional; sin embargo, la curva de la estación Centenario es la curva de permanencia normalizada más apropiada según el criterio de área semejante a las cuencas de extrapolación.

Posteriormente se extrapola esta curva regional con la relación obtenida entre el caudal medio diario de la cuenca con su correspondiente área de drenaje para las tres estaciones utilizadas, lo cual produjo un aceptable grado de correlación lineal entre dichas variables, obteniendo las diferentes curvas de duración para las distintas micro-cuencas que conforman el área en estudio (Figura 4).

Figura 4. Relación Área - Caudal medio en la cuenca del Río Pasto



Como la metodología de estimación de caudales con base en una curva de permanencia no se encuentra directamente relacionada con periodos de retorno, que tiene en cuenta la estimación de máximas y mínimas y no a la ocurrencia de eventos comunes, se hizo un análisis de relación entre máximas, mínimas y la permanencia de dichos caudales con base en la curva de duración de caudales medios diarios en la estación Centenario. La metodología empleada fue construir la serie de caudales de máximos y mínimos, ajustando los datos a diferentes distribuciones estadísticas mediante el software Hyfran, encontrando que la distribución probabilística de Gumbel por el método de momento es la que mejor representa dicho comportamiento. Al final se estima los caudales mínimos, que son los que generan condiciones más críticas asociadas a la calidad de agua en la fuente para diferentes tiempos de retorno y se procede a calcular con base en la curva de dura-

ción de caudales medios diarios de la estación Centenario, su correspondiente permanencia. Los resultados son mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Caudales Mínimos asociados a diferentes tiempos de retorno y porcentaje de permanencia para la estación Centenario

Tiempo de Retorno (Años)	Q Min (m³/s)	Permanencia
2	0.427	3.37
3	0.377	1.5
5	0.351	1.18
10	0.319	0.58
20	0.295	0.4
50	0.271	0.23

Teniendo en cuenta esta relación y con base en los caudales existentes en los periodos de muestreo, se estima que el periodo de retorno asociado a mínimas es de 2 años.

En lo referente a la generación de escenarios mediante el modelo de calidad de agua, las permanencias utilizadas para su generación estarán referidas a mínimas y medias principalmente (Rango 5 % -50 %), lo cual se asocia a periodos de retorno entre 2 y 50 años.

2.4 CARGAS PERCÁPITA Y PROYECCIÓN DE POBLACIÓN

Las caracterizaciones típicas para aguas residuales domésticas son importantes porque sirven como referencia; sin embargo, la composición de las aguas residuales de cada ciudad es única y en lo posible se debe realizar los estudios pertinentes que permitan establecer su magnitud con precisión, siguiendo los métodos estándar, de manera que los resultados obtenidos sean confiables para ser aplicados.

En la ciudad de Pasto, existe un registro completo de varias jornadas de muestreo adelantado por Empopasto, donde se ha medido algunos parámetros en los principales colectores de la ciudad, lo que permite establecer estadísticamente estos valores, calculándolos por habitante.

Para ello inicialmente se realizó una sectorización y se determinó la población aferente por cada colector, utilizando el plano de áreas tributarias del Sistema de Información Geográfico de Empopasto y la información obtenida por el DANE en el Censo del 2005, correspondiente a la población de la cabecera municipal de Pasto organizada en un mapa de la ciudad de Pasto clasificado por sectores y subsectores. Para realizar las proyecciones de las poblaciones se utilizó el método de crecimiento Geométrico, con una tasa de crecimiento poblacional de 1.54%. Con esta metodología se pudo establecer la población aferente de cada colector que descarga directamente sobre el Río Pasto (cuadro 4).

Cuadro 4. Población aferente a los colectores con descarga directa al Río Pasto

Nombre colector	Población (número de habitantes)*				
	2005	2006	2010	2015	2020
Box Circular Pedagógico	35417	35961	38220	41245	44509
Juan XXIII	131828	133852	142261	153520	165670
Interceptor Lateral Izquierdo	13502	13709	14571	15724	16968
Colector Las Américas	43734	44405	47195	50930	54961
Colector Mijitayo	40546	41168	43755	47218	50955
Colector Panamericano	34046	34569	36740	39648	42786
Club de tenis	3953	4014	4266	4603	4968
Colector Batallón	6890	6996	7435	8024	8659
Colector San Antonio	452	459	488	526	568
Colector Juanoy	2630	2670	2838	3063	3305
Colector Calvario	10484	10645	11314	12209	13175
Descargas difusas Río Pasto	8089	8213	8729	9420	10166

* Población estimada con censo DANE 2005 y tasa de crecimiento poblacional para el Dpto. de Nariño: 1.54%

Conocida la población y las cargas estimadas en los análisis fisicoquímicos de Empopasto, se divide las cargas promedio para cada año en particular entre el número de habitantes, para obtener finalmente las cargas percápita para cada colector en gr/hab/día. Después de

realizada una depuración de información se encontró una composición típica de las aguas residuales que son vertidas al Río Pasto, las cuales se encuentran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Cargas per cápita típicas de las ARD en Pasto

Parámetro	gr/hab*d	Parámetro	gr/hab*d
DBO	68.74	NO ₂	1.37
DQO	114.40	NO ₃	1.11
Sol.Susp.Volátiles	69.37	NH ₄	6.72
Sol.Susp.Totales	81.61	Sol.Susp.Fijos	11.74
Sólidos Totales	181.30	Fósforo particulado	1.41
Fósforo	2.10	Amonio soluble	7.12
Nitrógeno total	10.50	DBO ₅ soluble	29.86
Cr ⁺⁶	0.02	DQO soluble	62.23
PO ⁻⁴	1.71	Nitrógeno orgánico	6.93

Con el dato de la población proyectada de los diferentes municipios, corregimientos y veredas, se puede utilizar los datos del cuadro 5 para estimar las concentraciones en los colectores en la zona urbana de la ciudad de Pasto. Los caudales de aguas residuales vertidas son calculados con la población proyectada para cada escenario, considerando una dotación de 200 l/hab*día.

2.5 CAMPAÑAS DE MONITOREO

Las campañas de monitoreo son realizadas con el objetivo fundamental de obtener los datos de calidad de agua que serán introducidos en el modelo predictivo Qual2K.

La condición más importante para que las campañas de muestreo pudieran ser realizadas es que se presente época de verano cuando se da las condiciones menos favorables de calidad a causa de los caudales mínimos del Río, lo cual se aseguraba con el requisito de que, para realizar las campañas de aforo y monitoreo no se presentara eventos de precipitación, como mínimo 7 días consecutivos previos a la fecha de ejecución de los muestreos; bajo esta circunstancia se estaría monitoreando el Río para una condición hidrológicamente estable y condiciones de flujo promedio o mínimo.

En la topología se identificó 25 puntos, para los cuales se estableció cinco comisiones de trabajo de campo para el Río Pasto. Además, para el día de los muestreos se contó con 2 comisiones de apoyo, en caso de eventualidades. Cada comisión contaba con mínimo 5 y máximo 6 personas dentro de las cuales se contaba con un líder responsable de la parte logística del trabajo de campo, el cumplimiento de la cadena de custodia y la

toma, transporte y entrega adecuadas de las muestras en los laboratorios correspondientes.

La selección de los parámetros a medir en la campaña de muestreo se concentró en las variables de estado del modelo de calidad del agua. Los parámetros son mostrados en el cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros y número de muestras en las campañas de monitoreo en el Río Pasto

PARÁMETROS	Número de Muestras	
	Río Pasto	Quebrada Chapal
DBO ₅	22	11
Acidez	22	11
Alcalinidad	22	11
SST	22	11
SSV	22	11
pH	22	11
Temperatura	22	11
Conductividad	22	11
Fósforo disuelto total	22	11
Nitratos	22	11
DQO	22	11
NTK	22	11
N Amoniacal	22	11
Fósforo Total	22	11
Coliformes Totales	22	11
Coliformes Fecales	22	11
Cromo	4	-
Níquel	3	-
Cadmio	3	-
Plomo	3	-
Mercurio	3	-
Sulfuros	2	-
Grasas y Aceites	2	-
Aforo de caudales	25	12

Se realizó dos campañas de aforo y monitoreo correspondientes a las jornadas de calibración y verificación de la simulación, utilizando el QUAL2Kw.

2.6 CALIBRACIÓN

Con el propósito de llevar un margen de error mínimo, la diferencia entre los datos simulados por el modelo y los datos medidos en campo, se lleva a cabo la calibración, actividad que se basa en el ajuste de las constantes cinéticas que influyen en los procesos del modelo.

La calibración de modelos predictivos puede hacerse manualmente o basarse en algoritmos de optimización matemática integrados al modelo y a los resultados de sus corridas.

El modelo de reaeración adoptado para el desarrollo del proceso de calibración fue el del USGS-pools-riffle, el cual fue seleccionado con base en la información secundaria disponible relacionada con reaeración en ríos de montaña colombianos. Las constantes de reacción fueron obtenidas por medio de la realización de iteraciones sucesivas de constantes, partiendo de experiencias documentadas en ríos de montaña (Río Chicamocha, Nepal y Pasto Fase I).

Las constantes de reacción encontradas son presentadas en el cuadro siguiente.

Cuadro 8. Constantes de reacción del Río Pasto

	Parámetro	Unidad	Q. Chapal	Río Pasto
Slow CBOD	Hydrolysis rate	/d	1	1
	Temp correction		1,047	1,047
	Oxidation rate	/d	0	0
	Temp correction		1,047	1,047
Fast CBOD	Oxidation rate	/d	2	7
	Temp correction		1,047	1,047
Organic N	Hydrolysis	/d	1	1
	Temp correction		1,07	1,07
	Settling velocity	m/d	0,24964	0,24964
Ammonium	Nitrification	/d	0,31	0,31
	Temp correction		1,07	1,07
Nitrate	Denitrification	/d	0,1	1,02986
	Temp correction		1,07	1,07
	Sed denitrification transfer coeff	m/d	0,05126	0,05126
	Temp correction		1,07	1,07
Organic P	Hydrolysis	/d	0,03	3,4361
	Temp correction		1,07	1,07
	Settling velocity	m/d	0,5	0,62926
Inorganic P	Settling velocity	m/d	1,16	0,01384
	Sed P oxygen attenuation half sat constant	mgO ₂ /L	1,03	1,69154
Detritus (POM)	Dissolution rate	/d	3,59	2,7754
	Temp correction		1,07	1,07
	Settling velocity	m/d	0,001	3,89475
Pathogens	Decay rate	/d	1,5	0,8
	Temp correction		1,07	1,07
	Settling velocity	m/d	0,57	1
	Alpha constant for light mortality	/d per ly/hr	0,63	1
pH	Partial pressure of carbon dioxide	ppm	372	347

Con relación a estas constantes de reacción, se pudo establecer el comportamiento a lo largo del Río Pasto, de variables como: caudal, reaireación, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, DBO rápida, nitrógeno amoniacal, fósforo orgánico y pH. Las figuras si-

guientes muestran el comportamiento de las variables más importantes para el Río Pasto respectivamente, así: el caudal en la Figuras 5, el Oxígeno Disuelto en la Figura 6 y la DBO rápida en la Figura 7.

Figura 5. Resultados de Calibración de la Variable Caudal (m^3/s)

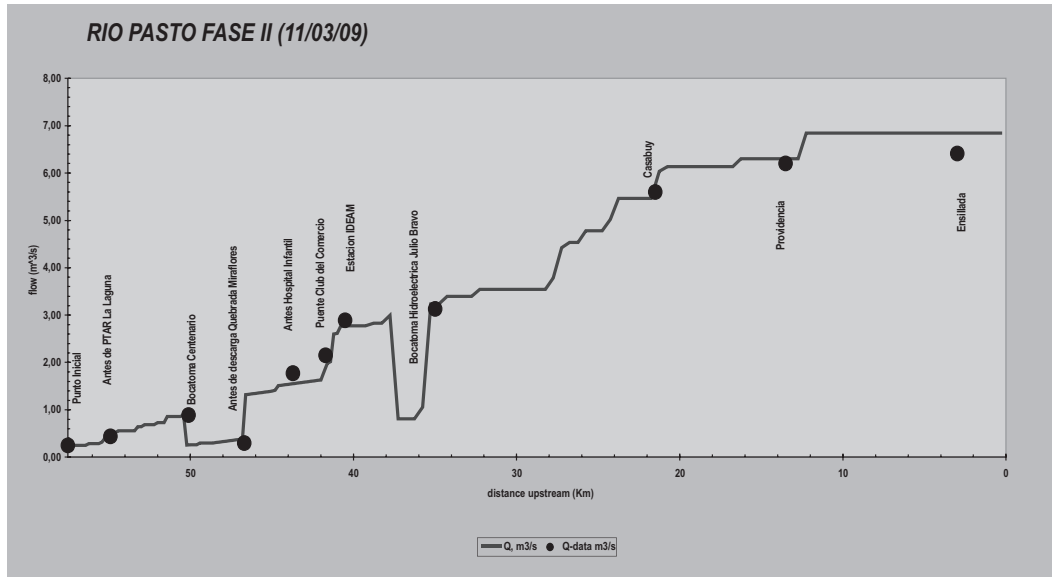


Figura 6. Resultados de calibración de la Variable Oxígeno Disuelto (mg/l)

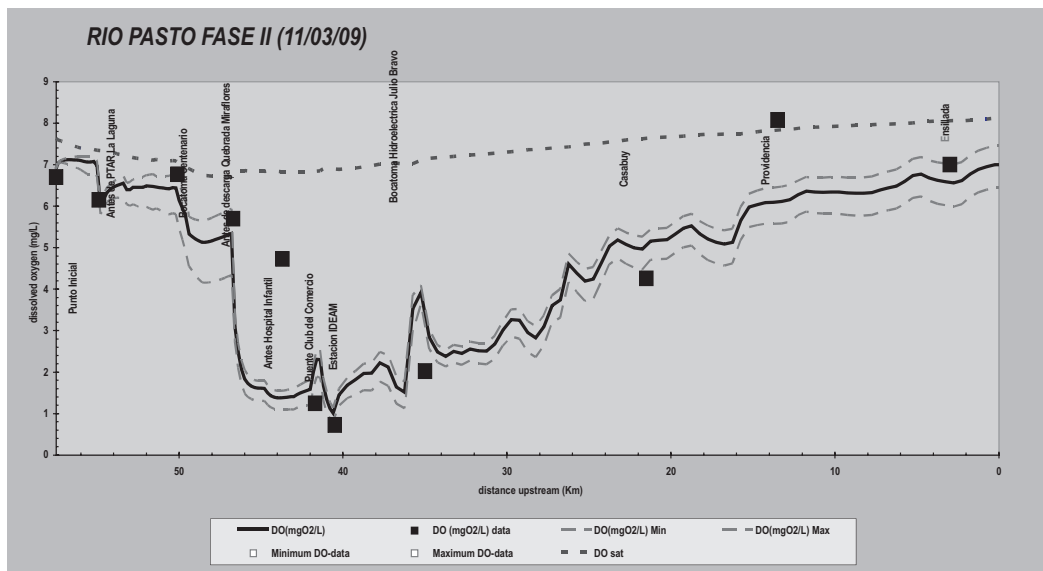
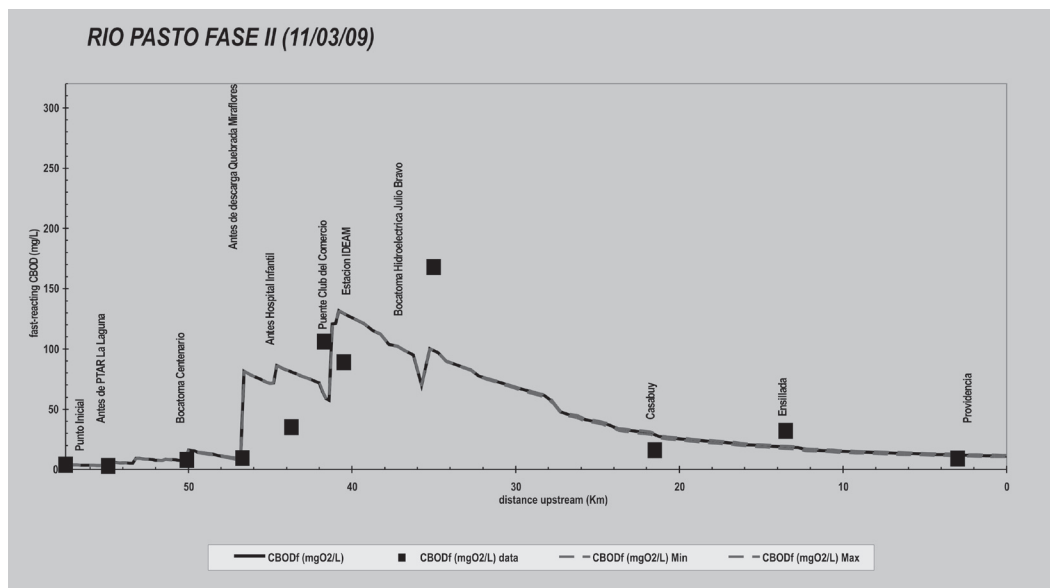


Figura 7. Resultados de calibración de la Variable DBO rápida (mg/l)



En las gráficas anteriores se observa el comportamiento de algunos parámetros indicadores de calidad para la corriente en estudio. Es el caso del oxígeno disuelto que decrece a medida que la DBO₅ o DBO rápida se incrementa, debido a la relación inversa que se presenta entre estos dos parámetros, siendo más notoria la deficiencia de oxígeno en la zona urbana de las dos fuentes hídricas. Este comportamiento se debe a que la calidad del agua es alterada fácilmente ante la llegada de vertimientos, los cuales aportan concentraciones significativas en parámetros físicoquímicos con el transcurrir de la corriente.

2.7 GENERACIÓN DE ESCENARIOS

La definición de los escenarios se hace teniendo en cuenta una condición de caudal mínimo, momento considerado como crítico en cuanto a calidad de agua se refiere.

Fueron planteados escenarios futuros para los años 2013, 2018 y 2023. Se tiene en cuenta la reglamentación dada por el Decreto 1594 de 1984, el Plan de Manejo de Aguas Residuales (PMAR) formulado a partir de los lineamientos contenidos en el documento CONPES 3177 de julio de 2002, las políticas de manejo de aguas residuales formuladas por Corponariño en el Plan de

Gestión Ambiental Regional 2002 – 2012, el Plan de inversiones de Empopasto con relación a la construcción de colectores e interceptores de aguas residuales y los decretos y resoluciones establecidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para reglamentar las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y sobre los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV).

El agua residual doméstica en caudal y concentración fue estimada con las poblaciones proyectadas de los municipios y asentamientos rurales y se considera que la producción industrial no afectará la producción de carga orgánica vertida en la cuenca, dado que su aumento no será significativo.

Los escenarios planteados para el Río Pasto y sus características son presentadas a continuación:

- **Escenario base**

Dentro del escenario base se toma las condiciones encontradas en el año 2008 y se tiene en cuenta todos los vertimientos identificados y presentados en la topología de este informe. No se tiene en cuenta remociones por efecto de tratamiento de aguas residuales,

a excepción de la PTAR La Laguna en la que se asume una eficiencia del 80%, con una cobertura es del 80%. Se considera que la cobertura en alcantarillado en la zona urbana del municipio es del 84%³. Los caudales de aguas superficiales aportadas por las quebradas al alcantarillado combinado son estimadas utilizando las curvas de permanencia. Los escenarios son evaluados para una permanencia del 90%. No se reporta escenarios referidos a PSMV ni metas de vertimiento de las industrias ya que en la actualidad está en proceso de definición por parte de la Autoridad Ambiental, de los objetivos de Calidad para el Río Pasto.

- **Escenario de ejecución de obras de infraestructura**

Hasta el año 2013, de acuerdo al Plan de inversiones suministrado por EMPOPASTO, se espera que se haya ejecutado las siguientes obras: construcción del Interceptor Chapal y sus correspondientes estructuras de separación, construcción de la prolongación del colector margen izquierda del Río Pasto, conexión del Colector Chapal y del alcantarillado del sector Aranda al colector margen izquierdo del Río Pasto. Además se considera el aporte por vertimiento de lixiviados del relleno sanitario sin tratamiento, el vertimiento sin tratamiento de los otros municipios y el vertimiento de las industrias en forma igual al encontrado en el escenario Base.

- **Escenario medio Río Pasto**

Hasta el año 2018 se espera la construcción de la primera fase del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Pasto con tratamiento primario asistido con una remoción de DBO del 40% y de SST del 40% en carga contaminante. La remoción de los otros municipios y de las industrias es la misma que el escenario base.

- **Escenario pesimista Río Pasto**

Hasta el año 2018 se considera que no hay construcción de la PTAR para la ciudad de Pasto, el vertimiento de lixiviados del relleno sanitario sin tratamiento y que no se ha implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales en los otros municipios que vierten sus aguas contaminadas al Río Pasto.

- **Escenario optimista Río Pasto año 2018**

Hasta el año 2018 se espera la construcción de la PTAR con tratamiento primario. Se incluye el aporte por vertimiento de lixiviados del relleno sanitario previo a un tratamiento, el cual permite una reducción del 40% en carga como DBO₅ y 40% en SST. Existen sistemas de tratamiento de aguas residuales en los otros municipios que vierten sus aguas al Río Pasto y que su eficiencia cumple con lo establecido en el Decreto 1594 de 1984.

- **Escenario optimista Río Pasto año 2023**

Hasta el año 2023 se espera la construcción de la PTAR en su segunda etapa que incluye tratamiento secundario y una eficiencia de remoción en DBO del 85% en carga. Se incluye el aporte por vertimiento de lixiviados del relleno sanitario previo a un tratamiento, el cual permite una reducción del 80% en carga como DBO₅ y 80% en SST. Se ha implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales en los otros municipios que vierten sus aguas al río Pasto y su eficiencia cumple con lo establecido en el Decreto 1594 de 1984. Las industrias cuentan con PTAR y sus vertimientos cumplen con lo establecido en el Decreto 1594 de 1984.

En las figuras 8 a 11 se muestra los resultados de la Variable Oxígeno disuelto para cada uno de los escenarios futuros comparándolos con el escenario base.

³ Plan de Gestión Ambiental Regional para Nariño (PGAR, 2002 – 2012)

Figura 8. Simulación de OD con Escenario Base y escenarios futuros con ejecución de obras al año 2013, 2018 y 2028

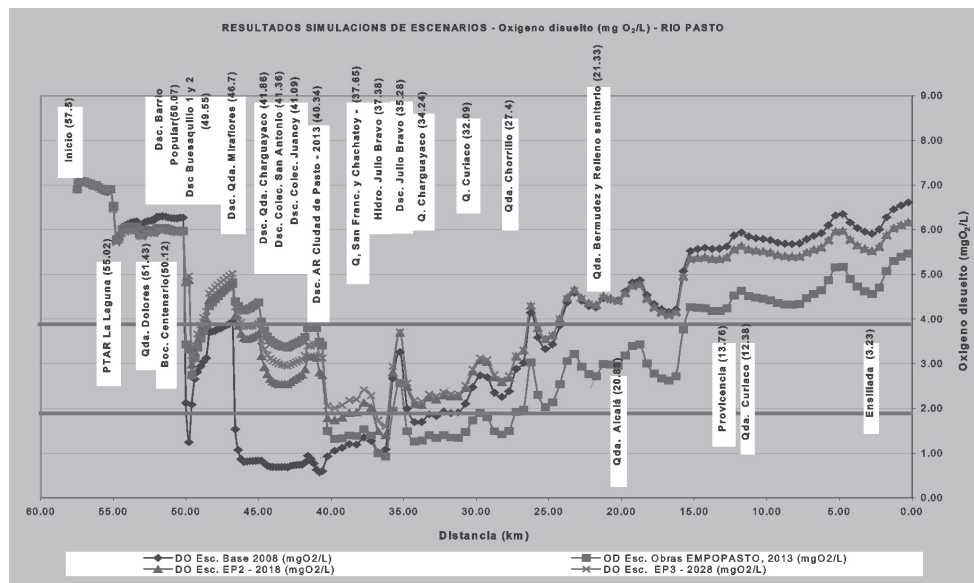


Figura 9. Simulación de OD con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario al año 2018 y 2028 (EP5 sin lixiviados y EP6 con lixiviados)

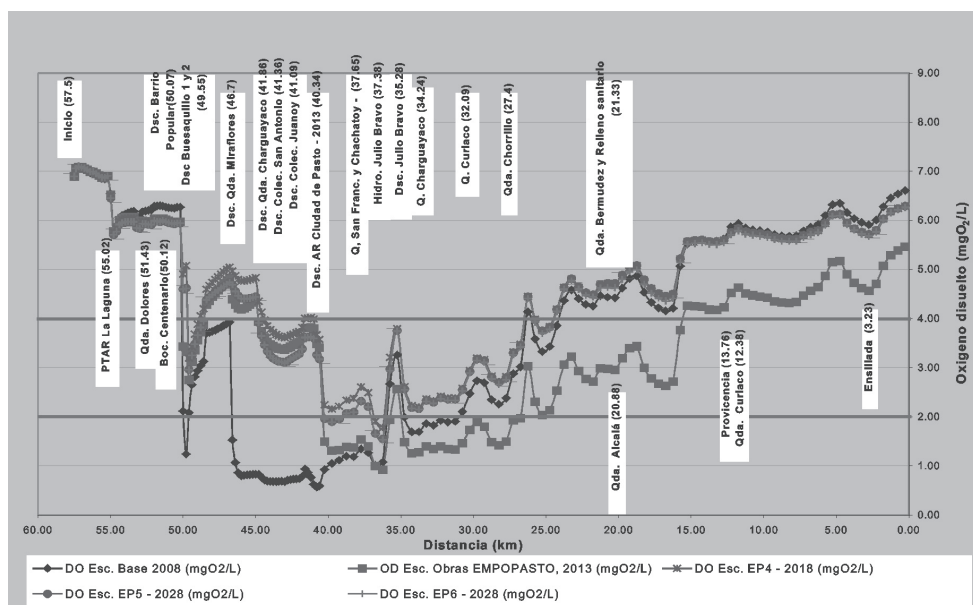


Figura 10. Simulación de OD con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario y secundario al año 2018 y 2028

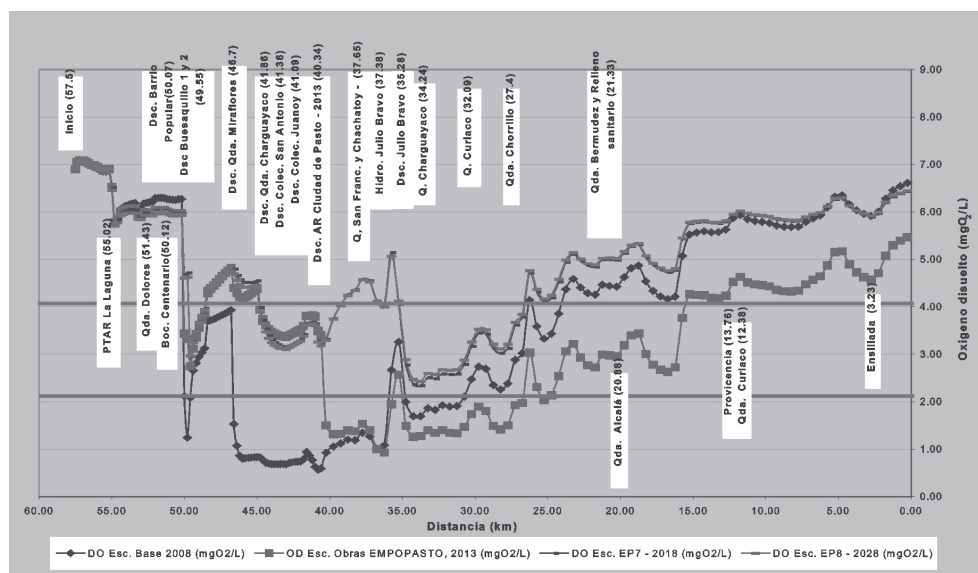
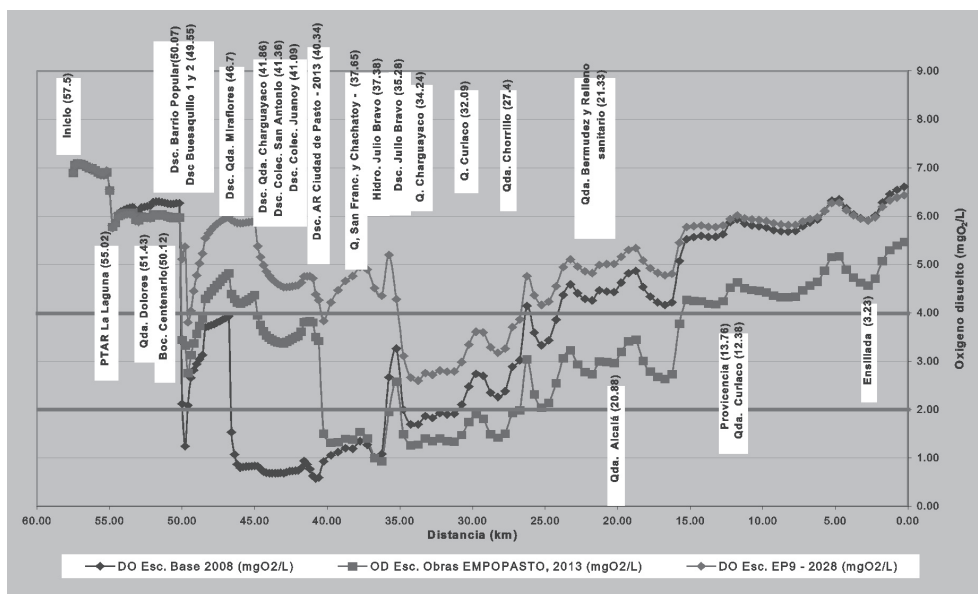


Figura 11. Simulación de OD con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario y secundario y tratamiento en la zona rural y en el sector industrial al año 2028



El OD es uno de los indicadores más utilizados para establecer la calidad del agua de una fuente. De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación el escenario Base representa la situación más desfavorable en tér-

minos de calidad del agua cuando el río atraviesa la zona urbana, con concentraciones de hasta 0.69 mg/L, valor crítico para la conservación de la flora y la fauna del Río Pasto.

Los escenarios de ejecución de obras presentados en la figura 8 indican un efecto positivo en el tramo urbano que hace que el valor mínimo de OD pase de 0.69 mg/L a 3.37 mg/L; sin embargo, en años posteriores el OD decrece debido al aumento de la población. Situación muy similar se presenta en la figura 9, destacando que al simular la descarga de los lixiviados del relleno sanitario, se puede apreciar que en el punto donde se realiza la descarga el OD decrece de 3.46 mg/L a 3.36 mg/L, indicando el poco impacto que tiene esta descarga en términos de OD. La figura 13 indica una mínima mejoría de la situación de calidad del río al instalar un tratamiento secundario en la PTAR de Pasto, sin llevar a

cabo ninguna acción de depuración en las otras fuentes de contaminación. En la figura 14 que simula un escenario óptimo donde se ha ejecutado sistemas de tratamiento primario y secundario a todas las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, se puede apreciar un impacto significativo ya que el OD pasa a registrar valores superiores a 4 mg/L en todo el recorrido del río.

En las figuras 12 a 15 se muestra los resultados de la variable DBO para cada uno de los escenarios futuros, comparándolos con el escenario base

Figura 12. Simulación de DBO con Escenario Base y escenarios futuros con ejecución de obras al año 2013, 2018 y 2028

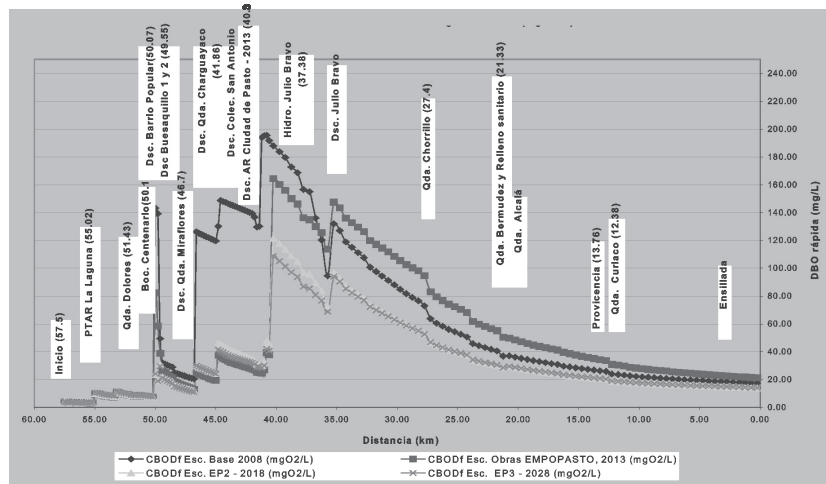


Figura 13. Simulación de DBO con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario al año 2018 y 2028

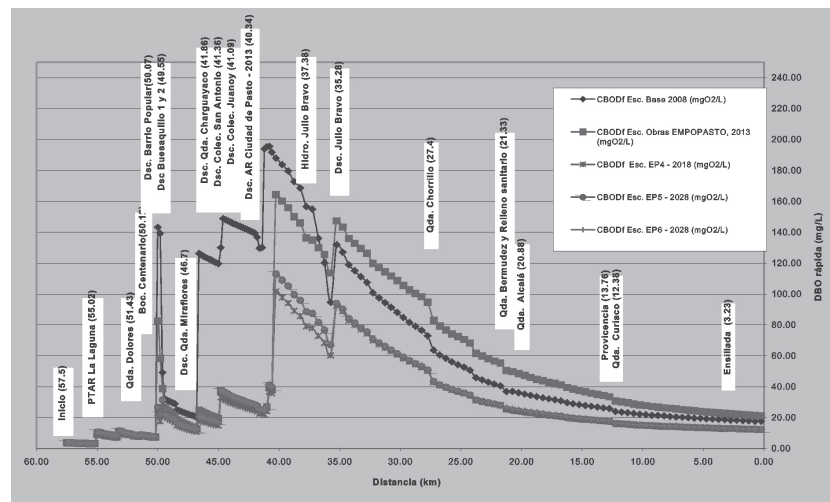


Figura 14. Simulación de DBO con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario y secundario al año 2018 y 2028

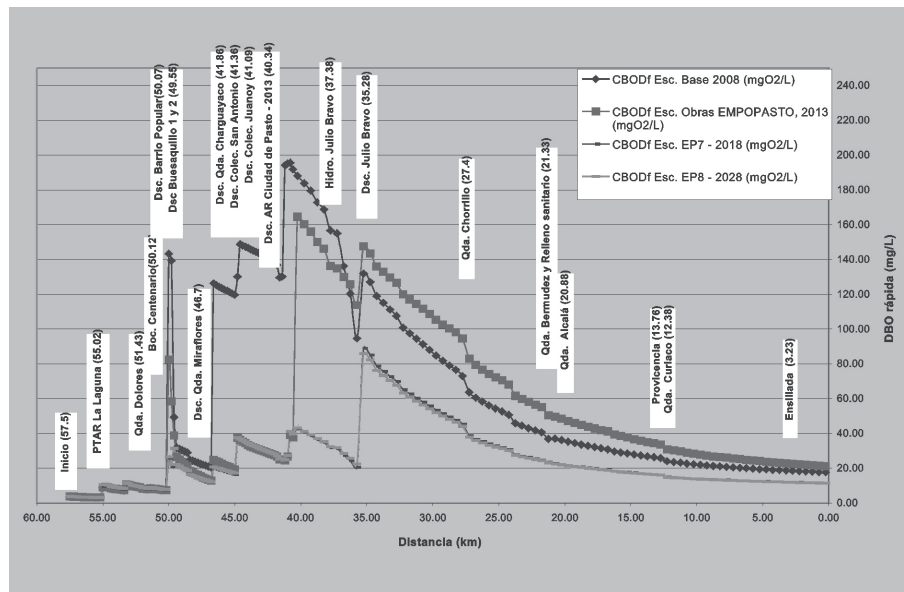
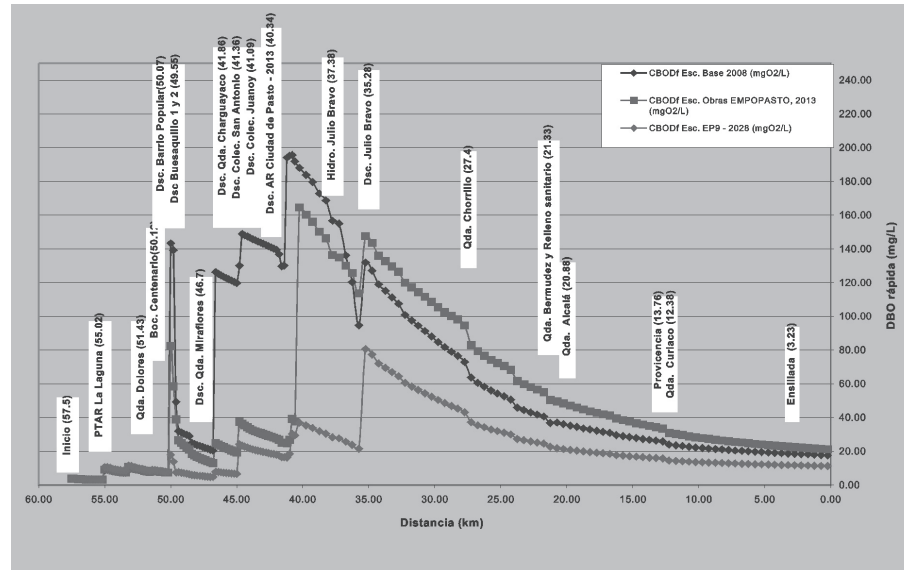


Figura 15. Simulación de DBO con Escenario Base y escenarios futuros con PTAR con tratamiento primario y secundario y tratamiento en la zona rural y en el sector industrial al año 2028



Los escenarios de ejecución de obras presentados en la figura 12 indican que la DBO varía entre 20 y 42 mg/L en el tramo urbano para después, aguas abajo, continuar en descenso hasta alcanzar valores menores a 20 mg/L. En la figura 16, se observa que el tratamiento

primario de la planta hace que la DBO baje alrededor del 7%, con respecto al escenario sin tratamiento. La figura 13 indica que no hay mucha diferencia entre el escenario al 2018 y el 2028 cuando se ejecute el tratamiento primario y secundario de las aguas. Sin embar-

go, si es apreciable la diferencia entre el escenario Base y el futuro evaluado en los años 2018 y 2028, donde la DBO en el kilómetro 40.8 decrece en un 78%. En la figura 15 se puede encontrar las condiciones óptimas donde después de la descarga de las aguas tratadas de la ciudad de Pasto, la DBO desciende un 81% con respecto al escenario Base.

3. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

- El modelo predictivo QUAL2K es un modelo altamente sensible a variables como coeficiente de Reaireacion, Caudal, Temperatura, Oxígeno Disuelto y concentraciones de DBO Rápida (DBO_5) de las descargas al río, lo que permite concluir que existe una relación estrecha entre la confiabilidad del modelo y la calidad de los análisis de laboratorio. Esto implica que para eventos de modelación posteriores, la caracterización deberá ser adelantada por laboratorios debidamente normalizados, intercalibrados y acreditados, de conformidad con lo establecido en el Decreto 1600 de 1994, o las normas que lo modifiquen o sustituyan.
- Los resultados predictivos obtenidos con la instalación de diferentes escenarios futuros permite concluir que es indispensable cumplir con las metas establecidas por Empopasto y Corponariño para que se logre un nivel confiable de calidad de agua en el Río Pasto y en la Quebrada Chapal, así como la construcción de una Planta de Tratamiento que trate las aguas residuales domésticas del casco urbano de la ciudad de Pasto.
- Para garantizar que se proyecte y realice obras adecuadas y comprobar que las obras construidas dan los resultados esperados en la planificación, se debe establecer la modelación del Río Pasto, como una herramienta de uso periódico y continuo que permita comparar los resultados de escenarios propuestos anteriormente con la realidad y que, de esta manera, se pueda hacer ajustes a tiempo en la planificación.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS Y REFERENCIAS

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PASTO y CORPONARIÑO. (2004). Agenda Ambiental del Municipio de Pasto. San Juan de Pasto, Colombia.

AMAZONAS TECHNOLOGIES (2008). Informe técnico Prueba de trazadores Río Pasto, Quebrada Chapal.

CHAPRA, S. C (1997). Surface Water Quality Modeling. Mc Graw Hill. New York, United State.

CHAPRA, S.C., PELLETIER, G.J. and 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.

CORPONARIÑO. (1986). Plan de Ordenamiento y manejo de la Cuenca superior del Río Pasto. San Juan de Pasto.

FERNÁNDEZ N.; RAMÍREZ A. y SOLANO F. (2003). Índices Fisicoquímicos de Calidad del Agua, un Estudio Comparativo. Conferencia Internacional Usos múltiples del agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible. Memorias del evento Agua 2003. Universidad del Valle y CINARA, IWA. Cartagena. Colombia.

FISCHER H., IMBERGER J., LIST, KOH E., BROOKS (1979). Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, Inc. New York.

GARCÍA T., et al. Water Quality Simulation of the Chicamocha River, Colombia — an Application of the QUAL2Kw Model. XVI Congreso Latinoamericano de Hidrología e Hidráulica. Cartagena, 2008.

GOBERNACIÓN DE NARIÑO. Plan de Gestión Ambiental Regional para Nariño: PGAR, 2002 – 2012

GIA, Grupo de Investigación Ambiental; Universidad Mariana, Modelación del Río Pasto Fase I, una Herramienta de Planificación del Recurso Hídrico-, Pasto 2.008.

HIBBS, D.E.; PARKHILL, K.L.; KENNETH, L. & GULLIVER, J.S. (1998). Sulfur Hexafluoride gas tracer studies in streams. *In: Journal of Environmental Engineering*. ASCE. Vol. 124 No. 8. P 1-9

INGESAM (2006). Plan Para el Desarrollo del Modelo Qual2K para la cuenca del Río Chinchiná. Manizales, Colombia.

KILPATRICK, F.A. & COBB, E.D. (1985). Measurement of discharge using tracers. Techniques of water – resources investigations of the United States Geological Survey. Book 3. Chapter A16. Washington D.C. USA.

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

LOZANO G., ZAPATA, M.A. y PEÑA, L.E (2003). Selección del Modelo de Simulación de Calidad de Agua en el Proyecto “Modelación de Corrientes hídricas Superficiales en el Departamento del Quindío”. CIDERA Grupo de Investigación, desarrollo y estudio del recurso hídrico y el ambiente. Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

PEREIRA R., (2004). Modelos de Qualidade de Água. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

ROLDÁN G., (1992). Fundamentos de Limnología. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

TUCCI C. (1993). Hidrología Ciência e Aplicacao. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO (2003). Proyecto Código Periferia Urbana. ARD – Municipio de Pasto en: JURADO, Gustavo y PORTILLO, Viviana. Evaluación del efecto ambiental generado por el manejo inadecuado del suelo de la microcuenca Alta del Río Pasto. Trabajo de grado (Ingeniería Sanitaria y Ambiental), 2007.