

CONTRIBUCION AL DESARROLLO DE UN MODELO DE CALIDAD DEL AGUA APROPIADO PARA EVALUAR ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO DEL RIO BOGOTA

Luis A. Camacho* Mario A. Díaz-Granados* y Eugenio Giraldo*

* Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia, A.A.
4976, Bogotá Colombia

RESUMEN

Un modelo matemático de la calidad de agua de un río, calibrado y verificado con datos de campo, es una herramienta útil a nivel de planeamiento en la identificación de alternativas técnicas factibles de saneamiento. En este trabajo se presenta una contribución al desarrollo de un modelo de calidad de agua para las cuencas Media y Baja del Río Bogotá y se describen algunos resultados preliminares de alternativas de saneamiento. Para el desarrollo del modelo calibrado y verificado con datos de campo se han realizado mediciones directas de determinantes de calidad del agua (temperatura, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, etc) en estaciones a lo largo del río, bajo diferentes condiciones hidrológicas; caracterizaciones hidráulicas y fisicoquímicas de las descargas o vertimientos de aguas residuales principales en el tramo de estudio; investigaciones de representaciones matemáticas adecuadas de los procesos físicos de transporte y transformación bio-química de los contaminantes en la corriente; y calibración y verificación del modelo de calidad de agua utilizando técnicas de optimización, cuantificación de incertidumbre y análisis de sensibilidad basadas en análisis de Monte - Carlo. En el presente trabajo se describe la metodología seguida y el avance logrado en cada una de estas actividades en el tramo del Río Bogotá comprendido entre la planta de Tibitoc y su desembocadura en el Río Magdalena. Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes: 1. El modelo QUAL2-K cumple con una representación matemática suficientemente adecuada de los procesos fisico-químicos bajo condiciones anaeróbicas que se dan en la cuenca Media y de los procesos de transporte en la Cuenca Baja del Río Bogotá. 2. La utilización de la metodología generalizada de estimación de incertidumbre basada en técnicas de Monte - Carlo produjo resultados de calibración y verificación del modelo que se consideran suficientemente precisos. 3. La capacidad de auto-purificación de la corriente es muy limitada en la Cuenca Media. 3. Bajo las condiciones actuales de calidad del agua del Río provenientes de la Cuenca Alta incluso descargas pequeñas al paso por Bogotá causan el consumo total del oxígeno disuelto del Río sin que sea posible la auto-depuración natural a lo largo del tramo de la Cuenca Media. 4. Es necesario considerar alternativas novedosas de saneamiento incluyendo la Cuenca Alta, y se requiere extender el plan de monitoreo y la modelación de la calidad en esta zona. 5. Se recomienda una revisión del diseño de las plantas de tratamiento propuestas para el Saneamiento del Río Bogotá dentro del Plan de Ordenamiento Territorial vigente. 6. No es suficiente construir tres plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel secundario o de extender la planta EL Salitre a tratamiento secundario y construir un colector paralelo al Río que recoja todas las descargas de aguas residuales de la Cuenca Media, para devolver las condiciones aeróbicas a la corriente 7. Se sugiere la revisión del avance en el desarrollo del sistema de alcantarillado de la ciudad, de tal manera que se integren claramente todos los componentes del sistema, es decir, Río, Alcantarillado y Plantas de Tratamiento.

1. Introducción

El Río Bogotá en la Sabana tiene una baja capacidad de asimilación de carga orgánica debido a una combinación de bajos caudales que limitan la dilución, bajas pendientes que limitan la reaeración, y gran altitud y temperaturas medias que bajan la concentración de saturación de oxígeno. Al mismo tiempo en su curso por la Sabana debe soportar usos del agua tan exigentes en su calidad como los de suministro de agua potable y de agua para riego. Esta combinación genera unos desafíos muy grandes para las entidades manejadoras del recurso, ya que unos pocos vertimientos no controlados pueden llevar al Río a condiciones de incumplimiento de las características de calidad de agua necesarias para satisfacer la demanda sin riesgos considerables a la salud pública.

En el marco del convenio de investigación entre la Universidad de los Andes y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se adelantó desde Agosto de 2001 el proyecto de “Modelación de la Calidad del Agua del Río Bogotá “ en el tramo Tibitoc – Desembocadura Río Magdalena (Uniandes, 2001d). El objetivo de dicho proyecto fue el de realizar mediciones de campo de calidad del agua que permitieran implementar, calibrar y verificar modelos de calidad del agua del Río que pudieran servir como herramientas de planeación. Dichas herramientas de modelación han sido hasta el momento útiles en la definición y revisión de alternativas óptimas y metas de saneamiento ambiental del Río. En un rango más amplio los modelos pueden ser útiles en la definición de estrategias para garantizar diferentes usos del agua en la cuenca sin riesgos para la salud pública.

Como parte del proyecto se entregaron informes de resultados de campo de cada campaña de mediciones y de la descripción del montaje de los modelos de calidad del agua QUAL2E (EPA, 1995) y QUAL2K (Chapra, 2001) en el tramo estudiado (Uniandes, 2001a, 2001b, 2001c) y el Informe Final (Uniandes, 2001d) en el que se consignan conclusiones y recomendaciones que sintetizan los procesos dominantes, los avances de la calibración y verificación de los modelos, los resultados preliminares de alternativas de saneamiento y acciones recomendadas para la continuación de la investigación incluyendo la extensión en la modelación de la Cuenca Alta del Río. El presente artículo presenta un resumen de este trabajo.

2. Selección y conceptualización del modelo de calidad de agua del Río Bogotá

Se investigó en este trabajo la aplicación de un modelo *comercial* al alcance de todas las entidades distritales y departamentales, universidades, otras entidades y demás personas interesadas, que reprodujera las condiciones observadas de calidad del agua del Río Bogotá bajo diferentes condiciones hidrológicas. El objetivo fue el de utilizar un modelo disponible, conocido, documentado, y útil, y calibrarlo y verificarlo con datos de campo del Río con el fin de generar una herramienta que permitiera a nivel de *planeamiento* examinar alternativas de saneamiento.

El modelo de calidad del agua del Río Bogotá debía contener una representación matemática suficientemente adecuada de los procesos fisico-químicos y de las interacciones columna agua-sedimentos bajo condiciones anaeróbicas que se dan en la cuenca Media del Río Bogotá. En este aspecto en el presente trabajo se hizo un aporte importante al entendimiento de las magnitudes de remoción de la materia orgánica en el ambiente anaerobio del Río Bogotá y de los flujos de metano y de compuestos reducidos de azufre (CRA) desde los sedimentos hacia el cuerpo de agua y a la atmósfera. Por otra parte,

el modelo para la Cuenca Baja del Río Bogotá debía representar adecuadamente los fenómenos de transporte y condiciones de auto-purificación propios de Ríos de Montaña. En este sentido el presente trabajo aportó al conocimiento en la representación de tasas de aireación y de procesos de transporte en estos ríos.

Se evaluó en el estudio la posible aplicación al caso del Río Bogotá de diferentes modelos comerciales tales como QUAL2-E (EPA,), QUAL2-K (Chapra, 2001), QUASAR (Whitehead, *et al.*, 1997), OTIS (Runkel, 1998), ADZ (Beer y Young, 1983), y MIKE-11 (DIH, 1992). Todos los modelos presentaron ventajas y desventajas en la evaluación (ver Uniandes, 2001d); sin embargo se recomendó como modelo *comercial* para el Río Bogotá el modelo QUAL2-K. Este modelo desarrollado por el Profesor Steven Chapra como extensión del modelo QUAL2-E, calcula endógenamente la degradación de la materia orgánica en la metanogénesis bajo condiciones anaeróbicas y representa adecuadamente interacciones agua sedimentos. El modelo desarrollado bajo una aplicación de Visual Basic trabaja en EXCEL y por lo tanto su facilidad de uso y amigabilidad no tiene comparación con los otros modelos.

3. Mediciones de campo y análisis de laboratorio

La realización de tres campañas de mediciones de determinantes de calidad del agua a lo largo del Río y en los puntos de descarga de los principales afluentes, permitieron además de calibrar y verificar los modelos de calidad del agua, entender e identificar procesos dominantes, magnitudes de cargas contaminantes principales, sitios y variables importantes de medición y en general elevaron el estado del arte del conocimiento de los problemas de contaminación del Río en las cuencas Media y Baja (ver Uniandes, 2001d).

La configuración final de puntos de medición se presenta en la Tabla 1 y las Figuras 1 y 2 y las mediciones de determinantes de calidad de agua realizadas en cada campaña se resumen en la Tabla 2. En cada campaña se programó la toma de parámetros de campo (temperatura, pH, conductividad); toma de muestras de agua y sedimentos del río para análisis posterior en el laboratorio, e.g. OD, DBO₅, NTK, etc., y lectura de miras y aforo de caudal en cada estación. La toma de cada muestra se hizo simultáneamente con el aforo de caudal. Se recolectaron muestras de agua en tres verticales distribuidas del río y a dos profundidades de cada vertical (20% y 80% de la profundidad total de la vertical) y la muestra se integró y mezcló bien. En cada vertical se tomaron datos de pH, temperatura del agua, conductividad y oxígeno disuelto (parámetros de campo). A la muestra integrada se le midió una vez más el pH, la temperatura del agua y adicionalmente se midió la temperatura ambiente. Adicionalmente en la vertical correspondiente a la mitad del ancho de sección del río se tomaron las muestras de oxígeno disuelto a 30 cm de profundidad en el frasco tipo Winkler procurando su sellado y evitando que alguna burbuja de aire alterara la muestra. La muestra se fijó a continuación mediante la adición de 1 mililitro de Sulfato Manganeso, Alkali Yoduro, y Acido Sulfúrico para su posterior análisis en laboratorio. Con la muestra integrada se llenaron los demás frascos preparados previamente con los reactivos de preservación. Una hora después de tomada la primera muestra, se tomó una segunda muestra a la cual se le mide el pH, la temperatura del agua y del ambiente, y oxígeno disuelto en campo. Para esta muestra se llena la garrafa de 2 litros a pH natural y se toma la muestra en el frasco Winkler de oxígeno disuelto. Cabe anotar que en algunos puntos de muestreo así como en tributarios o descargas menores del río se programó solamente la toma de la muestra para análisis de DBO₅ y oxígeno disuelto. Se tomaron muestras de sedimentos del lecho del río mediante la draga Eckman en las mismas verticales donde se

tomaron las muestras de agua de la columna. El lodo total de esta muestra se integró para el posterior análisis de demanda béntica de oxígeno.

Con el fin de muestrear en la misma masa de agua se utilizó la metodología ADZ-MDLC (Camacho y Lees, 1999, 2000) para el cálculo de los tiempos medios de viaje y tiempos de arribo de la masa de agua a cada estación, tal como se describe en el Informe No. 1 del trabajo (Uniandes, 2001a). Con base en estos tiempos se programó la hora de toma de cada muestra en cada estación. Nótese que esta metodología es apropiada para calibrar los modelos de calidad del agua. Si llueve en algún punto durante las mediciones, el muestreo se hace sobre la masa diluida que avanza hacia aguas abajo. Se tomaron muestras y contramuestras y en el 5% de los casos se analizaron en dos laboratorios diferentes.

Los resultados de las mediciones se pueden consultar en detalle en los informes de resultados de cada campaña (Uniandes 2001a, 2001b y 2001c). En las Tabla 3 se resumen los rangos de los valores de los determinantes de calidad del agua medidos en las tres campañas antes de Bogotá (Estación la Virgen), después de Bogotá (Variante Mondoñedo), en la desembocadura del Río Bogotá en Girardot, en el Río Magdalena aguas arriba y aguas abajo de la desembocadura de los Ríos Sumapaz y Bogotá.

En la Figura 3, la Figura 4, y la Figura 5 se observan respectivamente los perfiles longitudinales medidos del caudal, el oxígeno disuelto y la DBO de la corriente. Como se observa en la Figura 3, se presentaron condiciones hidrológicas diferentes durante las mediciones, lo cual es de utilidad en la calibración y verificación de los modelos. Se registraron en las tres campañas caudales entre 30 y 40 m³s⁻¹ en la desembocadura del Río Bogotá. En todos los casos el efecto de dilución del Río Bogotá en el Río Magdalena es mayor a 1 en 10! Esto tiene una ventaja importante pues la carga del Río Bogotá en la desembocadura es asimilada por el Río Magdalena sin problema (ver Tabla 3).

Uno de los comportamientos más dicientes del grado de contaminación de una corriente está determinado por el nivel de oxígeno disuelto a lo largo de la corriente. En la Figura 4 se observa el perfil longitudinal de oxígeno disuelto registrado en las tres campañas de medición. Se pueden realizar las siguientes observaciones de dicho perfil,

- En las campañas No. 1 y No. 2 de mayor caudal el nivel de oxígeno disuelto del Río en el extremo de aguas arriba del tramo de estudio es de por sí ya un valor muy bajo entre 2 y 3 mg l⁻¹ mostrando un grado importante de contaminación del Río ocurrido en la Cuenca Alta.
- En estas dos campañas, sin embargo, el Río no alcanza condiciones anaeróbicas antes de la descarga del Río Juan Amarillo cuyo caudal no es tratado por la PTAR El Salitre.
- En la tercera campaña nótese que el Río entra en condiciones anaeróbicas en cercanías de la estación la Balsa 40 km aguas arriba de la PTAR El Salitre. Este comportamiento es esperado si se recuerda que se registran caudales muy bajos cercanos a los 2 m³s⁻¹ en este sector del Río.
- Claramente se observa en los perfiles del oxígeno disuelto de las tres campañas presentados en la Figura 4 el efecto “*despreciable*” de la PTAR el Salitre en la recuperación del oxígeno de la corriente. Nótese como el oxígeno disuelto en ningún caso aumenta por encima de 1 mg l⁻¹ en la estación el Cortijo localizada 500 m aguas abajo de la descarga del canal de agua tratada de la PTAR y cómo en todos los

casos el oxígeno disuelto registrado en el siguiente punto de medición, 5 km aguas abajo, en cercanías del humedal de Jaboque en el parque de la Florida se ha agotado totalmente.

- El Río entra en condiciones anaeróbicas en el humedal de Jaboque (K85.0 aprox) y no recupera algún nivel de oxígeno a lo largo de toda la cuenca media hasta la estación de medición del Puente de la Variante Mondoñedo (K141.4 aprox). Son aproximadamente 60 kilómetros de condiciones anaerobicas a lo largo de los cuales el Río recibe gran parte de las descargas de aguas residuales domésticas, equivalentes a una población de más de 5 millones de habitantes, a las cuales deben sumarse descargas de tipo industrial.
- Cuando se retoman las mediciones sobre el Río en la cuenca baja en el sector de la Guaca (640 m.s.n.m) el Río presenta un nivel de oxígeno disuelto alto entre 6 y 7 mg l^{-1} a consecuencia de la reaireación ocurrida en cerca de 1900 m de caída de elevación. La reaireación ocurre en el tramo de Montaña pasando por el salto del Tequendama o a través de la línea de conducción de la cadena de generación en las turbinas Pelton.
- En el trayecto de la Guaca hacia la desembocadura en el Magdalena, se observa nuevamente, en forma consistente para las tres campañas, una disminución del nivel de oxígeno disuelto hasta un valor cercano a 1 mg l^{-1} .
- La disminución del oxígeno disuelto en este tramo se puede explicar por la disminución en la capacidad de reaireación de la corriente debido a la disminución de la pendiente, la nitrificación (oxidación) de las diferentes especies de nitrógeno y de la degradación aeróbica de la materia orgánica, tal como se presenta más adelante.

El comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se observa claramente en la Figura 5. El perfil longitudinal observado a lo largo del Río es consistente con las condiciones anaeróbicas que se presentan en la corriente. Se observa en forma general un aumento considerable de la DBO después de las descargas de los ríos Juan Amarillo, Fucha, Tunjuelo y Soacha y de los colectores de Engativá, Patio Bonito 2, Gibraltar, y Soacha hasta alcanzar valores por encima de 120 mg l^{-1} en estaciones sobre el Río! Estos valores son muy altos comparados con valores de Ríos del tercer mundo (e.g. Chapra, 1997, Thomann y Mueller, 1984) y contrastan con la baja capacidad de auto-purificación de la corriente en la cuenca media.

Se pueden realizar las siguientes observaciones de acuerdo a las tendencias observadas en las tres campañas de medición:

- El efecto de la dilución de la DBO para caudales altos es muy apreciable. En la campaña No 3 se presentan caudales muy bajos hasta la estación de Vuelta Grande y consecuentemente la DBO es muy alta agotando el oxígeno disponible en la corriente. Igual sucede con los caudales bajos y los valores más altos de DBO observados en esta campaña en la cuenca baja. En la campaña No. 2 se presentan los caudales más altos y se observa una dilución considerable de la DBO al menos hasta la estación las Huertas aguas abajo de la descarga del Río Soacha.
- Cuando se retoman las mediciones en la cuenca baja se observa una reducción considerable en la DBO hasta 40 mg l^{-1} y finalmente una descarga en el Magdalena

con una DBO entre 20 y 30 mg l^{-1} . Esto para el caso de las campañas No. 2 y No. 3 que presentan los caudales más altos en este tramo.

4. Calibración, verificación y análisis de sensibilidad del modelo

La utilidad de los modelos matemáticos está determinada en gran medida por su habilidad en reproducir con precisión series de datos observados, *i.e.* el nivel de calibración logrado, y mejor, por la capacidad predictiva al describir otras series de tiempo sin que se requiera ajuste alguno de los parámetros calibrados. Es necesario y honesto utilizar técnicas que permitan incorporar y cuantificar la incertidumbre que existe en la estructura y parámetros del modelo y en los datos observados con el fin de determinar la capacidad predictiva real de dicho modelo. Adicionalmente, dada la complejidad de modelos de calidad del agua como el QUAL2E y el QUAL2K, caracterizados por un gran número de parámetros, se requieren metodologías adecuadas y objetivas de calibración que permitan determinar los procesos y parámetros dominantes correspondientes a partir de los datos observados.

En el proyecto, los modelos de calidad del agua QUAL2E (EPA, 1995) y QUAL2K (Chapra, 2001) se extendieron para ser aplicados eficientemente en el marco de simulaciones de Monte Carlo. Esto permitió utilizar los conceptos de la metodología generalizada de incertidumbre (GLUE, Beven y Binley, 1992), implementados en la herramienta de análisis de resultados de Monte Carlo (MCAT, Lees y Wagener, 2000), para la calibración de los modelos, el análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración y la cuantificación de la incertidumbre estructural, paramétrica y de los datos de entrada en la modelación. En el trabajo se avanzó en forma importante en la calibración y verificación de los modelos anteriores utilizando la metodología GLUE y la herramienta MCAT a partir de los datos observados de calidad del agua en las tres campañas de medición.

Sin considerar mecanismos de crecimiento de phytoplankton el modelo QUAL2K está caracterizado por siete parámetros de calibración (ver Tabla 4). El modelo QUAL2K se calibró con los datos observados de la campaña de mediciones No. 2 y el modelo calibrado, sin modificación alguna en los parámetros identificados como “óptimos”, se corrió luego en modo de verificación con los datos observados en las campañas de mediciones No. 1 y No. 3. En la Figura 6 se puede apreciar la bondad del ajuste de la calibración del modelo QUAL2K para el oxígeno disuelto y en la Figura 7 el ajuste para el fósforo y el nitrógeno total respectivamente. Más importante, en las Figuras 8, 9 y 10 se puede apreciar el ajuste logrado por el modelo en el modo de verificación para los datos de la Campaña 1 de oxígeno disuelto, ion amonio y fósforo orgánico. Nótese que la verificación se realiza utilizando los mismos parámetros calibrados para los datos de la campaña No. 2.

Los resultados de calibración y verificación del modelo QUAL2K se consideran adecuados y suficientemente precisos. Sin embargo en el marco de la investigación (Uniandes, 2001d) se ha reconocido que la incertidumbre en los parámetros y resultados del modelo es todavía alta y faltan datos de mediciones bajo otras condiciones hidrológicas para obtener resultados más confiables en la calibración del modelo de calidad.

5. Resultados preliminares de simulaciones y alternativas de saneamiento

Un modelo matemático de la calidad de agua de un río calibrado y verificado con datos de campo es una herramienta útil a nivel de planeamiento en la identificación de causas principales de contaminación y de alternativas técnicas factibles de saneamiento. En este trabajo se describen algunos resultados de simulaciones y alternativas de saneamiento del Río que deben considerarse como *preliminares* hasta que la incertidumbre en la calibración del modelo sea reducida y se analicen los datos de campañas de medición adicionales. Las simulaciones y alternativas de saneamiento consideradas incluyen,

- Evaluación de la capacidad de dilución y autopurificación del río en la Cuenca Media para condiciones *actuales* de calidad del agua en la estación la Virgen
- Evaluación de la capacidad de dilución y autopurificación del río en la Cuenca Media para condiciones *mejoradas de calidad del agua en la Cuenca Alta*
- Evaluación del efecto del esquema vigente del Plan de ordenamiento Territorial POT del Distrito que incluye tres plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR's, con tratamiento secundario.

5.1 Evaluación de la capacidad de autopurificación de la corriente

Este escenario pretende determinar la capacidad de autodepuración del Río Bogotá. Se asume que *no ocurre ninguna descarga de aguas residuales al Río* al paso por la ciudad de Bogotá y se modela la calidad del agua resultante en el Río utilizando los valores *observados* antes de la descarga de la PTAR el Salitre, en la estación la Virgen, para una condición de verano similar a la de la Campaña No. 3. Aplicando el modelo QUAL2K calibrado con los parámetros estimados para el criterio combinado entre la Virgen y Alicachín se obtienen los resultados para oxígeno disuelto que se presentan en la Figura 11. Como puede observarse, claramente el Río Bogotá tiene una capacidad de auto-purificación muy limitada en la Cuenca Media. Teniendo en cuenta la carga contaminante que el Río tiene actualmente a la altura de la estación la Virgen aguas abajo de la desembocadura del Río Frío, *i.e.* 3 mg l^{-1} de OD, 10.5 mg l^{-1} de DBO, 1 mg l^{-1} de NH_4^+ , 0.6 mg l^{-1} de fósforo orgánico y 0.2 mg l^{-1} de fósforo soluble, éste solamente reestablecería en los aproximadamente 100 km de la cuenca media el nivel de oxígeno inicial después de degradar la materia orgánica y oxidar las especies de nitrógeno, nitrógeno orgánico, ion amonio y nitritos. A pesar de que el Río no entraría bajo condiciones anaeróbicas, al final de la Cuenca Media el oxígeno disuelto sería solamente de 2 mg l^{-1} .

Si se lograra eliminar la carga contaminante casi completamente a la altura de la estación la Virgen localizada en cercanías del municipio de Cota y el Río tuviera unas condiciones de calidad dadas por 5 mg l^{-1} de OD, 5 mg l^{-1} de DBO, 0.05 mg l^{-1} de NH_4^+ y 0.03 mg l^{-1} de fósforo orgánico el efecto de auto-purificación sería el que se muestra en la Figura 12. Bajo estas condiciones nótese que el Río pasaría con suficiente oxígeno por encima de 3 mg l^{-1} . Nótese que esta alternativa estaría justificada si se adelantara por completo el saneamiento en la Cuenca Alta del Río Bogotá.

5.2 Evaluación del esquema vigente de saneamiento del POT de Bogotá

En este escenario se simula la calidad del agua del Río Bogotá considerando tratamiento secundario en las PTAR's El Salitre, Fucha y Tunjuelo. El agua residual descargada después del tratamiento secundario se modela con las siguientes características: $DBO_5 = 20 \text{ mg l}^{-1}$, $OD = 3 \text{ mg l}^{-1}$, $SST = 30 \text{ mg l}^{-1}$, $NH_4^+ = 2.5 \text{ mg l}^{-1}$, Fósforo orgánico = 1.1 mg l^{-1} , Fósforo soluble = 0.5 mg l^{-1} . Los caudales modelados en las tres plantas son los de operación a la capacidad máxima de las plantas considerando toda el agua residual y combinada de Bogotá, esto es $12.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $10.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $12.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente.

Para este escenario, la aplicación del modelo QUAL2K calibrado entre la Virgen y Alicachín resulta en los niveles de oxígeno disuelto que se presentan en la Figura 13. Como era de esperarse, de acuerdo a los resultados del escenario anterior, la operación conjunta de las tres plantas no restablece las condiciones aeróbicas a todo lo largo del Río. Las descargas de las plantas Fucha y Tunjuelo de 3 mg l^{-1} de oxígeno disuelto no alcanzan a establecer condiciones aeróbicas aguas abajo en la Cuenca Media.

Al igual que se simuló anteriormente, si el oxígeno disuelto tuviera un valor cercano al nivel de saturación, *i.e.* 5 mg l^{-1} , en inmediaciones de la PTAR el Salitre, el efecto conjunto de las tres plantas sería el que se aprecia en la Figura 14. Nótese que el efecto combinado de las tres plantas proporcionaría un nivel mínimo e insuficiente de oxígeno disuelto en la corriente por debajo de 1 mg l^{-1} .

6. Conclusiones y Recomendaciones

Las principales conclusiones del presente trabajo se pueden resumir así:

- En el presente trabajo se presenta la calibración del modelo QUAL2K de calidad de agua utilizando mediciones de campo de la campaña No. 2 y se realiza un ejercicio de verificación de los parámetros estimados utilizando los datos de la campaña de mediciones No. 1 (Uniandes 20001a). El procedimiento de calibración utiliza la técnica avanzada de estimación de incertidumbre generalizada (Beven y Binley, 1992) a partir de resultados de simulaciones de Montecarlo. Esta técnica ha permitido establecer los parámetros más sensibles de los modelos y ha permitido establecer valores óptimos considerando funciones objetivo definidas en el presente proyecto. Adicionalmente utilizando la herramienta de análisis de series de MonteCarlo (MCAT, Lees y Wagener, 2000) se han producido intervalos de confianza en los resultados de los modelos. Los valores "óptimos" de los parámetros de los modelos calibrados con los datos de la campaña No. 2 han producido resultados que se pueden considerar satisfactorios en el modo de verificación de los datos de la campaña No.1 y de la campaña No. 3, si bien se indica que la incertidumbre en los parámetros de calibración de los modelos es todavía alta. Hacen falta condiciones hidrológicas para que los modelos de calidad del agua sean validados y las alternativas de saneamiento propuestas sean robustas.
- Bajo las condiciones actuales de calidad del agua del Río provenientes de la Cuenca Alta incluso descargas pequeñas al paso por Bogotá causan el consumo total del oxígeno disuelto del Río sin que sea posible la auto-depuración natural a lo largo del tramo de la Cuenca Media. Es necesario entonces considerar alternativas novedosas de saneamiento en la Cuenca Alta, por lo que se propone extender el plan de monitoreo y la modelación de la calidad.

- Se requiere una revisión del esquema vigente en el POT para el saneamiento del Río Bogotá que incluye tres plantas de tratamiento secundario. Se propone la revisión y el avance en el desarrollo del sistema de alcantarillado de la ciudad, de tal manera que se integren claramente todos los componentes del sistema, es decir, Río, Alcantarillado y Plantas de Tratamiento.
- Las alternativas modeladas indican que el esquema de tres plantas de tratamiento secundario, Salitre, Fucha y Tunjuelo, no es suficiente para devolver condiciones aeróbicas a la corriente, en especial si las condiciones de calidad del agua en la corriente a la entrada de la ciudad están tan deterioradas como las actuales.
- Se considera pertinente considerar entre otras, alternativas novedosas de saneamiento en la Cuenca Alta, alternativas de aumento del caudal base de dilución de la corriente al paso por la ciudad, alternativas de utilización de humedales o sistemas de tratamiento biológico para la remoción de patógenos, y alternativas de dragado de lodos o aumento de la capacidad hidráulica y velocidad de la corriente.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, y en especial a Humberto Triana, Daniel Posada, Gustavo Herrán, Nubia León y Carlos Giraldo por el apoyo, las revisiones, y discusiones llevadas a cabo durante el proyecto de Modelación de la Calidad del Agua del Río Bogotá.

8. Referencias bibliográficas

- Beer, T. and Young P.C., (1983). Longitudinal dispersion in natural streams, *Journal of Environmental Engineering*, **109**, No5, ASCE, 1049-1067.
- Bencala, K.E., and Walters RA., (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: a transient storage model, *Water Resources Research*, **19**, No. 3, 718-724.
- Beven, K. J. (1998). Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) package v.1.0– User manual, University of Lancaster.
- Beven, K. J. y Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration y uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, **6**, 279-298.
- Camacho, L.A., Lees, M.J., (1999). Multilinear discrete lag-cascade for channel routing, *Journal of Hydrology*, **226**, No.1-2, 30-47.

- Camacho, L. A., Lees, M. J., (2000) Modelación del transporte de solutos en ríos bajo condiciones de flujo no permanente: un modelo conceptual integrado, *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina, Tomo I, pp. 43 – 54
- Chapra, S. C. (1997). Surface Water-Quality Modelling, The McGraw-Hill Companies. Inc., New York.
- Chapra, S. C. (2001). QUAL2-K Water quality model, Suministro directo a la Universidad de los Andes
- DHI (1992), MIKE11 User Manual, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Freer, J., Beven, K. J., y Ambrose, B. (1996). Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach, *Water Resources Research*, **32**, (7), 2161-2173.
- Green, H. M., Beven, K. J., Buckely, K, y Young, P. C. (1994). Pollution prediction with uncertainty. In *Mixing and transport in the environment* (Ed. K. J. Beven, P. Chatwin, J. Millbank). John Wiley & Sons, Chichester, 113-137.
- HIDROESTUDIOS S.A. - EAAB, (2001) Estudios hidráulicos, geotécnicos y topográficos para definir el nivel de los jarillones y obras requeridas para mitigar el riesgo de inundaciones del Río Bogotá en el tramo Conejera – Alicachín, Informe Final, Bogotá.
- Lees, M.J., Camacho, L.A., Chapra, S., (2000) On the relationship of transient-storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams, *Water Resources Research*, **36**, No.1, 213-224.
- Lees, M. J. y Wagener, T. (2000). Monte-Carlo Analysis Tool (MCAT) v.2, User Manual, *Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine*, 27 p.
- Spear, R. C. and Hornberger, G. M. (1980). Eutrophication in Peel Inlet, II, Identification of critical uncertainties via Generalised Sensitivity Analysis, *Water Research*, **14**, 43-49.
- Thomann, R.V., Mueller, J. A., (1987). Principles of Surface Water Quality Modelling and Control, Harper & Row Publishers, New York.

US-EPA (1995) Qual2E Windows Interface User's Guide, tomado de la página WEB oficial de la EPA, modelo QUAL2E.

Universidad de los Andes – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2001a), Proyecto de modelación de la calidad del agua del Río Bogotá, Informe 1 Campaña de mediciones Agosto de 2001.

Universidad de los Andes – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2001b), Proyecto de modelación de la calidad del agua del Río Bogotá, Informe 2 Campaña de mediciones Septiembre de 2001.

Universidad de los Andes – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2001c), Proyecto de modelación de la calidad del agua del Río Bogotá, Informe 3 Campaña de mediciones Octubre de 2001.

Universidad de los Andes – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2001d), Proyecto de modelación de la calidad del agua del Río Bogotá, Informe Final, Diciembre 2001.

Young, P.C., and Wallis, S.G., (1993) Solute Transport and Dispersion in Channels. In Channel Network Hydrology (Ed. K. Beven and M.J. Kirby). John Wiley & Sons, Chichester, pp. 129-174.

Wagener T., Lees, M. J., Wheater, H. S. (2000). Incorporating predictive uncertainty into a rainfall-runoff modelling system. Paper presented at Hydroinformatics 2000 Conference, Iowa, USA.

Whitehead, P.G., Williams R.J., and Lewis D.R. (1997). Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development, *The Science of the Total Environment*, **32**, (13), 3579-3596

Tabla 1- Localización georreferenciada y abscisado de los sitios de medición y descarga a lo largo del Río Bogotá

	ESTACION	COORDENADAS		Abscisa [km]
		E	N	
CUENCA MEDIA	Estación Hda El triunfo	1,012,391,062	1,041,685,938	K 0 +000
	Estación El Espino	1,011,734,062	1,044,217,000	K 3 +375
	Río Negro	1,008,454,125	1,039,977,188	K 5 +625
	Río Teusacá	1,019,795,188	1,037,694,250	K 16 +875
	Estación Pte Vargas	1,007,899,438	1,035,938,000	K 22 +625
	Estación La Balsa	1,000,717,688	1,025,809,875	K 51 +875
	Río Frío	999,592,938	1,026,479,500	K 53 +625
	Estación La Virgen	997,482,000	1,021,779,750	K 63 +875
	Estación Vuelta Grande	994,113,812	1,015,811,438	K 79 +875
	Canal Entrada Planta BAS	996,343,312	1,014,653,188	BAS
	Descarga By Pass Juan Amarillo	996,234,125	1,014,813,000	K 80 +414
	Canal Agua Tratada Juan Amarillo	994,615,750	1,015,593,000	K 80 +752
	Estación El Cortijo	994,545,438	1,014,932,875	K 81 +335
	Descarga Negativa	992,199,625	1,014,284,325	K 85 + 155
	Descarga Jaboque	991,980,000	1,014,144,000	K 85 + 225
	Estación Pte. Cundinamarca	989,825,000	1,011,375,000	K 94 +748
	Hacienda San Fco.	990,784,625	1,007,773,000	K 105 +629
	Río Fucha	992,495,000	1,007,235,000	K 106 +249
	Descarga Estación Bombeo Fontibón	992,495,000	1,007,235,000	K 106 +299
	Aguas Arriba Saucedal II	989,612,875	1,006,725,688	K 107 +995
	Descarga Estación Bombeo Saucedal II	989,612,875	1,006,725,688	K 108 +381
	Descarga Estación Bombeo Patio Bonito II	988,904,000	1,006,403,000	K 109 +385
	Descarga Estación Bombeo Gibraltar	988,904,000	1,006,403,000	K 110 +175
	Estación La Isla	984,425,500	1,003,664,000	K 120 +700
Río Tunjuelo	984,483,625	1,002,186,438	K 121 +169	
Canal Soacha (Soacha 1)	981,659,625	999,465,500	K 130 +471	
Río Soacha (Soacha 2)	981,659,625	999,465,500	K 130 +471	
Estación Las Huertas	981,767,130	999,514,630	K 131 +368	
Descarga Colector Soacha	981,009,060	998,015,750	K 134 +314	
Pte Variante Mondoñedo	980,650,060	994,363,560	K 141 +375	

Tabla 2 (cont.)- Localización georreferenciada y abscisado de los sitios de medición y descarga a lo largo del Río Bogotá

	ESTACION	COORDENADAS		Abscisa [km]
		E	N	
CUENCA BAJA	Pte La Guaca	954,456,812	999,608,500	K 176 +155
	Quebrada Santa marta	957,060,000	999,120,000	K 177 +405
	Aguas Abajo Santa Marta	906,620,312	991,816,625	K 177 +655
	Rio Apulo	942,760,000	990,200,000	K 197 +905
	Aguas Abajo Rio Apulo	942,700,000	990,060,000	K 198 +155
	Descarga Tocaima Arriba Pte. Tocaima – Agua de Dios	937,771,250	983,833,500	K 210 +405
	Descarga Tocaima 1	937,383,312	983,661,750	K 210 +643
	Pte. Tocaima Agua de Dios	937,383,312	983,661,750	K 210 + 655
	Descarga Tocaima2	937,383,312	983,661,750	K 210 +667
	Descarga Tocaima 3	937,383,312	983,661,750	K 210 +679
	Desembocadura Bogotá	920,717,125	965,244,562	K 264 +155
	Pte. Variante Melgar Espinal (Magdalena) Aguas Arriba Río Sumapaz	962,500,000	921,350,000	Río Mag.
	Desembocadura Sumapaz	1,007,190,812	934,571,062	Río Mag.
	Pte. Ferrocarril, Aguas Abajo Río Bogotá (Magdalena)	966,580,000	918,540,000	Río Mag.

Tabla 3 – Determinantes de calidad del agua analizados en cada campaña.

Medición y/o dato	Campaña No. 1	Campaña No. 2	Campaña No. 3
Aforos de caudal en cada sitio	✓	✓	✓
Temperatura y pH	✓	✓	✓
Conductividad	✗	✗	✓
DBO ₅ Total	✓	✓	✓
DBO ₅ Filtrada	✗	✓	✓
Oxígeno disuelto OD	✓	✓	✓
DQO Total	✗	✓	✓
DQO Filtrada	✗	✓	✓
Sólidos suspendidos totales SST	✓	✓	✓
Nitrógeno total Kjeldahl NTK	✗	✓	✓
Ion amonio NH ₄	✓	✓	✓
Nitritos NO ₂	✗	✓	✓
Nitratos NO ₃	✓	✓	✓
Fósforo total	✓	✓	✓
Fósforo soluble	✓	✓	✓
Sulfuros	✓	✓	✓

Alcalinidad	x	x	✓
Metales, Cd, Cu, Cr, Pb, Ni	✓	✓	✓
Coliformes totales	✓	✓	✓
E-Coli	✓	✓	✓
Presencia patógenos Salmonella, Shigella, Giardia	x	✓	✓
Análisis muestras columna agua –sedimentos, metanogénesis, flujo CH ₄ , compuestos reducidos de azufre, flujos CRA	x	✓	✓
Demanda béntica	x	✓	✓

Tabla 4 – Parámetros del modelo QUAL2K

Abreviación	Descripción
DescC	Tasa de descomposición rápida de la materia orgánica
HydroIN	Hidrólisis de nitrógeno orgánico
NitrifA	Tasa de nitrificación de amonio
DenitN	Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)
HydroIP	Hidrólisis de fósforo orgánico
HidroIPOM	Hidrólisis de la materia orgánica particulada
Velasent	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada

LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO CUENCA MEDIA

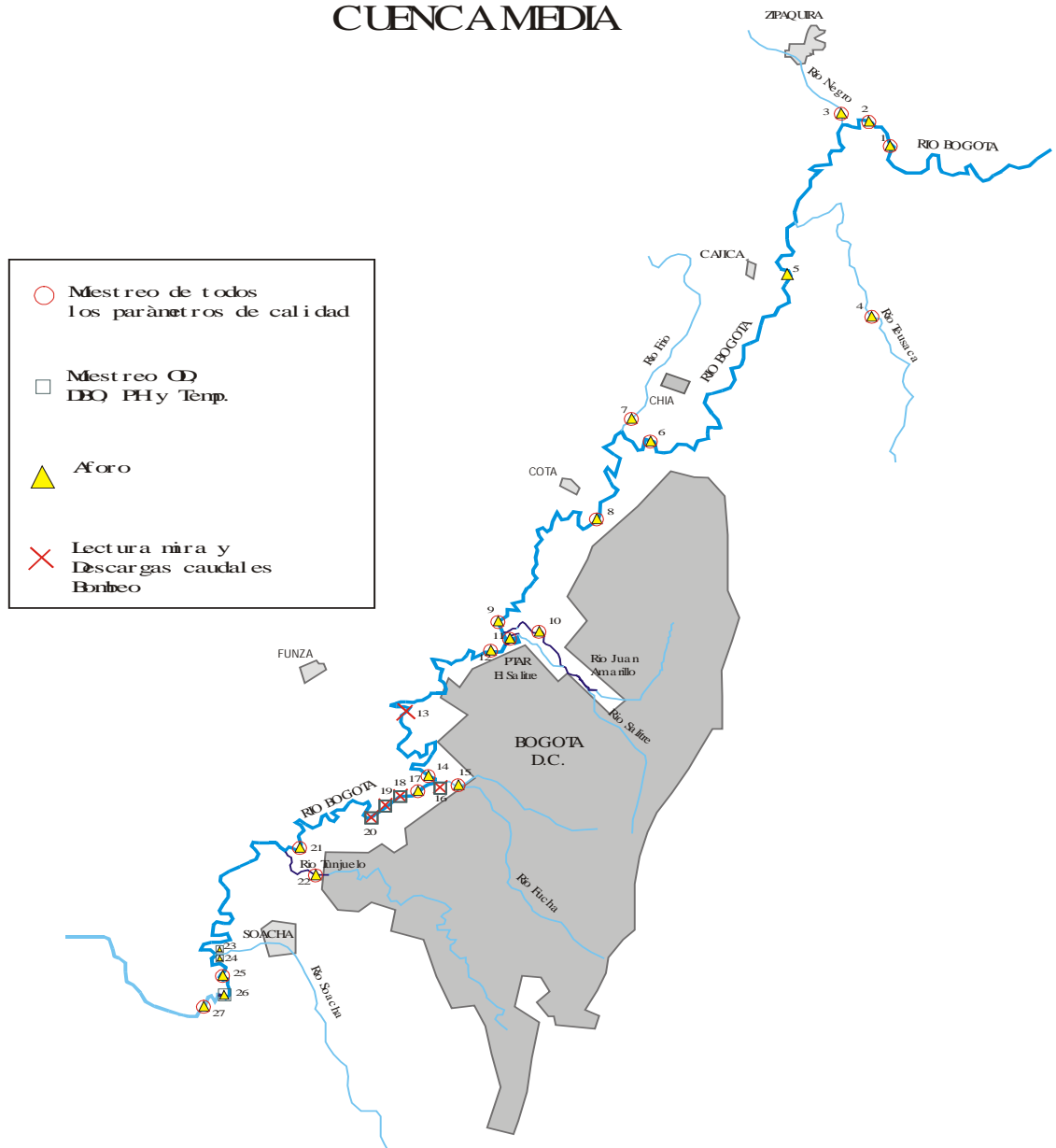


Figura 1 – Localización aproximada de las estaciones de medición en la cuenca media

LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO CUENCA BAJA

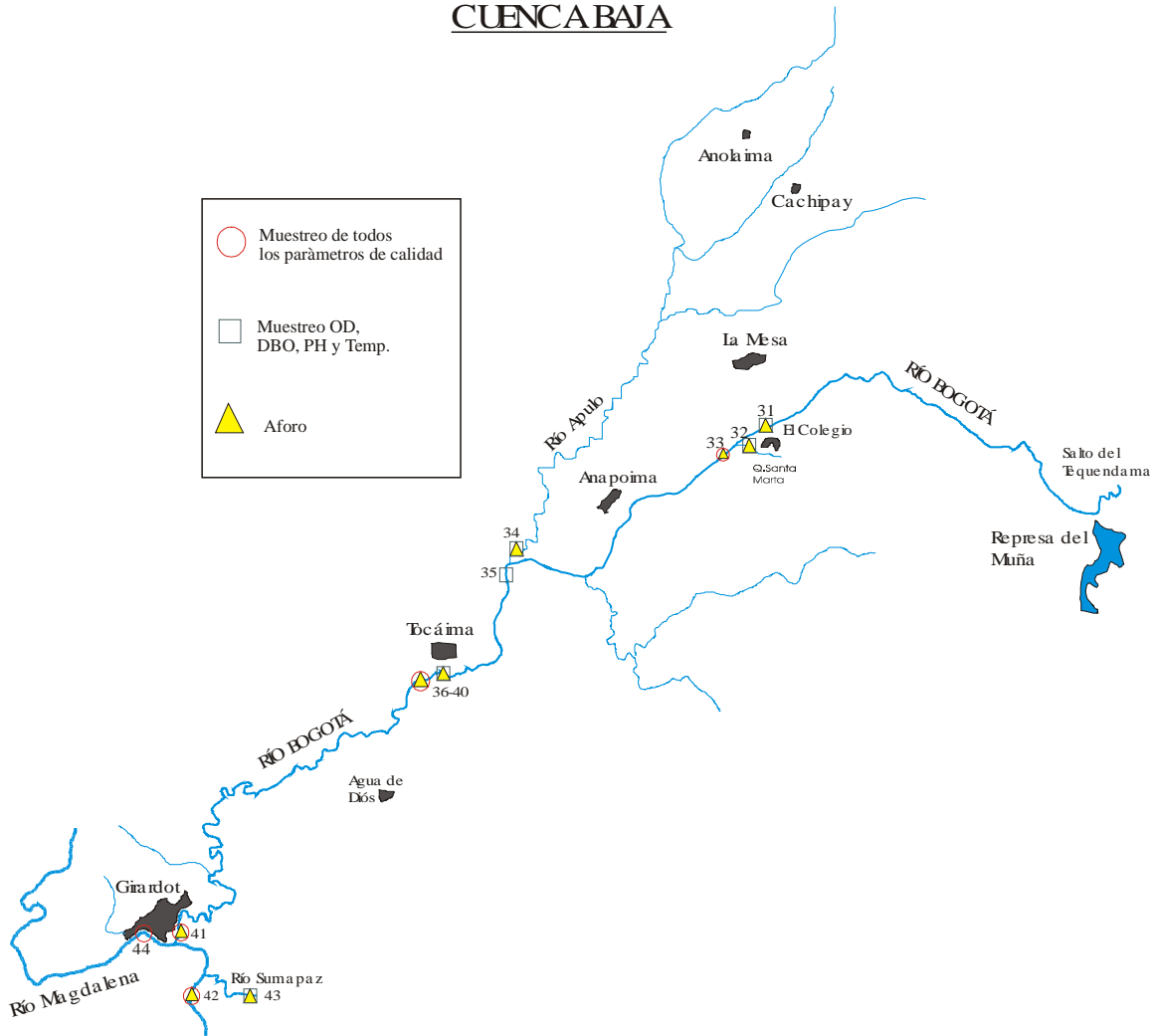


Figura 2 – Localización aproximada de las estaciones de medición en la cuenca baja

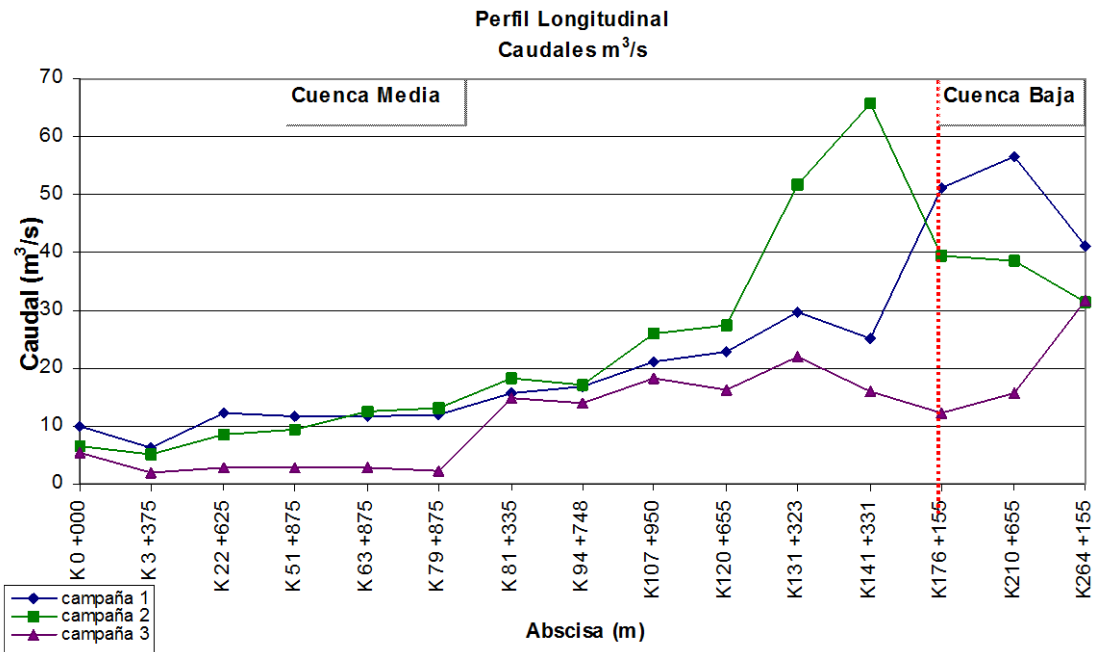


Figura 3 – Perfil longitudinal de caudal observado en las tres campañas de medición

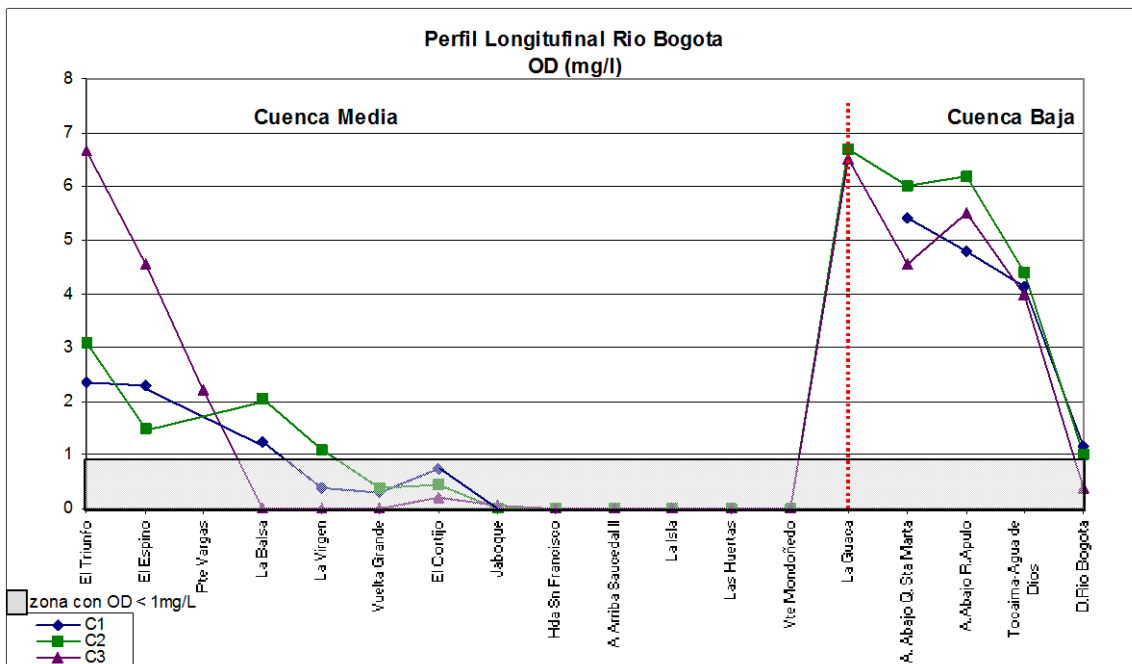


Figura 4 – Perfil longitudinal de OD Cuenca Media- Baja

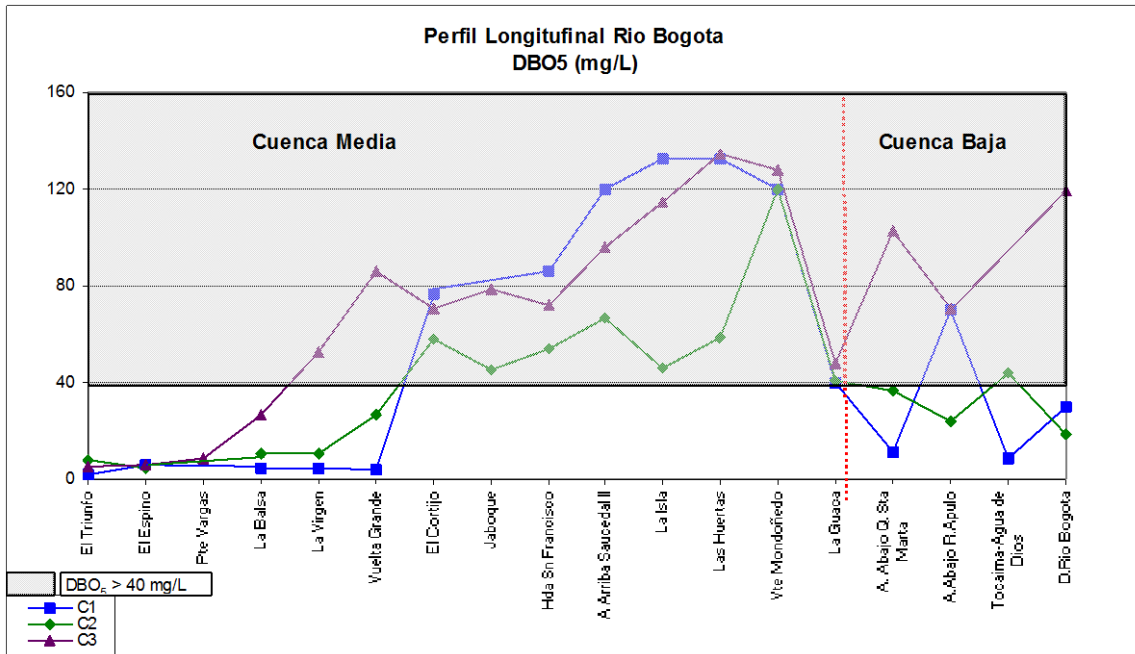


Figura 5 – Perfil longitudinal de DBO_5

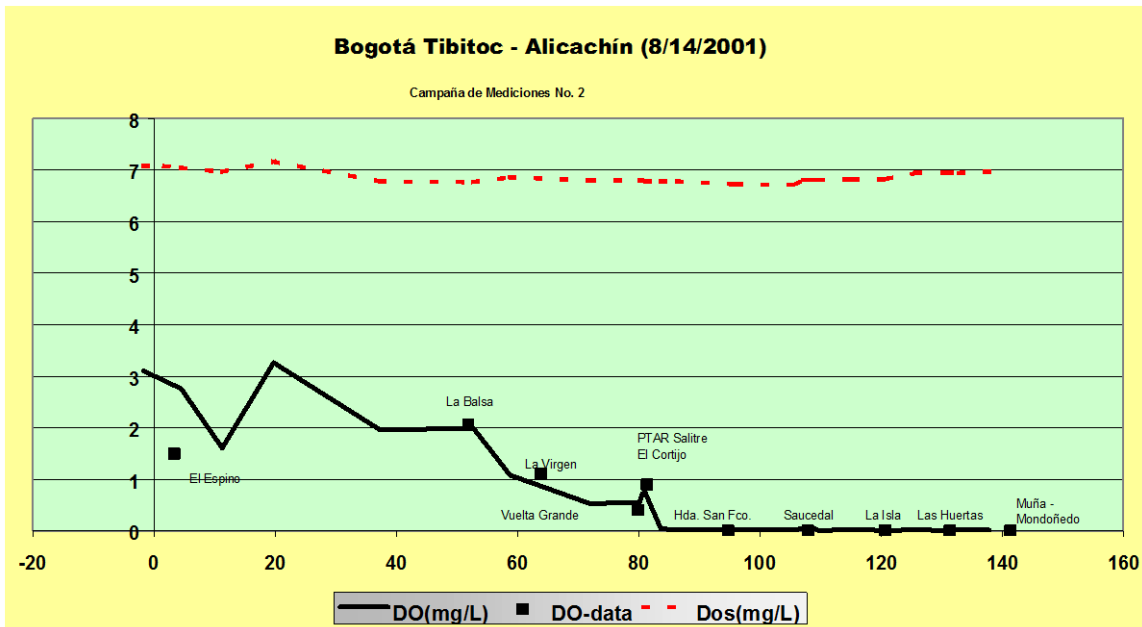


Figura 6 – Resultados de calibración oxígeno disuelto datos Campaña 2

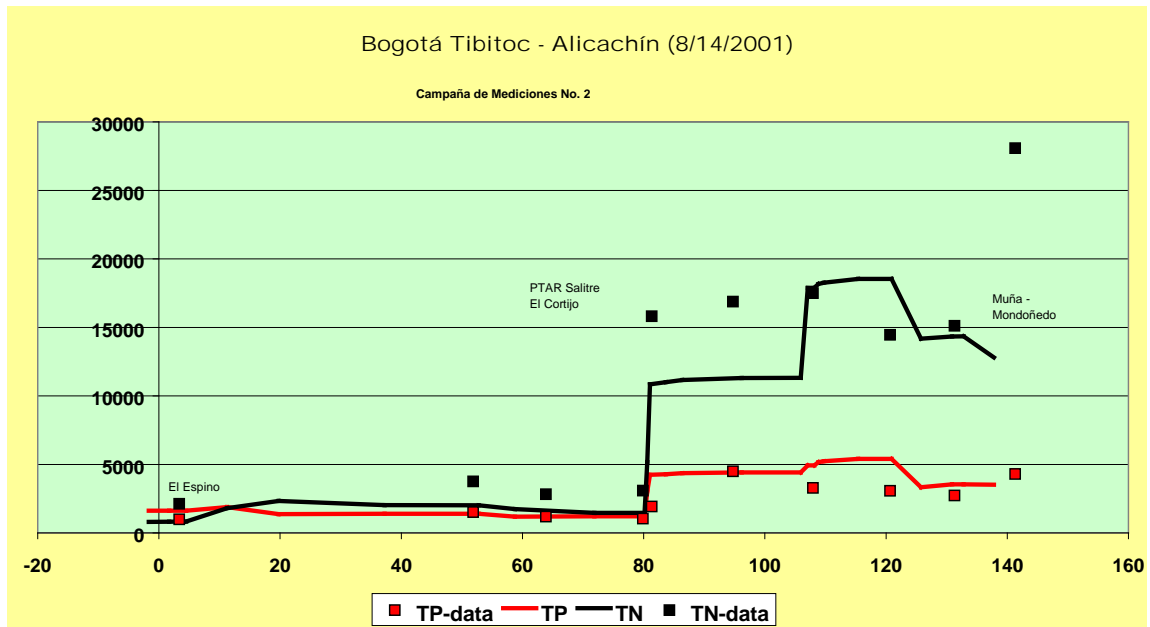


Figura 7 – Resultados de calibración de nitrógeno total y fósforo total datos Campaña 2

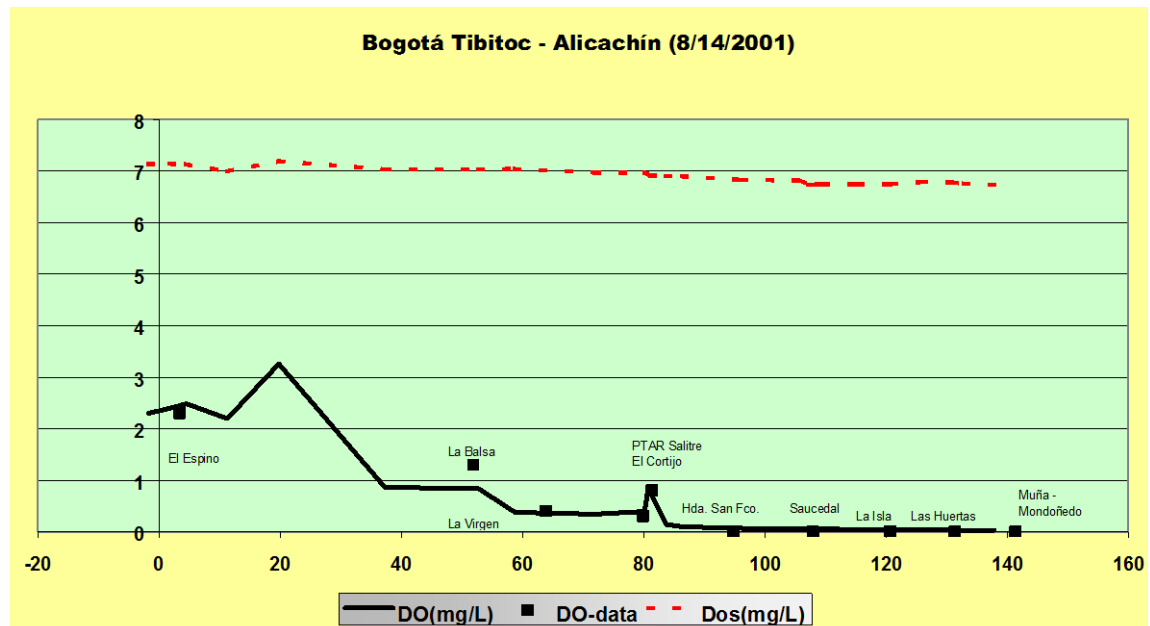


Figura 8 – Resultados de verificación de oxígeno disuelto modelo QUAL2K. Campaña No. 1

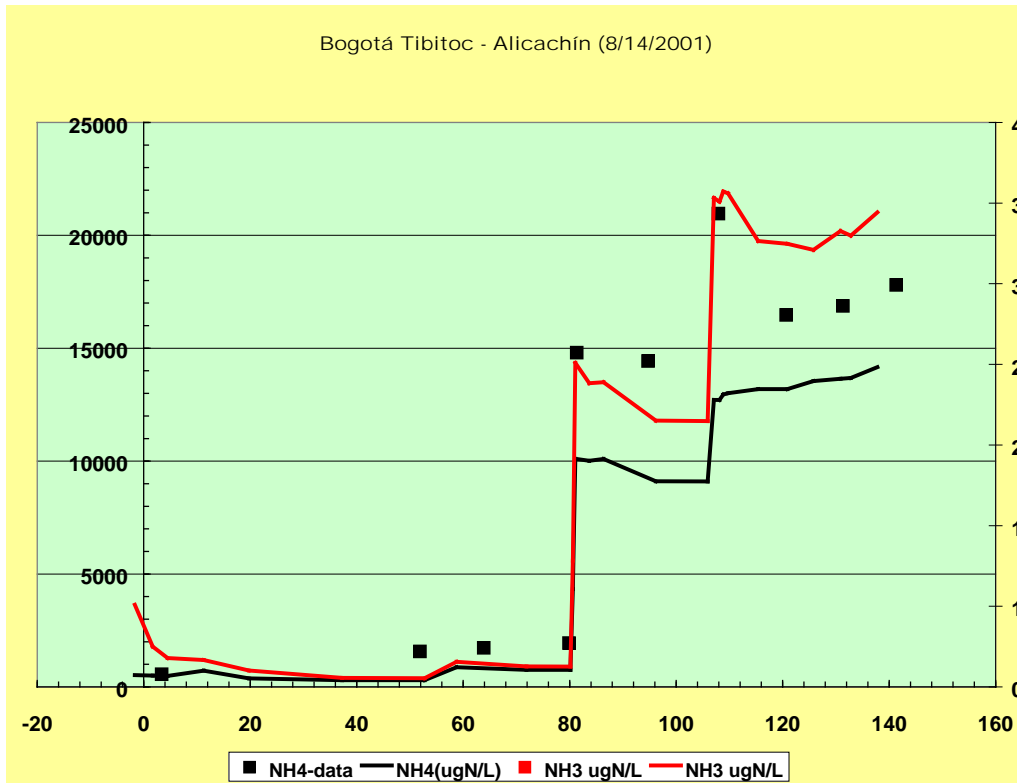


Figura 9 – Resultados de verificación de ion amonio modelo QUAL2K – Campaña No. 1

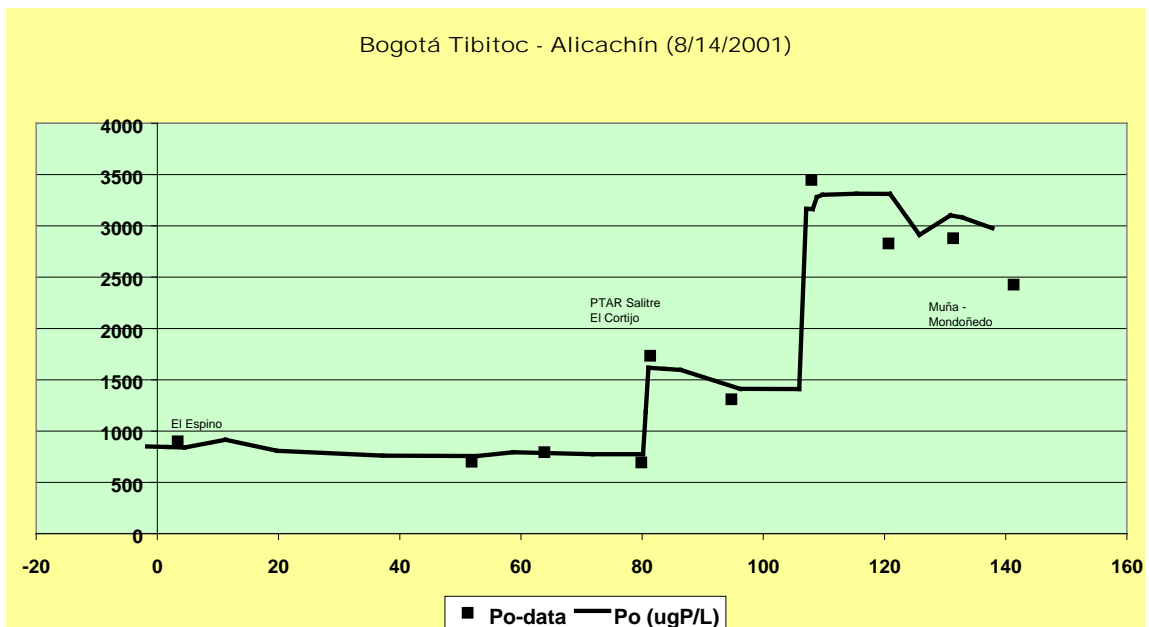


Figura 10 – Resultados de verificación de fósforo orgánico modelo QUAL2K – Campaña No. 1

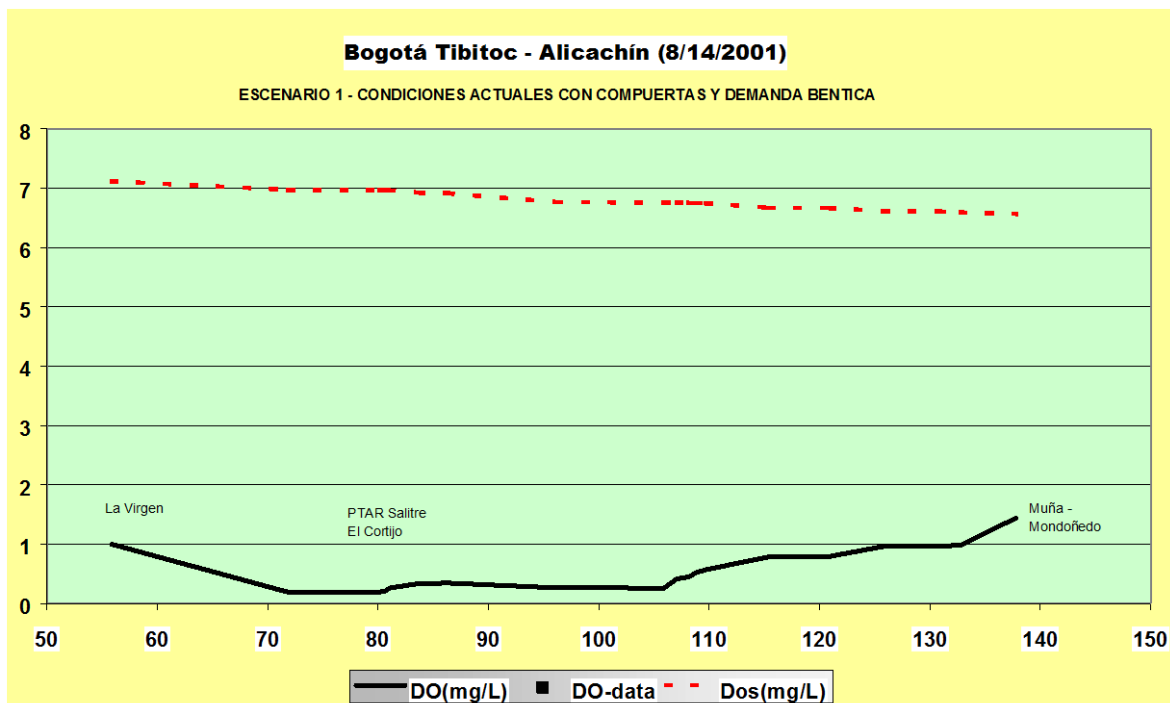


Figura 11 – Evaluación de la capacidad de autopurificación de la corriente condiciones actuales

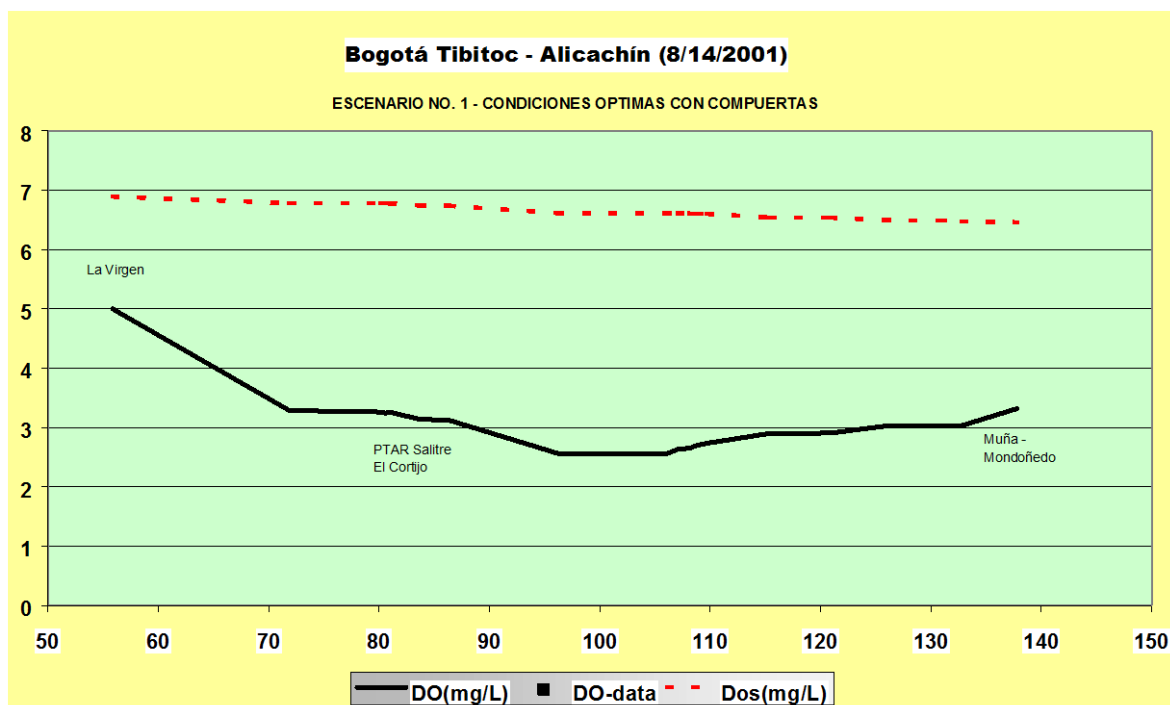


Figura 12 – Evaluación de la capacidad de autopurificación de la corriente condiciones actuales

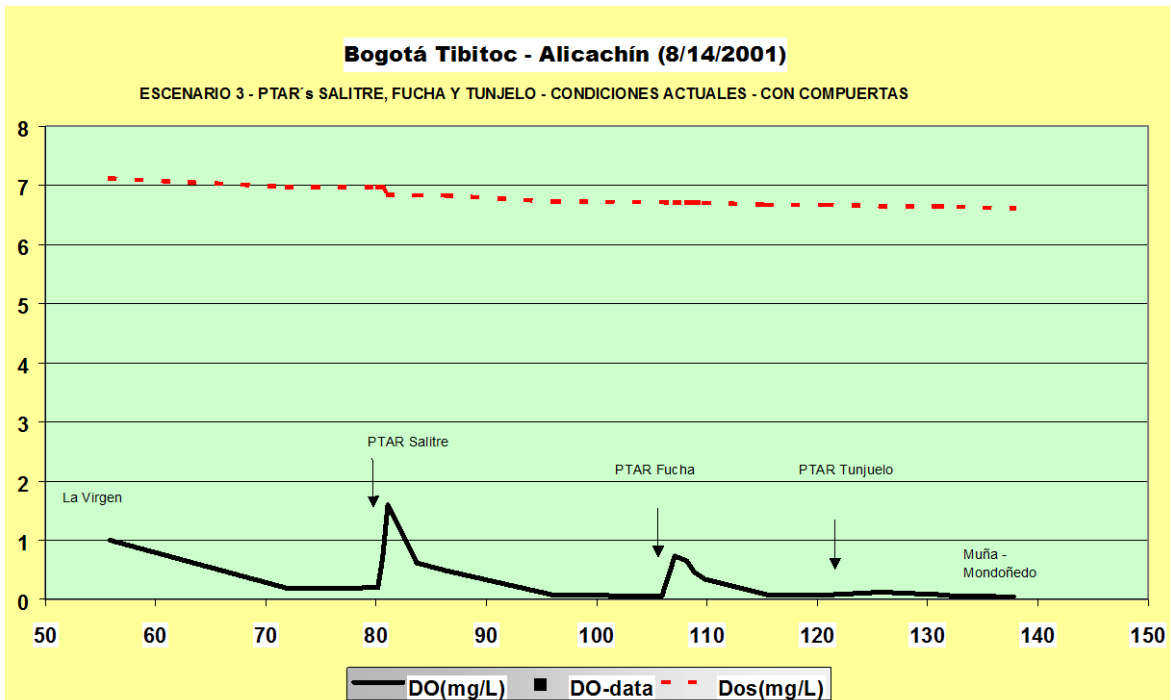


Figura 13 – Evaluación de la capacidad de autopurificación de la corriente condiciones actuales

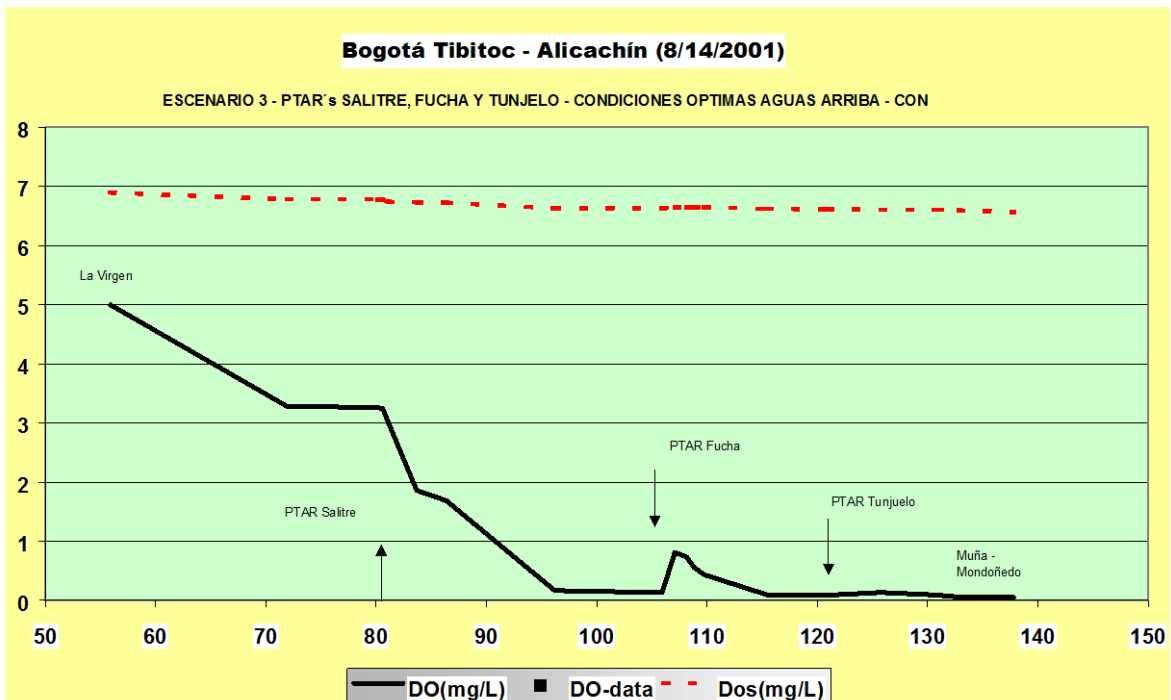


Figura 14 – Evaluación de la capacidad de autopurificación de la corriente condiciones actuales