

# Aplicación de un modelo de simulación de calidad del agua en el saneamiento hídrico de la cuenca alta del río Negro - Antioquia

CENTRO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES Y DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA  
MEDELLÍN - COLOMBIA

Francisco Molina Pérez

- Ingeniero Sanitario. Profesor Universidad de Antioquia.

Alvaro Wills Toro

- Ingeniero Civil. Profesor Universidad de Antioquia.

Juan Fernando Ramírez Cardona

- Ingeniero Sanitario. Centro de Investigaciones Ambientales.

## RESUMEN

*El presente artículo consigna la aplicación del modelo de simulación de calidad del agua: QUAL2E, a la cuenca alta del río Negro en el Oriente Antioqueño.*

*El sistema río Negro - quebradas afluentes, fue dividido en 16 tramos homogéneos, en los cuales se localizaron 15 estaciones de aforo y muestreo, así: 5 en el río Negro y 10 en las principales quebradas afluentes.*

*En el período octubre de 1993 a mayo de 1994, se realizaron 10 muestreos de calidad del agua, acopiando así, los datos básicos para los escenarios hidrológicos de verano, intermedio e invierno.*

*Posteriormente se realizó la calibración del modelo para el escenario de verano y la validación para invierno; se refinaron especialmente los parámetros: sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y DBO5.*

*La utilización del modelo permite realizar la prospectiva para la calidad del agua en la región posibilitando una mejor toma de decisiones en lo relacionado con el uso del recurso y acciones de prevención y control.*

# INTRODUCCIÓN

*La dinámica actual del desarrollo en el Oriente Antioqueño y específicamente en la cuenca alta del río Negro, exige la instrumentación de herramientas, que permitan la regulación de los usos del agua y el control de vertimientos de aguas residuales al río Negro y quebradas afluentes.*

*La Corporación Autónoma Regional Rionegro-Nare, CORNARE, consciente de lo anterior, realizó un convenio con la Universidad de Antioquia, mediante el cual, el Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería, desarrollo el proyecto: «Montaje y calibración de un modelo de simulación de calidad del agua para el río Negro y principales quebradas afluentes».*

*La posibilidad de contar con una herramienta de simulación, permite el desarrollo más eficiente de los procesos de planificación y control del recurso hídrico en la región.*

*Se definieron como parámetros básicos de calidad del agua a modelar los siguientes: Sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno y oxígeno disuelto; los parámetros adicionales definidos son: Coliformes y formas de nitrógeno y fósforo.*

## 1. EL MODELO QUAL2E

El QUAL2E es un modelo comprensivo y versátil para simular la calidad del agua en corrientes superficiales. El programa simula hasta 15 parámetros fisicoquímicos en cualquier combinación. La Figura 1 presenta los principales parámetros que se pueden simular.

El modelo es aplicable a corrientes con mezcla completa y asume como mecanismos de transporte la advección y dispersión a lo largo del eje longitudinal de la corriente. El QUAL2E permite múltiples descargas de desechos, aportes de tributarios, captaciones y flujos incrementales. También tiene la capacidad de calcular el aumento de flujos por adición de agua de dilución para lograr un nivel deseado de oxígeno disuelto.

Hidráulicamente, el QUAL2E está limitado a períodos de tiempo cuando los flujos son esencialmente constantes. Las descargas que llegan al sistema principal también deben ser constantes. El QUAL2E puede ser operado para estado estable o dinámico. La operación dinámica hace posible estudiar la calidad del agua, principalmente oxígeno disuelto y temperatura, cuando son afectados por variaciones meteorológicas.

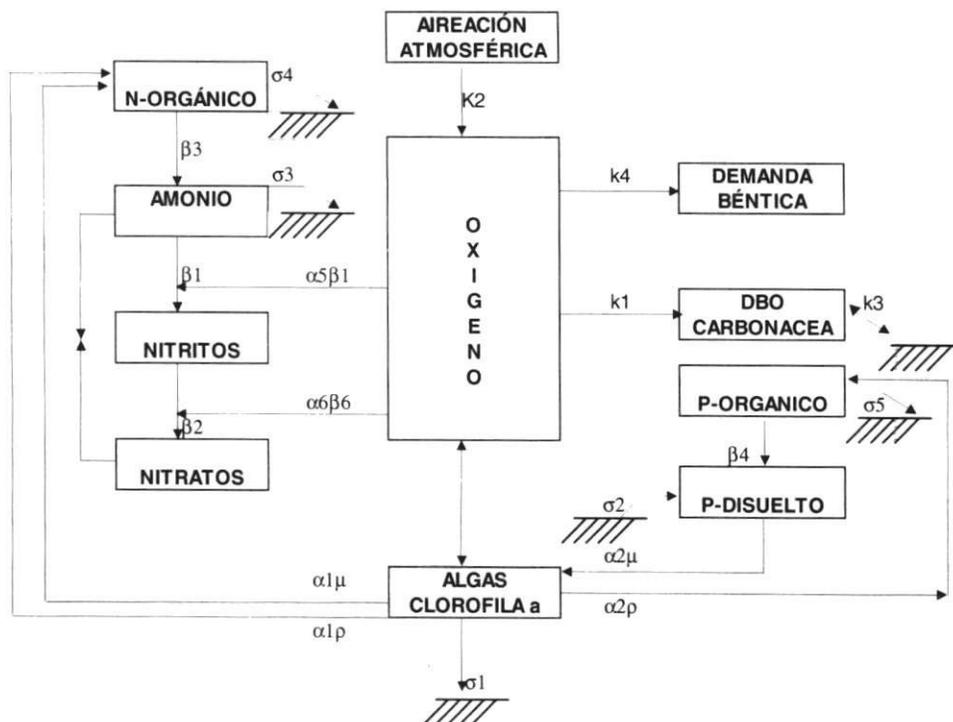


FIG. 1. Interacción entre los principales componentes del QUAL2E para el balance de oxígeno

### 1.1 Características computacionales

El QUAL2E tiene un programa principal soportado por más de 25 subrutinas. Está escrito en FORTRAN77 y requiere de un computador con mínimo 256K de memoria y sistema operacional DOS .3 o superior.

### 1.2 Ventajas del QUAL2E

Entre las principales ventajas del modelo se pueden citar:

- Programa de computador de fácil adquisición y montaje en los equipos de computo.
- Distribución gratuita
- Ampliamente documentado y continuamente actualizado tanto en la parte técnica como de informática.
- Amplia experiencia en su uso en nuestro medio.
- Garantizada bondad en los resultados.

### 1.3 Formulación general del modelo

El objetivo principal del programa es simular el comportamiento hidrológico y de calidad del agua en una corriente. La utilización del QUAL2E se puede resumir en tres fases:

#### 1.3.1 Representación conceptual

La representación conceptual consiste en idealizar la corriente, considerándola formada por una serie de tramos en los cuales se conservan constantes las características hidrogeométricas (pendiente, sección transversal, rugosidad, etc.) y las constantes biológicas ( $K_d$ , demanda béntica, tasas de sedimentación).

Luego, por razones matemáticas, cada tramo se subdivide en pequeños elementos (todos del mismo tamaño), los cuales son tratados como una cadena de reactores completamente mezclados. El programa secuencialmente va realizando balances de masa en cada reactor hasta encontrar la solución para todo el sistema.

En total hay siete elementos computacionales que son:

- Tramo inicial.
- Elemento estándar.
- Elemento aguas arriba de una unión.
- Uniones.
- Último elemento del sistema.
- Elemento de entrada.
- Elemento de salida.

### 1.3.2 Representación funcional

La ecuación básica que resuelve el programa es la de transporte advección-dispersión. La ecuación es integrada numéricamente para cada contaminante en función del tiempo y la distancia. La forma de la ecuación es la siguiente:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta (A_x \cdot D_L \cdot (\delta C / \delta x))}{A_x \cdot \delta x} - \frac{\delta (A_x \cdot v \cdot C)}{A_x \cdot \delta x} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V}$$

Los términos de la derecha representan, respectivamente, dispersión, advección, término reactivo y aportes o consumos externos.

Las diferentes relaciones matemáticas que describen las reacciones individuales se encuentran en el manual del usuario del programa.

### 1.3.3 Representación computacional

Para cada intervalo de tiempo y cada contaminante, la ecuación se escribe  $n$  veces. La serie de ecuaciones que se forman no tienen solución analítica, el QUAL2E para solucionarlas utiliza el método de las diferencias finitas (diferencias hacia atrás). La forma de las ecuaciones y una breve descripción del método puede ser consultada por el lector en el manual de usuarios del programa.

## 1.4 Restricciones del QUAL2E

El QUAL2E presenta las siguientes limitaciones:

- Máximo número de tramos = 25.
- Elementos computacionales = No. más de 20 por tramo o 250 en total.
- Máximo número de tramos iniciales = 7.
- Máximo número de uniones = 6.
- Máximo número de elementos de entrada y salida = 25.

## 1.5 Reacciones e interacciones del QUAL2E

Una de las consideraciones más importantes para determinar la capacidad asimilativa de desechos por una corriente de agua, es su habilidad para mantener una concentración de oxígeno disuelto. Estas concentraciones de oxígeno en una corriente, son controladas por la reaireación atmosférica, fotosíntesis, respiración animal y vegetal, demanda béntica y demanda bioquímica de oxígeno, nitrificación y temperatura, entre otros.

Un balance preciso de oxígeno debería incluir todos estos factores, lo cual no siempre es posible. El QUAL2E incluye las interacciones más importantes, tal como se presenta en la Figura 1. Las flechas indicadas en la figura, muestran la progresión normal del sistema en un ambiente moderadamente poluído, pero pueden ser reservadas en algunas circunstancias. Las coliformes y sustancias no conservativas son modelados como compuestos que se degradan y no interactúan con otros compuestos. Las sustancias conservativas ni se degradan ni interactúan con otros compuestos.

## 2. REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LA CUENCA ALTA DEL RIONEGRO

La representación conceptual del sistema río Negro - quebradas afluentes, permite la esquematización y simplificación del sistema, necesarias para estructurar el escenario de simulación.

Se presentan una corriente principal, río Negro y cuatro corrientes secundarias, quebradas: La Pereira, Cimarronas, La Mosca y La Marinilla.

De acuerdo con los criterios de pendiente y calidad del agua de las corrientes, se dividió el sistema en 16 tramos o segmentos homogéneos, la Figura 2 contiene la representación conceptual del sistema, incluye la localización de las estaciones de aforo y muestreo y de las principales descargas de aguas residuales.

## 3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo se calibró utilizando los datos de campo de calidad del agua para el escenario de verano, para facilitar el proceso de calibración el sistema río Negro-quebradas afluentes, se dividió en un sistema principal correspondiente al río Negro y cuatro sistemas secundario correspondientes a las quebradas: La Pereira, Cimarronas, La Mosca y La Marinilla.

El proceso de calibración consiste en cotejar los resultados del modelo con los datos de calidad del agua fruto de los muestreos de campo, refinando los valores de las constantes de reacción utilizadas por el modelo, hasta lograr el ajuste entre el campo y el modelo.

### 3.1 Datos de entrada

#### 3.1.1 Caudales

Los caudales de cabecera e incrementales para el río Negro y sus principales quebradas afluentes se calcularon utilizando fórmulas hidrológicas de regionalización, en función de las áreas drenadas y características climáticas y morfométricas.

En la Tabla 1, se presentan la composición de áreas y caudales aportantes por tramo del sistema río Negro - quebradas afluentes.

#### 3.1.2 Relaciones hidráulicas

En el proceso de montaje y calibración del modelo QUAL2E se utilizan varias relaciones hidráulicas de tipo empírico, en primer lugar se utiliza la curva de gastos o relación entre niveles y caudales en las estaciones hidrométricas, que permiten estimar los flujos presentes durante los muestreos.

Las variables como velocidad media, profundidad y área superficial, son muy significativas en los procesos de reaeración

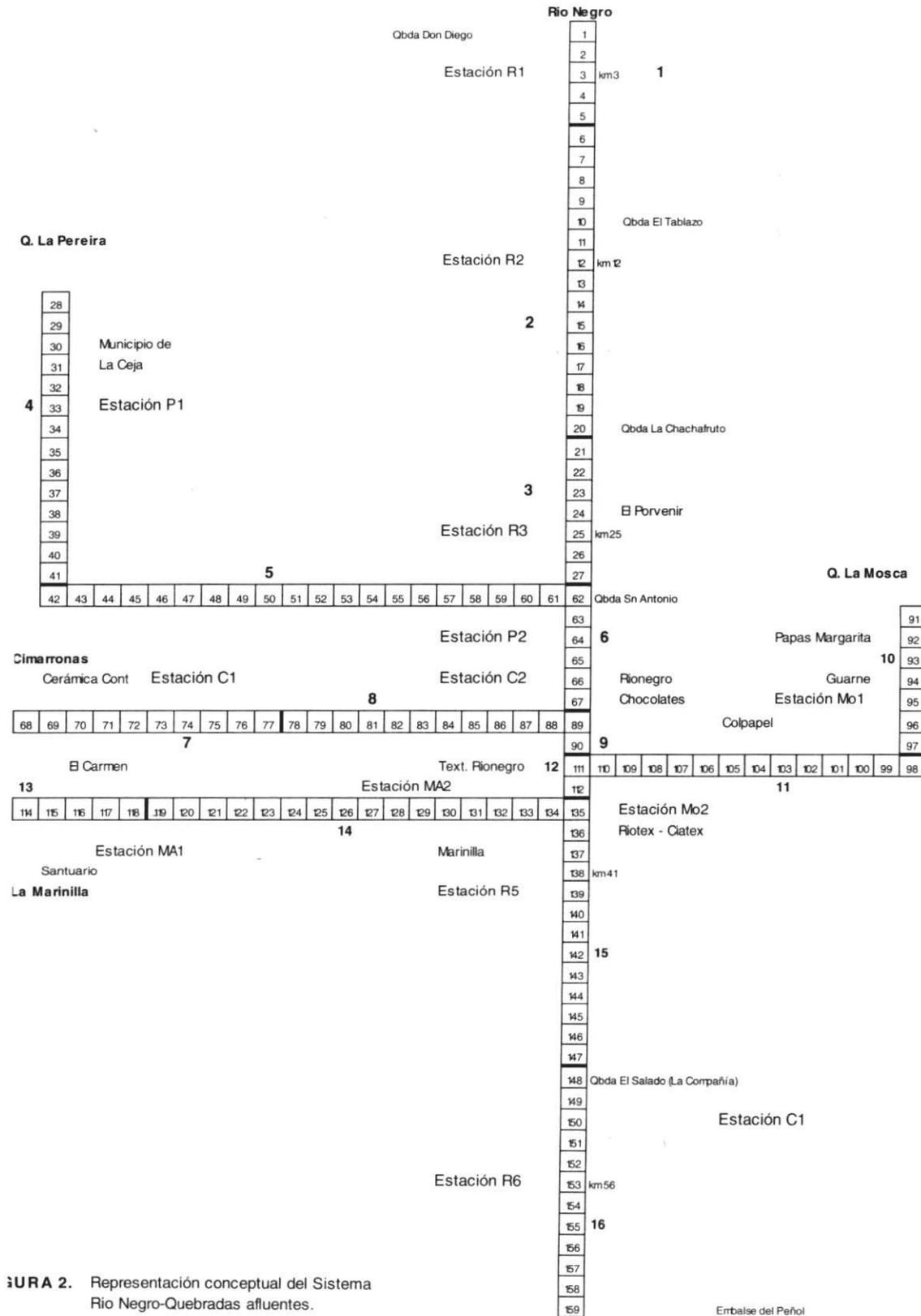


FIGURA 2. Representación conceptual del Sistema Río Negro-Quebradas afluentes.

FIG. 2.- Representación conceptual del Sistema Río Negro - Quebradas afluentes.

de las corrientes así como en la resuspensión o sedimentación de sólidos; dichas variables se pueden definir con base en relaciones hidráulicas de tipo empírico, que relacionan velocidad media y profundidad con el caudal de siguiente manera:

$$V = a Q^b \quad (1)$$

Donde:  $V$  = Velocidad media en m/s  
 $a$  y  $b$  son coeficientes experimentales.

$$D = \alpha Q^\beta \quad (2)$$

Donde:  $D$  = Profundidad en m.  
 $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes experimentales.

**TABLA 1. Composición de áreas y caudales aportantes. Red Hidrográfica cuenca alta del río Negro.**

CORRIENTE	TRAMO	TIPO FLUJO	AREA km <sup>2</sup>	CAUDAL m <sup>3</sup> /s		
				VERANO	MEDIO	INVIERNO
Rio Negro	1	C*	175.00	2.10	6.6 / 2.6	5.60
	1	I	32.90	0.56	1.10	1.70
	2	I	36.40	0.62	1.20	1.80
	3	I	26.50	0.45	0.90	1.30
Q. La Pereira	4	C	20.00	0.15	0.80	1.30
	4	I	52.20	0.59	2.10	2.80
	5	I	70.00	0.79	2.80	3.80
Rio Negro	6	I	16.20	0.28	0.55	0.80
Q. Cimarronas	7	C	15.00	0.18	0.60	0.90
	7	I	25.00	0.43	0.85	1.40
	8	I	16.40	0.28	0.56	0.90
Rio Negro	9	I	1.50	0.01	0.03	0.08
Q. La Mosca	10	C	25.00	0.28	0.88	1.10
	10	I**	50.00	0.50	1.5 / 0.7	1.10
	11	I	81.00	1.38	2.40	3.20
Rio Negro	12	I	1.80	0.03	0.06	0.09
Q. La Marinilla	13	C	20.00	0.24	0.80	1.10
	13	I	14.00	0.24	0.48	0.70
	14	I	62.40	1.10	2.10	3.10
Rio Negro	15	I	44.00	0.75	1.50	2.20
	16	I	66.00	1.13	2.30	3.30
La Chachafruto	5	P	31.00	0.53	1.10	1.70
La Compañía	16	P	47.20	0.80	1.70	2.60

C: CABECERA  
 I: INCREMENTAL  
 P: PUNTUAL

\* El caudal en este tramo esta afectado notablemente por la regulación y transvasos que se realizan hacia el embalse de La Fé

\*\* En este tramo se realizan extracciones desde la quebrada La Mosca y su afluente La Honda hacia el embalse de Piedras Blancas.

La Tabla 2 resume los resultados preliminares, para la curva de gastos y relaciones hidráulicas en las principales estaciones del sistema río negro-quebradas afluentes; dichas relaciones deben refinarse en la medida en que se obtengan nuevos datos, lo cual enfatiza la necesidad de mantener activa la red hidrométrica.

**TABLA 2. Resumen de las relaciones hidráulicas**

CORRIENTE	ESTACION	VELOCIDAD MEDIA		PROFUNDIDAD MEDIA		CURVA DE GASTOS		
		a	b	a	b	k1	k2	Ho
Río Negro	R1	0.501	0.524	0.318	0.325	11.207	1.081	
	R2	0.262	0.637	0.510	0.322	5.471	2.258	
	R3	0.263	0.502	0.494	0.321	0.347	3.939	
	R5	0.228	0.324	0.328	0.542	5.899	1.826	0.50
	R6	0.174	0.437	0.405	0.406	16.936	1.611	
La Pereira	P1	0.271	0.940	0.761	0.055	0.004	5.981	
	P2	0.268	0.687	0.479	0.220	4.539	2.625	
Cimarronas	C1	0.552	0.445	0.246	0.607	1.379	8.564	
	C2	0.479	0.190	0.523	0.808	4.873	1.303	
La Mosca	MO1	0.375	0.914	0.465	0.025	9.467	1.584	
	MO2	0.215	0.542	0.631	0.271	1.732	2.897	
La Marinilla	MA 1	0.297	0.690	0.350	0.292	4.436	1.446	
	MA2	0.330	0.499	0.299	0.520	0.0030	9.154	
Leonera	CH1	0.940	0.470	0.325	0.481	1.816	1.152	
Yarumal	CH1	0.593	0.597	0.462	0.291	2.726	2.125	
El Salado	S1	0.591	0.736	0.531	0.093	3.997	3.944	

### 3.1.3 Coeficientes de reacción

La Figura 1 presenta los principales coeficientes de reacción utilizados por el modelo QUAL2E en el balance de oxígeno, la Tabla 3 consigna la descripción y unidades de los coeficientes relacionadas con el sistema acoplado DBO-OD.

**TABLA 3. Coeficientes asociados al sistema acoplado DBO-OD**

Coeficiente de reacción	Descripción	Unidades	Determinación
K1	Tasa de desoxigenación por DBO carbonácea	días <sup>-1</sup>	Laboratorio
K2	Tasa de reaireación	días <sup>-1</sup>	Ecuaciones empíricas
K3	Tasa de disminución de DBO por sedimentación	días <sup>-1</sup>	Laboratorio y el campo
K4	Tasa de demanda béntica de oxígeno.	mg O2 m2*dia	Laboratorio y el campo

La tasa de desoxigenación por DBO carbonácea se determinó en el laboratorio, realizándose la corrección por el método de Bosko; para calcular la tasa de reaireación el modelo presenta 8 opciones, en cada caso se seleccionó la opción mas adecuada.

Los coeficientes K3 y K4 se utilizan en corrientes que presenten bajas velocidades, permitiendo así la sedimentación de materia orgánica; el sistema río Negro - quebradas afluentes en general presenta velocidades mayores a 0.15 m/s, límite fijado para sedimentación de materia orgánica.

La Tabla 4 consigna los principales coeficientes de reacción utilizados en la modelación.

**TABLA 4. Constantes de reacción utilizadas en la modelación**

Corriente	Número tramo	K1 días -1	Opción K2	K5 día -1	k6 día -1	b1 día -1	b2 día -1	b3 día -1	b4 día -1
Rio Negro	1	0.75	3	10.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	2	0.75	3	10.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	3	1.00	3	10.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	6	2.5	3	5.00	3.50	0.30	1.00	0.15	0.10
	9	2.50	3	5.00	3.50	0.30	1.00	0.15	0.10
	12	2.50	1 ( 5 día-1)	5.00	3.50	0.30	1.00	0.15	0.10
	15	2.50	1 ( 5 día-1)	5.00	1.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	16	2.50	1 ( 50 día-1)	5.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
La Pereira	4	1.40	1 ( 6.5 día-1)	3.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	5	1.30	3	3.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
Cimarronas	7	2.50	1 ( 30 día-1)	10.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	8	2.00	3	10.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
La Mosca	10	2.50	3	5.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	11	1.75	1 ( 8 día-1)	5.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
La Marinilla	13	3.00	3	5.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10
	14	3.00	3	5.00	0.00	0.30	1.00	0.15	0.10

### 3.1.4 Cargas puntuales

La Tabla 5 presenta las características principales de las 15 cargas puntuales utilizadas en la modelación, debe recalcarse la necesidad de refinar las caracterizaciones de los diferentes vertimientos de aguas residuales.

**TABLA 5. Características de las cargas puntuales**

IDENT	FUENTE RECEPTORA	CAUDAL (m3/s)	TEMP (°C)	DBO5 (mg/l)	S.S. (mg/l)	NORG (mg/l)	N NH3 (mg/l)	N NO2 (mg/l)	N NO3 (mg/l)	P ORG (mg/l)	P DIS (mg/l)	COLIF NMP/100 ml FECAL
1	RIONEGRO	0.530	18	4.40	856.00	1.20	0.70	0.00	0.03	0.38	0.23	1.00E+03
2	PEREIRA	0.080	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
3	RIO NEGRO	0.081	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
4	RIO NEGRO	0.054	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
5	CIMARRONAS	0.023	18	45.50	3866.00	1.30	0.30	0.00	1.25	0.09	0.10	0.00E+00
6	CIMARRONAS	0.052	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
7	CIMARRONAS	0.091	18	254.00	40.00	128.30	1.66	0.10	1.63	3.20	0.73	0.00E+00
8	RIO NEGRO	0.002	18	357.00	350.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	0.00E+00
9	LA MOSCA	0.004	18	2000.00	2225.00	16.20	25.00	0.00	0.00	3.00	7.00	0.00E+00
10	LA MOSCA	0.029	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
11	LA MOSCA	0.030	18	1000.00	1228.00	1.50	3.00	0.00	0.00	0.66	0.66	0.00E+00
12	LA MARINILLA	0.044	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
13	LA MARINILLA	0.072	18	300.00	240.00	12.00	18.00	0.00	0.00	3.00	5.00	4.00E+06
14	RIO NEGRO	0.052	18	116.50	56.00	14.50	6.90	0.10	0.10	0.42	0.30	0.00E+00
15	RIO NEGRO	0.800	18	4.30	20.00	1.00	0.50	0.00	0.08	0.06	0.09	4.00E+03



### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Simulación de sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos se simularon utilizando las opciones: sustancia conservativa y sustancia no conservativa, afectada por procesos de sedimentación; en los procesos de calibración y validación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para el escenario hidrológico de verano los sólidos suspendidos aportados por la quebrada La Chachafruto, principal aportante de sólidos al río Negro, se comportan como sustancia no conservativa, afectada por procesos de sedimentación.
- Por el contrario, en el escenario de invierno, los sólidos suspendidos se comportan como sustancia conservativa, sometida solo a procesos de dilución y transporte.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de la simulación para el río Negro, cotejados con los datos de campo, para los escenarios de verano e invierno.

FIG. 4.- Rionegro: Sólidos suspendidos en verano

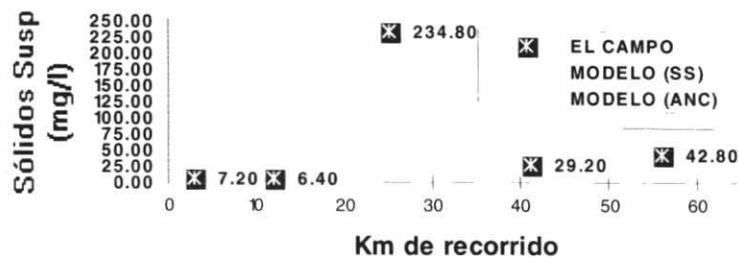
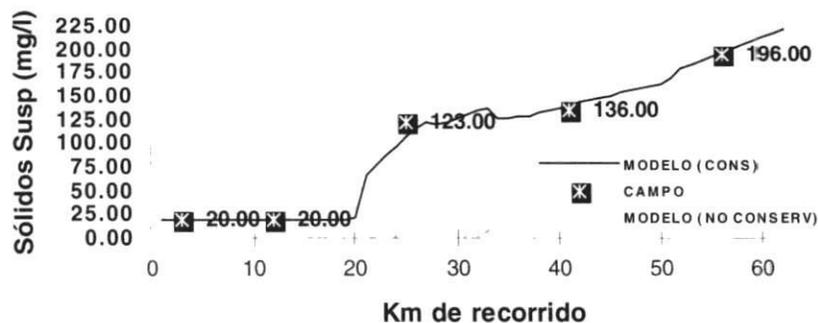


FIG. 5.- Rionegro: Sólidos suspendidos en invierno



### 3.3.2 Simulación oxígeno disuelto - demanda bioquímica de oxígeno

El sistema acoplado DBO-OD se calibró para el escenario de verano, validándose posteriormente para los escenarios de aguas medias e invierno; el río Negro presenta valores bajos de DBO5 (1 a 2 mg/l) , hasta la descarga de las aguas residuales del municipio de Rionegro, alcanzando valores de 15 mg/l de DBO5 a la altura de la estación R3 para el escenario de verano.

Las Figuras 6 y 7, presentan los resultados de la calibración y validación del oxígeno disuelto y DBO5 para verano.

FIG. 6.- Rionegro: Oxígeno en verano

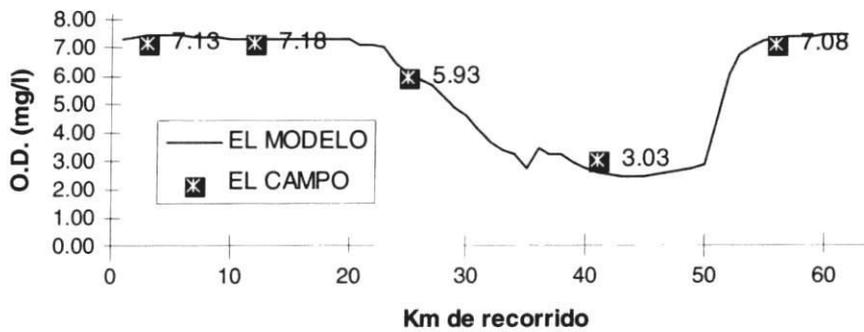
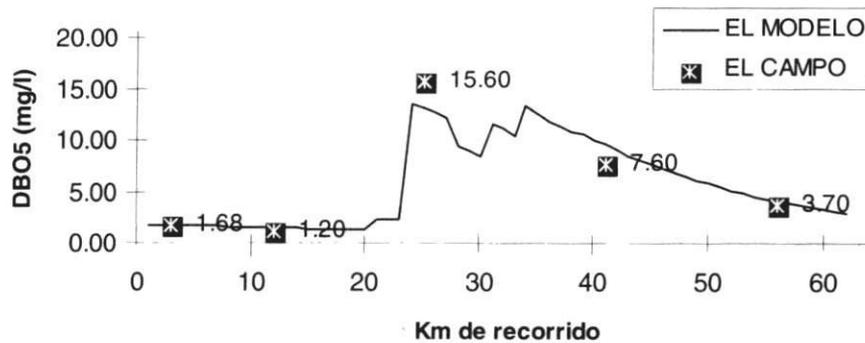


FIG. 7.- Rionegro: DBO en verano



#### 4. PROSPECTIVA DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL RIONEGRO

Se realizó la simulación para los años 2000 y 2010 sin tratamiento; y con tratamiento secundario para el año 2010, con una eficiencia del 80% en la remoción de carga orgánica.

Las Figuras 8 y 9 presentan los niveles de oxígeno disuelto y DBO para los escenarios antes mencionados.

FIG. 8.- Rionegro: Oxígeno en verano

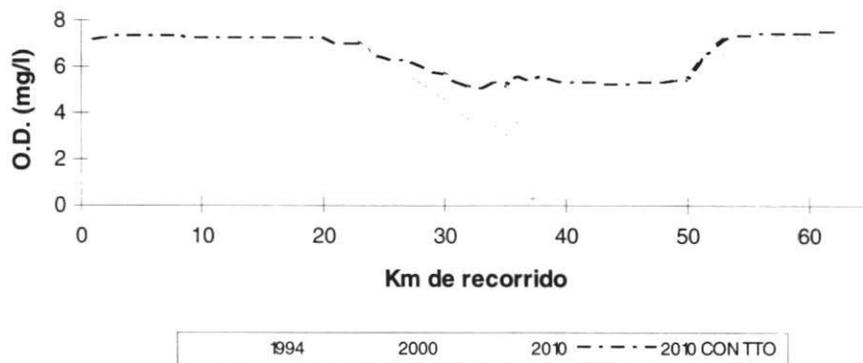
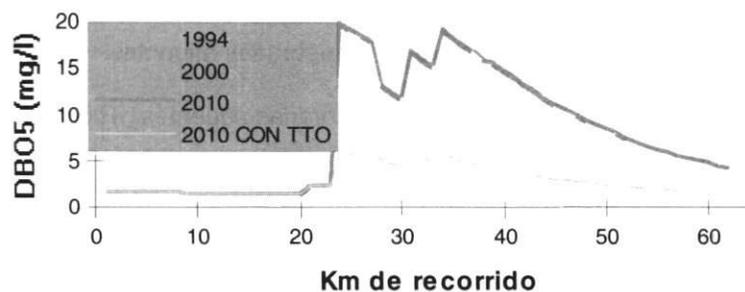


FIG. 9.- Rionegro: DBO5 en verano



En la actualidad el sistema río Negro-quebradas afluentes recibe aproximadamente 17 ton/día de DBO5, de acuerdo con las proyecciones actuales en el año 2010 sin tratamiento se recibirían 26 ton/día de DBO5.

## 5. CONCLUSIONES

El modelo QUAL2E implementado para la simulación de la calidad del agua en la cuenca alta del río Negro, permite en forma ágil, la simulación de escenarios futuros, conformando así una herramienta fundamental de planificación y toma de decisiones sobre el recurso agua en la región.

De acuerdo con la prospección de la calidad del agua para el río Negro, de no acometerse el programa de saneamiento hídrico en la cuenca alta, se presentarían condiciones anóxicas en la corriente hacia el año 2010, en un tramo de aproximadamente 15 kilómetros, en el sector comprendido entre el municipio de Rionegro y el inicio del descenso a río Abajo.

Logrando una eficiencia del 80%, en la remoción de carga orgánica de las aguas residuales, vertidas en la cuenca alta del río Negro, se alcanzarían niveles de oxígeno disuelto de 5 mg/l en la corriente, valor adecuado para la protección de la vida acuática.

El control de los sedimentos generados por la explotación de materiales para la construcción (arenas y agregados) y la continuidad en los programas de recuperación de las zonas de erosión activa en las cercanías del aeropuerto José María Córdova (cárcavas del aeropuerto), se identifican como acciones que deben realizarse a corto plazo, con lo cual se mejoraría ostensiblemente el aspecto de la corriente, controlándose además los procesos de sedimentación y disminución de la sección de flujo.

Con el fin de refinar los resultados de la simulación, se deben continuar las campañas de muestreo de calidad del agua, la operación de la red hidrométrica y las caracterizaciones de aguas residuales domésticas e industriales.

## REFERENCIAS

- CESET, Universidad de Antioquía. Modelo matemático de simulación de la constante de extinción de algunos indicadores de contaminación fecal en el río Negro y quebradas afluentes. Medellín. 1985.
- CORNARE, Estudio de oferta hídrica de la cuenca del río Negro a nivel de microcuencas. Oficina de Planeación. 1990.
- CORNARE, Nishimura Kazuyuki. Monitoreo del río Negro y quebradas afluentes. El Santuario. 1990.
- CORNARE, Diagnóstico de la calidad del río Negro y sus quebradas afluentes. Rionegro. 1986.
- CORNARE, Modelo de simulación QUAL2E para el río Negro y sus quebradas afluentes. El Santuario. 1990.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, Anuario Hidrometeorológico. 1991.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, El modelo QUAL2 en la simulación de la calidad del agua del río Medellín. Revista EPM. Volumen 5. Número 4. 1983.
- INGESERIES LTDA, Plan maestro de saneamiento de las cabeceras municipales de la cuenca alta del río Negro. Bogotá. 1987.
- MORALES, G. Índices de calidad del agua y el río Medellín. Revista AINSA. Volumen 7. 1984.