

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL FUTURO EMBALSE PORCE III POR LA INFLUENCIA DE LA DESCARGA DEL EMBALSE PORCE II

Modelo de simulación de calidad del agua del futuro embalse Porce III

Sandra Milena Silva Arroyave*

Recibido: 25/02/2008

Aceptado: 31/10/2008

RESUMEN

Este trabajo plantea evaluar la calidad del agua del futuro embalse Porce III por la influencia de la descarga del embalse Porce II, empleando un modelo matemático de simulación. La metodología consistió en recolectar información básica, seleccionar el modelo, realizar el montaje del mismo, diseñar los escenarios a simular, analizar los resultados y formular recomendaciones y conclusiones. El modelo seleccionado para realizar la simulación fue el CE-QUALW2. Los escenarios que se simularon fueron: Escenario 0, o escenario de control; escenario 1: sin considerar el aporte de la descarga de Porce II; escenario 2: efecto de la concentración de nutrientes aportados por la descarga de Porce II en la calidad del agua (nivel trófico) de Porce III.

Los principales resultados fueron: posiblemente el futuro embalse Porce III presentará eutrofia con una probabilidad superior al 50%. Con una disminución en el 20% de la concentración inicial de fosfatos (PO_4), que ingresa al embalse proveniente de la descarga de Porce II, se logra que Porce III llegue a un estado de mesotrofia. Se encontró que el embalse en general no presentará estratificación térmica o será débilmente estratificado en la superficie. La calidad del agua de este embalse está determinada por la calidad de la descarga del embalse Porce II.

Palabras clave: Calidad del agua, embalse, estratificación, eutrofización, sistema, modelo, simulación.

* Ingeniera Ambiental. Universidad de Medellín. Teléfono: 2558196. Dirección: Calle 1°C # 65 - 67 Mallorca. Correo electrónico: smsilva@udem.edu.co

WATER QUALITY EVALUATION OF PORCE III FUTURE DAM DUE TO THE INFLUENCE OF PORCE II DAM UNLOADING

Water Quality Simulation Model of Future Porce III Dam

ABSTRACT

This project considers evaluating water quality of Future Porce III Dam due to the influence of Porce II dam discharge, using a mathematical simulation model. The methodology consisted in gathering basic information, selecting the model, making its assembly, designing the scenarios to be simulated, analyzing the results, and formulating recommendations and conclusions. CE-QUALW2. was the selected model for the simulation. Simulated scenarios were: Scenario 0, or control scenario; scenario 1: without considering the contribution of Porce II discharge; scenario 2: effect of the nutrient concentrations - contributed by the Porce II discharge - in Porce III the water quality.

The principal results were: possibly future Porce III dam will present eutrophy with a probability over 50 %; with a 20% decrease of the initial PO_4 concentration which enters the dam from Porce II discharge, Porce III gets a mesotrophy condition. It was found that, in general, the dam will not present thermal stratification or will be weakly stratified in the surface. Water quality of this dam is determined by the quality of Porce II dam discharge.

Key words: Water quality, dams, stratification, eutrophication, system, model, simulation.

INTRODUCCIÓN

La hidroelectricidad es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Su desarrollo requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. Empresas Públicas de Medellín, con el fin de satisfacer una de las principales necesidades de la sociedad actual, se pone en la tarea de crear la infraestructura y las condiciones adecuadas para generar energía eléctrica a partir del agua.

Empresas Públicas de Medellín ha construido y opera una serie de embalses altamente reconocidos de la cadena Nare-Guatapé, además de Riogrande II, Troneras, Guadalupe IV, Porce II y futuros desarrollos como Porce III y Porce IV.

En este trabajo se realiza una evaluación del efecto de la descarga de Porce II en la calidad del agua del futuro embalse Porce III, por medio de un modelo matemático de simulación, con el fin de establecer si la calidad del agua de Porce III estará determinada por las descargas del embalse Porce II.

Para lograr lo anterior, se emplea como metodología, recoger la información producto del monitoreo que periódicamente viene realizando Empresas Públicas de Medellín, de las zonas de influencia del proyecto; depurar dicha información, seleccionar el modelo matemático que mejor se ajuste a los objetivos planteados, diseñar y montar los escenarios de simulación a analizar y por último presentar conclusiones y recomendaciones que brinden un mayor apoyo en la toma de decisiones sobre el proyecto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuando se hace referencia a estudios de calidad del agua, es fundamental diferenciar cuatro conceptos básicos que permiten lograr un mayor entendimiento del comportamiento de una cuenca

hidrográfica o un embalse cuando se ve sometido a diferentes condiciones. Estos conceptos son:

Sistema

En el sentido más general, la noción de sistema se define como una colección de varios elementos estructurales y no estructurales los cuales están interconectados y organizados de tal forma que cumplen un objetivo específico en el control y la distribución de recursos, materiales, energía e información.

Uno de los aspectos básicos de un sistema es el hecho de que puede ser controlado y observado. Sus interacciones con el medio caen en dos categorías:

1. Variables generadas por el ambiente que influyen el comportamiento del sistema (llamadas entradas).
2. Variables que son determinadas por el sistema que a su vez influyen el comportamiento del ambiente (llamadas salidas).

De acuerdo con lo anterior, un sistema es una fuente potencial de información en que las entradas pueden ser definidas y observadas.

En conclusión, un sistema se define como una serie de elementos interdependientes que se integran entre sí para desarrollar una función común.

Experimento

Un experimento es el proceso de extraer los datos de un sistema a través de la manipulación de las entradas.

La experimentación es quizá el concepto más importante dentro de un sistema, porque a través de ésta se puede desarrollar una mejor comprensión de dicho sistema. La experimentación implica que dos propiedades básicas de un sistema sean usadas: el control y la observación.

El desarrollo de un experimento implica la aplicación de una serie de condiciones externas

a las entradas del sistema y la observación de las reacciones que se dan dentro de éste, para determinar el comportamiento de las salidas.

Una de las mayores ventajas de la experimentación con un sistema modelado (en vez del sistema real o actual) es el hecho de que los sistemas reales están influenciados por un gran número de entradas adicionales inaccesibles y un alto número de salidas útiles que no están disponibles a través de la medición.

Simulación

Existen muchas definiciones para el término simulación, sin embargo, una de las más simples es: una simulación es un experimento desarrollado sobre un modelo.

Esto no implica que todas las simulaciones deban realizarse con la ayuda de un computador, si embargo, la mayoría de las simulaciones hechas en la ingeniería se desarrollan en un programa computacional. Una simulación matemática es una descripción de códigos de un experimento con base en una referencia puntual sobre la cual este experimento aplica.

¿Por qué es importante la simulación?

Excepto por el experimento con el sistema real, la simulación es la única técnica disponible para analizar el comportamiento arbitrario de un sistema. Los escenarios típicos del descubrimiento científico se muestran a continuación:

- Desarrollar un experimento sobre el sistema real y extraer los datos para producir conocimiento (comprensión de las causas y los efectos de las relaciones del mundo real).
- Postular un número de hipótesis relacionadas con los datos.
- Desarrollar un número de simulaciones con diferentes parámetros experimentales para verificar que las simplificaciones asumidas son justificadas.

- Analizar el sistema, verificar las hipótesis y presentar conclusiones.
- Las simulaciones son desarrolladas con el fin de presentar conclusiones.

Herramientas de simulación

Una amplia variedad de herramientas de simulación están disponibles para ayudar en el proceso.

Los procesos de modelación dinámica involucran la solución de ecuaciones diferenciales no lineales y ordinarias. La formulación y solución de este tipo de problemas es facilitado usando un lenguaje continuo de simulación conocido como SCL por sus siglas en inglés. SCL data del año 1960 cuando se introdujo el lenguaje llamado CSMP (Continuous System Modelling Program). De los nuevos lenguajes de simulación que están hoy en día disponibles, el SCL es uno de los más empleados.

Modelo

Un modelo es una aproximación de un sistema al cual un experimento puede aplicarse en orden de respuesta a las preguntas hechas sobre el sistema. Un modelo no implica un programa computacional. De hecho, es importante reconocer la diferencia entre un modelo y un programa computacional. Un modelo puede ser una pieza de un hardware o simplemente la comprensión de cómo trabaja un sistema. Los modelos son a menudo codificados dentro de los programas computacionales.

Otras definiciones de modelo:

Es una abstracción o representación de un sistema (SIERRA, 2005).

Es una "imagen concebida de la realidad", o una estructura teórica, que relaciona un estímulo con una respuesta (CHAPRA, 1997).

¿Por qué es importante hacer modelaciones?

Modelación significa el proceso de organizar el conocimiento sobre un sistema dado. En el comienzo, el conocimiento carece de estructura. Por comprensión de las relaciones causa - efecto y por la observación espacio-temporal, el conocimiento reunido durante un experimento es organizado. Esto hace que el sistema sea mejor comprendido por los procesos de modelación.

¿Qué puede hacer un modelo?

Un modelo puede describir la calidad del agua a un nivel altamente detallado; al mismo tiempo que identifica los procesos que impactan dicha calidad, permite interpolar datos, predecir los tipos de riesgo a los que se ven sometidos los cuerpos de agua, los químicos que causan dicho riesgo, al igual que pronostica problemas específicos como lo es el modificar las condiciones de determinado cuerpo de agua, de manera tal que cumpla con las normas de calidad estipuladas para el determinado uso que se le va a dar a dicha agua.

El procedimiento establecido para realizar la simulación de la calidad de un cuerpo de agua varía de un autor a otro y depende directamente del objetivo del estudio o proyecto. Sin embargo, hay pasos generales que se consideran vitales y que deben tenerse en cuenta en todo tipo de proyecto. Estas actividades se enuncian a continuación:

- Recolección de información básica (secundaria)
- Selección del modelo
- Montaje del modelo

Para realizar el montaje del modelo se deben realizar las siguientes actividades:

- Descripción del modelo seleccionado.
- Descripción conceptual y funcional del sistema (desagregación del sistema en tramos, segmentos, capas, etc.).
- Corridas preliminares.

- Recolección de información adicional (primaria) - opcional

Durante el desarrollo del estudio se puede detectar la falta de información de campo o la realización de ciertas pruebas de laboratorio necesarias para completar el estudio. En estos casos se propone la metodología requerida para adquirirla. Por ejemplo, se puede requerir el muestreo de algunos parámetros que no estén incluidos en la recolección de información básica y sea necesario llevar muestras al laboratorio. También se puede presentar el caso en que se necesite evaluar una constante de reacción (demanda béntica, velocidad de sedimentación, etc.) o alguna variable que requiera el montaje en el laboratorio de un experimento.

- Selección del modelo

CE-QUAL-W2 es un modelo hidrodinámico y de calidad de agua bidimensional soportado por el USACE Waterways Experiments Station, que asume homogeneidad lateral, por lo que se ajusta a cuerpos de agua largos y estrechos que presentan gradientes longitudinales y verticales de calidad.

En la parte hidrodinámica, el modelo predice las elevaciones de la superficie de agua, las velocidades y la temperatura.

En la parte de calidad del agua es posible simular una serie de constituyentes adicionales a la temperatura, tales como:

1. Constituyentes genéricos, utilizando tasas de decaimiento de orden cero o uno: como trazadores y coliformes
2. Sólidos inorgánicos suspendidos
3. Fitoplancton
4. Epifitas
5. Demanda bioquímica de oxígeno carbonácea
6. Amonio
7. Nitritos - nitratos
8. Fósforo biodisponible

9. Materia orgánica disuelta de descomposición rápida
10. Materia orgánica disuelta de descomposición lenta
11. Materia orgánica particulada de descomposición rápida
12. Materia orgánica particulada de descomposición lenta
13. Carbono inorgánico total
14. Alcalinidad
15. Hierro total
16. Oxígeno disuelto
17. Sedimentos orgánicos
18. Atrapamiento de gases en la columna de agua

El modelo ha sido ampliamente usado en sistemas de aguas superficiales estratificadas tales como lagos, embalses y estuarios, permitiendo calcular niveles, velocidades horizontales y verticales, temperatura y otros 21 parámetros de calidad de agua (tales como oxígeno disuelto, nutrientes, materia orgánica, algas, pH, bacterias, sólidos disueltos y suspendidos). El CE-QUAL-W2 tiene la capacidad de modelar sistemas hidrológicos complejos como ríos y lagos o embalses interconectados y/o estuarios.

El modelo puede aplicarse a estuarios, ríos, o porciones de un cuerpo de agua, si se especifican condiciones de frontera. Asimismo, puede ser aplicado a cualquier número de cuerpos de agua enlazados en serie y, gracias a su eficiente algoritmo de ramificación, puede aplicarse a cuerpos de agua de geometrías complejas, como embalses dendríticos y estuarios.

La longitud de los segmentos y el espesor de las capas pueden variarse para una mayor resolución cuando sea necesario. Además, el modelo incluye un algoritmo de variación dinámica de la segmentación temporal, para garantizar que no se violen los requerimientos de estabilidad hidrodinámica.

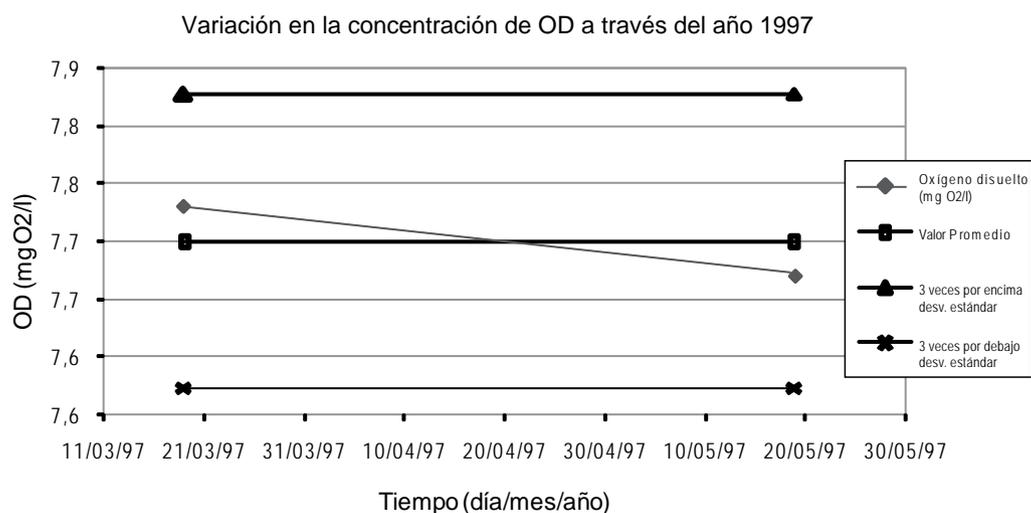
La calidad de agua puede actualizarse con menor frecuencia que la hidrodinámica para reducir los requerimientos computacionales. Aún así, el módulo de calidad de agua no está desacoplado del hidrodinámico, sin embargo, emplear este último, no es condicional para determinar la calidad de un cuerpo de agua.

El modelo no incluye de forma explícita el zooplankton ni sus efectos sobre el fitoplankton o la resuspensión de los nutrientes; tampoco considera el efecto de las macrófitas en la hidrodinámica y la calidad del agua, ni considera la cinética en el sedimento o en la interfaz sedimento-agua (Cole y Wells, 2000).

- Montaje del modelo

En este trabajo se revisó la información suministrada por Empresas Públicas de Medellín a la Universidad de Antioquia quien realizó una depuración inicial, y se le aplicó un tratamiento estadístico con el fin de validar la calidad de los datos y realizar un refinamiento de la información más acorde con los objetivos de este trabajo. Se calcularon y graficaron promedios y desviaciones estándar. Por último se determinó qué valores eran aptos para las simulaciones.

A continuación se presentan algunas tablas (1, 2, 3 y 4) y la figura 1, que evidencian el tratamiento anteriormente mencionado.



Fuente: EPM

Figura 1. Valor promedio y desviación estándar de la concentración de oxígeno disuelto en Guadalupe IV a través del año 1997

3s+ hace referencia a tres veces la desviación estándar por encima del promedio y 3s- por debajo.

Se eligió este tratamiento para los datos debido a que de esta forma se representa la distribución de los errores, en donde la media o promedio es el objetivo, y la desviación estándar indica la dispersión

de los errores; de esta forma, cualquier valor que se encuentre por fuera del rango (3s-, 3s+) no se considera confiable para ser incluido en la manipulación de la información. Porque, cuando una serie de datos sigue una distribución normal, el 99,5% de los datos están entre el rango -3s y +3s.

Tabla 1. Medidas estadísticas para diferentes parámetros de calidad de agua medidos en la descarga de Guadalupe IV en el año 1997.

Fecha (dd/mm/año)	19/03/1997	19/05/1997	19/03/1997	19/05/1997	19/03/1997	19/05/1997
Medida estadística	Promedio		3S+		3S-	
Sólidos suspendidos (mg/l)	27	27	107,61	107,61	0	0
Fósforo total (mg P-PO ₄ /l)	0,14	0,14	0,73	0,73	0	0
Nitratos (mg NO ₃ /l)	0,34	0,34	0,94	0,94	0	0
Nitrógeno total (mg N-NKT/l)	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
Nitrógeno amoniacal (mg N-NH ₃ /l)	0	0	0	0	0	0
Oxígeno disuelto (mg O ₂ /l)	7,7	7,7	7,83	7,83	7,57	7,57
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6

Fuente: elaboración propia.

Debido a datos faltantes en la información suministrada por EEPPM, fue necesario trabajar con valores promedios mensuales tanto para los caudales afluentes de la descarga de Porce II y de Guadalupe IV, como para las concentraciones de ortofosfatos, nitratos, oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, hierro y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5); esto con el fin de disminuir errores en los resultados finales. La tabla 2 muestra los valores de oxígeno disuelto para la descarga de Porce II, suministrados por la Universidad de Antioquia.

Tabla 2. Valores de oxígeno disuelto suministrados por la Universidad de Antioquia para la descarga de Porce II, años 1998 a 2001, 2004 y 2005.

Día juliano	Día del mes	Mes	OD (mg/l) según Universidad de Antioquia
155	4	junio	1
197	16	julio	1,6
204	23	julio	1,6
222	10	agosto	8,5
223	11	agosto	6,9
225	13	agosto	1,42
226	14	agosto	0,8
312	8	noviembre	7,4
321	17	noviembre	7,7
337	3	diciembre	1,7
338	4	diciembre	7,4
406	10	febrero	6,8
414	18	febrero	6,4
418	22	febrero	7,4
419	23	febrero	6,5
443	19	marzo	4,6
478	23	abril	1,4
498	13	mayo	4,1
500	15	mayo	7,2
509	24	mayo	6,9

Fuente: EPM

Nota: los días de cada mes que no aparecen en la tabla anterior no se presentan por ser datos faltantes.

En la Tabla 3 se muestran los valores de oxígeno disuelto (OD) depurados que ingresan al modelo.

Tabla 3. Valores de oxígeno disuelto depurados que ingresan al modelo

Día juliano	OD (mg/l)
152	1
184	1.6
216	4.41
244	1.7
276	5.69
308	7.5
336	4.5
368	4.87
400	6.78
428	4.6
456	1.4
488	6.07

Fuente: EPM

Puesto que la información de caudales disponible para Guadalupe IV es una limitante, se considera que de la cantidad total de agua que ingresa al embalse (datos para Puente Acacias, lugar en que se unen los afluentes principales, Guadalupe IV y Porce II), un 60% es aportado por Porce II y un 40% por Guadalupe IV; a partir de este supuesto, se calcularon los datos faltantes.

La suposición anteriormente mencionada se sustenta en los estudios realizados por Empresas Públicas de Medellín, de los cuales surgió como conclusión que dicho comportamiento es verídico (Empresas Públicas de Medellín y grupo de investigación en gestión y modelación ambiental Universidad de Antioquia (GAIA), 2005). Esta información fue suministrada por la Universidad

de Antioquia con previa autorización de Empresas Públicas de Medellín.

En la tabla 4 se presentan los caudales medidos en Puente Acacias, y en la tabla 5, se muestra el valor de los caudales de las descargas Porce II y Guadalupe IV, a partir de los cálculos realizados.

Tabla 4. Valores de caudal (medio diario) registrados en la estación limnigráfica de Puente Acacias

Día juliano	Caudales en la estación Puente Acacias (m ³ /s)
152	209
183	181
214	182
242	201
273	207
303	197
334	185
395	162
426	150
456	148
487	169
516	197

Fuente: EPM

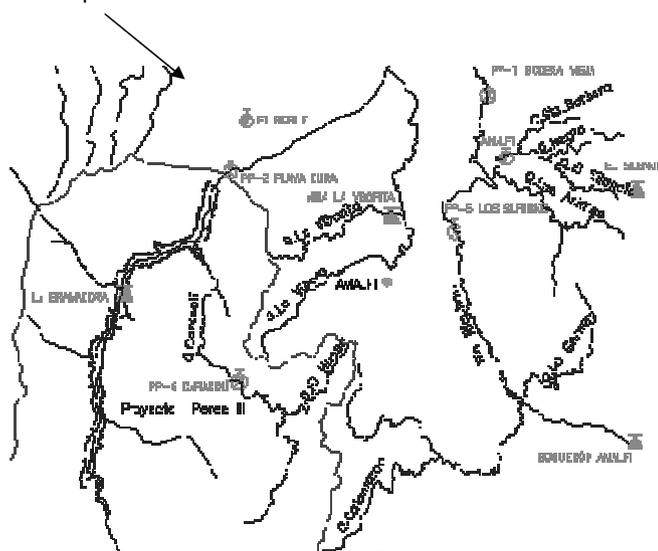
Tabla 5. Valores de caudales de las descargas diarias de Guadalupe IV y Porce II

Día juliano	Q Guadalupe IV (m ³ /s)	Q Porce II (m ³ /s)
152	16,97	192,03
183	63,89	117,11
214	42,66	139,34
242	55,30	145,70
273	93,82	113,18
303	48,92	148,08
334	56,36	128,64
395	12,61	149,39
426	25,79	124,21
456	88,08	59,92
487	65,44	103,56
516	47,45	149,55

Fuente: EPM

En cuanto a los datos climatológicos, la Universidad de Antioquia depuró la información más representativa de la zona de ubicación del embalse Porce III, concluyendo que los datos más confiables eran los de la estación El Roble. La localización de esta estación se muestra en la figura 2.

Estación empleada



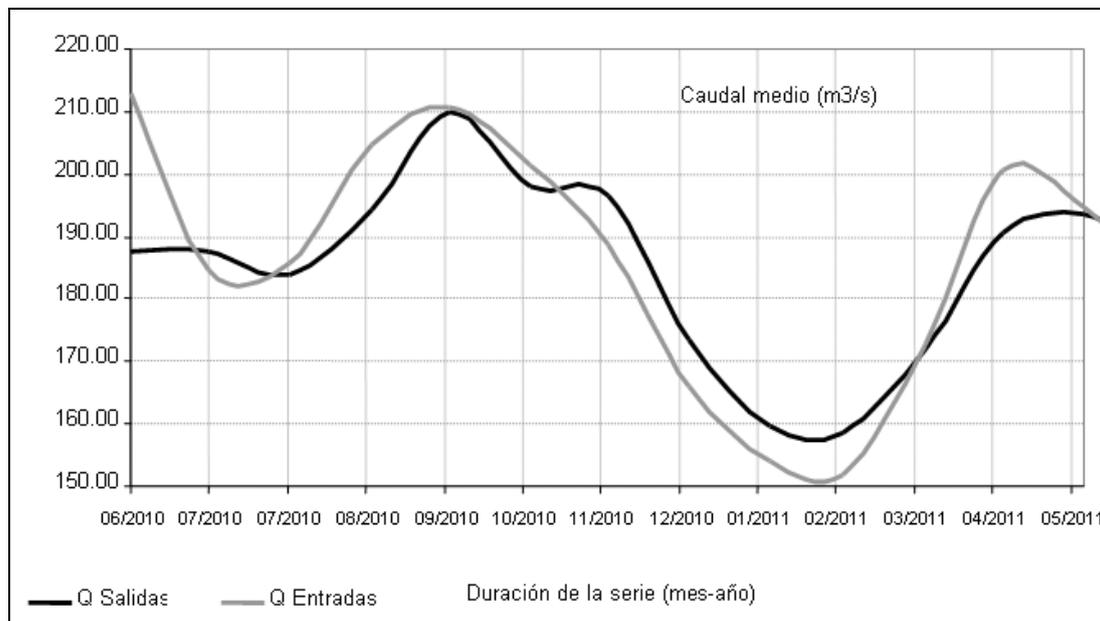
Fuente: EPM.

Figura 2. Localización de la estación climatológica empleada.

Los caudales de generación de energía y de garantía ambiental programados por EEPPM corresponden a los de salida del embalse.

La figura 3 muestra la curva de operación del embalse a partir de la cual se determinaron los

caudales de generación y el caudal de garantía ambiental, el cual fue establecido por epm con autorización previa del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en $2\text{m}^3/\text{s}$.

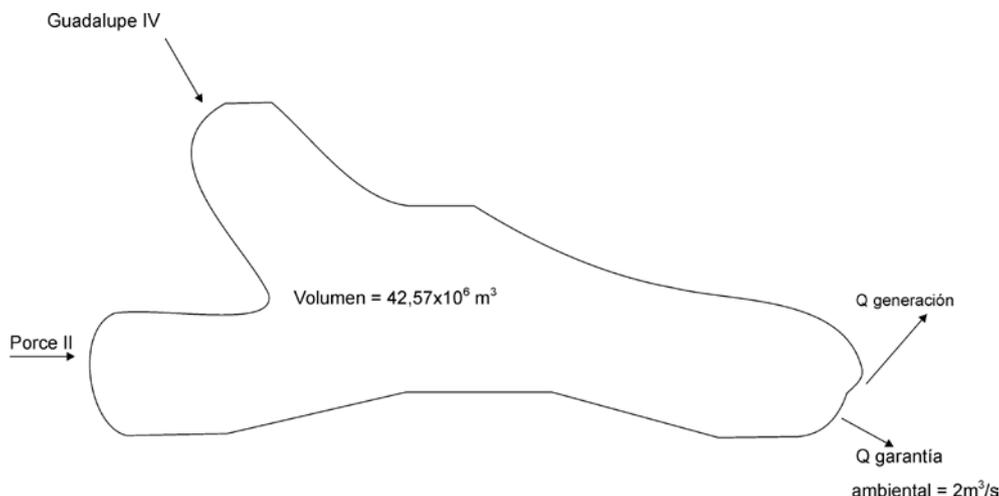


Fuente: EPM

Figura 3. Curva de operación del embalse Porce III.

Con base en la representación conceptual del sistema por modelar (figura 4), para el tipo de datos requeridos por el programa en esta parte, solamente se usan las siguientes opciones:

- Estructuras. Se localizan los segmentos y las capas a través de las cuales se extraen los caudales de salida; el caudal de generación en la capa 15 y el caudal de garantía ambiental en la 18.
- Tributarios. De las diferentes opciones se eligen, como *fuentes*, los tributarios, en este caso el caudal que entra en Puento Acacias y los tributarios distribuidos, representados aquí por los pequeños afluentes y por las cargas aportadas por descomposición de vegetación inundada. Como sumideros o salidas se elige la opción *extracciones*, representadas por las salidas de caudal para generación y caudal de garantía ambiental.



Fuente: elaboración propia

Figura 4. Representación gráfica del futuro embalse Porce III y sus afluentes principales.

Escenarios de simulación

Escenario 0, ó escenario de control

Definición. Este escenario es similar al que empleó la Universidad de Antioquia para analizar el comportamiento de la calidad del agua en el futuro embalse del Proyecto Hidroeléctrico Porce III. Sin embargo, dados los objetivos de este trabajo, se hicieron cambios en

- Número de capas
- Caudales de entrada
- Caudales de salida

Este escenario está estructurado con las siguientes condiciones:

- Se utiliza un período de simulación de 365 días correspondientes al primer año de simulación, por ser éste el período inicial de funcionamiento del embalse, tiempo en el cual se considera que las condiciones son las más desfavorables.
- Los caudales de entrada y salida y la calidad del agua corresponden a datos o valores promedio mensuales, pero representados por días julianos que hacen referencia al primer día de cada mes.

- La simulación inicia con un volumen en el embalse de $42,57 \times 10^6 \text{ m}^3$, que corresponde al nivel de operación mínimo, cota 635 msnm.

A partir de este escenario se realizan las comparaciones respectivas según cada una de las variaciones que se presentan en los escenarios posteriores. Se simula la calidad del agua del futuro embalse Porce III, partiendo de la información suministrada por EPM.

En general, la simulación se concibe como el estudio de calidad del agua de

- Un solo cuerpo de agua: el embalse Porce III
- Dos tributarios: el tributario principal, la descarga del embalse Porce II y tributario secundario, el río Guadalupe IV
- Dos salidas: caudal turbinado (generación de energía) y el caudal de garantía ambiental ($2 \text{ m}^3/\text{s}$)

Supuestos. Los valores de los caudales de Porce II y de Guadalupe IV son un porcentaje del 60 y el 40, respectivamente, del caudal total que ingresa al embalse según la modelación realizada por la Universidad de Antioquia.

Los valores de ortofosfatos requeridos en la simulación se calculan a partir de la concentración de fósforo total que ingresa al embalse.

Todas las constantes necesarias por el modelo para realizar la simulación son las asumidas por la Universidad de Antioquia, que en algunos casos corresponden a los valores que por defecto trae el modelo.

Todos los valores que requiere el modelo corresponden a promedios mensuales.

Escenario 1. Sin considerar el aporte de la descarga de la hidroeléctrica Porce II.

Definición. En este caso, se considera que por fallas en el sistema o por alguna eventualidad o contingencia en el funcionamiento de la central hidroeléctrica Porce II, no hay generación de energía, es decir, no se presenta caudal por el túnel de descarga.

Dado que hasta el presente y desde que inició operaciones Porce II solo se han presentado paros en la generación, por horas, se supuso para este análisis, que la central no durará parada por más de un período de tres días bajo ninguna situación.

Supuestos. Los días en los cuales no hay generación en la central hidroeléctrica Porce II corresponden a los días julianos 214, 215 y 216, los cuales se eligen aleatoriamente.

En cuanto a los valores de caudales y de concentraciones de fosfato, DBO, OD, alcalinidad, etc., se considera que no hay cambio alguno con respecto a lo enunciado en el escenario de control.

Escenario 2. Efecto de la concentración de nutrientes aportados por la descarga de Porce II en la calidad del agua (nivel trófico) del futuro embalse Porce III

Definición. En general, la experiencia ha demostrado que la calidad del agua que sale de un embalse es mejor que la calidad del agua en el embalse (CHAPRA, 1997). Sin embargo, dado que la contaminación que recibe el embalse Porce II se genera en el Valle de Aburrá (120 km aguas

arriba), se sabe que los nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, se presentan en el embalse en sus formas disponibles (nitratos y ortofosfatos). La anterior situación sugiere que el embalse Porce II puede aportar altas concentraciones de nutrientes al embalse Porce III.

Para analizar la anterior situación, se realizan variaciones del 10% y 20% en la concentración de ortofosfato afluente (Porce II), con el fin de determinar hasta qué valor es posible incrementar o disminuir esta concentración sin que se presenten cambios significativos en el estado trófico del embalse Porce III. Es decir, determinar hasta qué concentración de fósforo se puede admitir en la descarga de Porce II, sin que se altere significativamente la calidad del agua en Porce III.

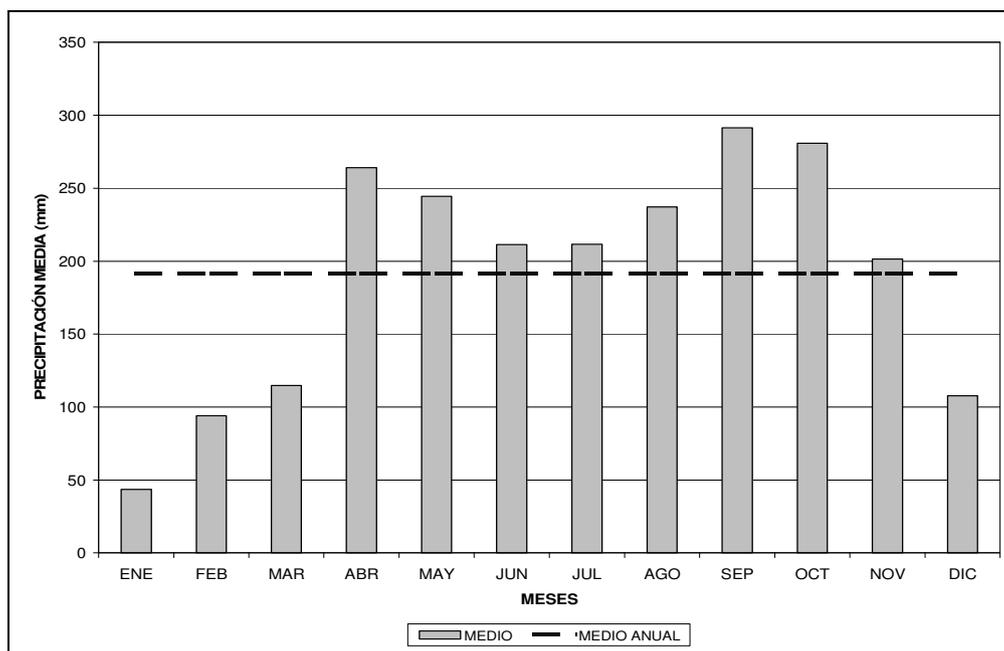
Supuestos. El fósforo, en forma de ortofosfatos, es el nutriente limitante (CEPIS), por esta razón sólo se realizan cambios en su concentración.

La descarga de Porce II aporta una mayor cantidad de ortofosfatos al futuro embalse Porce III, por lo cual las variaciones en el estado trófico de Porce III se rigen por los cambios en la concentración de ortofosfatos en Porce II.

Períodos de invierno y verano

Según el análisis de las estaciones climatológicas de la zona de influencia del embalse, realizado por la Universidad de Antioquia, la que mejor representa el comportamiento del área de estudio es la llamada El Roble.

A partir de ésta, se determina el período de invierno y el de verano, llegando a que en la zona se presenta un régimen bimodal, con dos períodos de mayor humedad relativa en abril y mayo y entre octubre y diciembre, y dos períodos de menor humedad relativa entre enero y marzo y entre junio y agosto. La figura 5 muestra la precipitación que se presenta en la zona de influencia del proyecto hidroeléctrico Porce III. A partir de esta figura se determina el período de invierno y el de verano.



Fuente: EPM.

Figura 5. Histograma de precipitación media mensual en la estación climatológica El Roble.

RESULTADOS

Posiblemente el futuro embalse Porce III presentará eutrofia con una probabilidad superior al 50%. Con una disminución en el 20% de la concentración inicial de fosfatos (PO_4) que ingresa al embalse proveniente de la descarga de Porce II, se logra que Porce III llegue a un estado de mesotrofia.

Se encontró que el embalse en general no presentará estratificación térmica o será débilmente estratificado en la superficie. La calidad del agua de este embalse está determinada por la calidad de la descarga del embalse Porce II.

DISCUSIÓN

Análisis de la calidad del agua cuando la central Porce II no está generando energía

Los días en los cuales se tiene en cuenta que Porce II no genera descarga (días julianos 214,

215, 216, caudal igual a $0m^3/s$) se escogieron aleatoriamente.

Es importante resaltar que de los resultados de los días enunciados anteriormente, sólo se emplearon en el análisis los correspondientes a los días julianos 214 y 215, debido a que en el día 216, se presentó poca cantidad de valores, lo cual dificultó conocer la tendencia o comportamiento de dichos resultados.

La principal diferencia entre el escenario 0 y el 1, es la cantidad de capas que alcanzan a activarse en cada día, es decir, según la cantidad de agua que ingresa al embalse el escenario 0 posee una determinada cantidad de capas (siempre constante) con sus respectivos valores, y el escenario 1, una cantidad variable que va disminuyendo día a día.

Temperatura

Al observar el comportamiento de la temperatura se puede notar cómo en los días analizados (214 y 215), la tendencia es muy similar; en ambos

días la mayoría de los resultados evidencian una disminución de dicha temperatura cuando no se tiene en cuenta el aporte hecho por la descarga de la central Porce II; sin embargo, para el día 214 se presenta una diferencia y es que en las primeras capas que corresponden a una altura aproximada entre 0 y 25 m, el valor de la temperatura es mayor considerando el aporte de Porce II, es decir, cuando hay generación en la central hidroeléctrica Porce II.

Según el comportamiento de los resultados se puede concluir que a mayor profundidad es menor la temperatura, esto para las primeras capas (alturas entre 0 y 40 m para el día 214 y 0 y 10 m para el día 215). A partir de dichas alturas la temperatura se torna constante a medida que aumenta la profundidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos de gradiente térmico para un embalse tropical (metodología del CEPIS), se puede decir que en el futuro embalse Porce III no se presentará estratificación térmica en los días 214 y 215 en las profundidades correspondientes a 10 m, y 25 m o 30 m; y a 25 m o 30 m, hasta el fondo del embalse (cuando se esté y no se esté generando energía en Porce II), debido a que la disminución en la temperatura es menor de 0,2 °C por cada metro de profundidad.

Por el contrario, en las capas superiores (profundidad de 0 m a 10 m), hay estratificación térmica cuando no se considera que haya generación en Porce II para el día 214 y para el 215; se presenta estratificación en ambos casos (cuando se genera en Porce II y cuando no), puesto que el gradiente térmico en estos casos supera 0,2 °C/m.

Fosfatos

La tendencia muestra cómo la concentración de fosfatos, cuando no se considera el aporte de la descarga de Porce II, es generalmente menor que cuando sí se tienen en cuenta. Es decir Porce II sí afecta la concentración de fosfatos en Porce III.

Se observa un aumento inicial en la concentración de fosfatos con el incremento de la profundidad, seguido por un descenso no muy significativo, y por último, se llega a una estabilidad en la cual la concentración de fosfatos se mantiene constante para el día 215 y para el 214, volviendo de nuevo a aumentar.

Es importante resaltar que la variación del 17,39% en la concentración de fosfatos con la profundidad para ambos días, cuando se tiene en cuenta el aporte realizado por la descarga de Porce II, es significativa, puesto que inicialmente se presenta un aumento en la concentración de fosfatos hasta una profundidad de 29,45 m, valor a partir del cual se empieza a dar una disminución de dicha concentración.

Nitratos

Al observar el comportamiento de la concentración de nitratos con respecto a la profundidad, se puede decir que al no considerar el aporte de la descarga de Porce II, la concentración de nitratos disminuye cuando se incrementa la profundidad. Sin embargo, las tendencias de las curvas no son similares, puesto que en el día 215 dicha concentración disminuye continuamente con la profundidad mientras que en el día 214, el comportamiento refleja una disminución inicial, luego un aumento y finalmente otra disminución.

Este último comportamiento puede presentarse por diversas razones, entre las cuales se encuentran: una disminución en el valor de la concentración de oxígeno disuelto por debajo de 1mg/l, a partir del cual se inhibe el proceso de nitrificación; la disminución en el contenido de bacterias, puesto que a mayor profundidad, mayor presión y menor cantidad de las mismas; y una disminución en el contenido de materia orgánica.

Además de lo anterior, el incremento en la cantidad de nitratos alrededor de los 30 m de profundidad se puede presentar por la influencia

de las captaciones de generación y de garantía ambiental.

Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto a medida que se incrementa la profundidad disminuye en todos los casos (en los dos días analizados, 214 y 215; y bajo las dos circunstancias consideradas, con y sin aporte de la descarga de Porce II), llegando hasta un valor de 0 g/m^3 , a una profundidad de 10 m.

Sin embargo, a una profundidad aproximada entre 30m y 40m, se presenta en ambos casos (con y sin generación de Porce II), un incremento en el valor de la concentración de oxígeno disuelto, que puede deberse a la creación de fenómenos difusivos, como las “corrientes de densidad”, causadas por una variación de temperatura en el agua o por la presencia del viento.

Asimismo, entre estas profundidades se presentan las captaciones de generación y de garantía ambiental, que se caracterizan por crear succiones que forman ríos internos en el embalse y hacen variar la calidad del agua. Sumado a esto, se presenta el hecho de que el tiempo de detención en el embalse es menor a 15 días, periodo en el cual el efecto de “río interno” no alcanza a disiparse y a permitir que las condiciones dentro del embalse se normalicen.

Sólidos disueltos totales (TDS)

Se puede decir que en los días analizados (214 y 215), la cantidad de TDS es menor cuando no se considera el aporte de la descarga de Porce II que cuando ésta se toma en cuenta.

Sin embargo, la tendencia de los resultados no es similar para los dos días: en el 214, el comportamiento muestra una disminución, seguida por un aumento, y por último otra disminución (este mismo comportamiento se refleja cuando se considera el aporte de la descarga); mientras que en el día 215 hay una disminución inicial no muy marcada, seguida por una etapa en la cual la concentración es relativamente constante y finalizando con una disminución.

Hay una conclusión que es transversal a fosfatos, nitratos y sólidos disueltos totales y es que cuando Porce II no está generando, la tendencia de cada parámetro entre el día 214 y el 215 es significativamente diferente, lo cual indica que la calidad del agua del futuro embalse Porce III está directamente influenciado por la calidad de la descarga de Porce II y el tiempo en que ésta tarde en reanudar su operación, puesto que al segundo día de no generación, se empieza a observar una disminución en cada parámetro mencionado, lo que supone una disminución en el grado de contaminación del futuro embalse Porce III.

En general, se puede ver cómo el efecto de las captaciones influye directamente en el comportamiento de los parámetros analizados: oxígeno disuelto, nitratos, fosfatos y sólidos disueltos totales.

Análisis del estado trófico en el embalse Porce III ante variaciones en la concentración de nutrientes aportados por el agua turbinada en Porce II

El estado trófico del futuro embalse Porce III varía según la cantidad de PO_4 que ingresa a él; por esta razón, al tener una concentración disminuida en un 20% con respecto a la concentración considerada como básica (escenario 0), se puede llegar hasta un estado mesotrófico, que se presenta entre los estados oligotrófico y eutrófico.

Se puede decir que el grado de contaminación del embalse disminuye con el descenso en la concentración de fósforo afluente, lo cual supone que si se continúa descendiendo en la concentración de fósforo que ingresa al embalse, se esperaría que las concentraciones de fosfato disponible en el embalse Porce III disminuyan hasta valores manejables, es decir, hasta que no se manifiesten los efectos adversos de la eutrofización.

Según los resultados obtenidos se puede decir que a partir de una concentración promedio de fosfatos de $0,0587 \text{ g/m}^3$ el futuro embalse Porce III

sería un 69% mesotrófico. Sin embargo, en el caso en que esta concentración sea superada se alcanzará un grado de contaminación mucho mayor en el embalse, llegando a un estado de eutrofia.

Según los cambios realizados en los valores de concentración influente de fósforo, se puede notar cómo la influencia de la descarga de Porce II es altamente relevante en el futuro embalse Porce III, puesto que con solamente variar su concentración, cambia el estado trófico en el embalse, sin necesidad de realizar modificación alguna en el aporte de la descarga de Guadalupe IV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Cuando no se genera energía en Porce II por cortos períodos de tiempo (3 días), no se presenta mayor deterioro en la calidad del agua del futuro embalse Porce III, sin embargo, cuando este período se prolonga, puede haber afectación en la calidad del agua de dicho embalse. Esto puede evidenciarse en la tendencia que muestra el oxígeno disuelto en los días julianos 214 y 215.
- Partiendo de la información suministrada por EPM, se reitera la conclusión obtenida por la Universidad de Antioquia en cuanto a que el futuro embalse Porce III posiblemente presentará un grado de eutrofia con una probabilidad de ocurrencia superior al 50%, hipereutrofia de 30% y muy baja o nula probabilidad de mesotrofia u oligotrofia.

Al incrementar la concentración de nutrientes que ingresan al embalse Porce III, el porcentaje de eutrofia también se incrementa, es decir, a medida que aumenta la cantidad de nutrientes que llegan al embalse, asciende el grado de contaminación del mismo.

- El embalse posiblemente será no estratificado o débilmente estratificado, debido a que pre-

senta una capa en la zona superior (entre 0m y 10m), que puede romperse fácilmente.

Se presume que la capa superior del embalse se mantiene “fija”, es decir, no presentará mezcla con la capa inferior, debido a que la temperatura en el embalse no alcanza a disminuir lo suficiente como para que se de este fenómeno; sumado a esto, se presenta el hecho de que el gradiente térmico es muy bajo (0,2 °C/m), por lo que el estrato superior puede romperse fácilmente por factores ambientales, tales como el viento.

- La depuración de la información es un paso fundamental en el estudio de la calidad del agua de un embalse, puesto que obtener resultados confiables, depende de la veracidad de los datos que ingresan al modelo.
- El CE-QUALW2 es un modelo fácilmente aplicable en el estudio de calidad del agua de un embalse, puesto que no posee un alto grado de complejidad, presenta mayores ventajas económicas debido a que se obtiene gratuitamente y se cuenta con experiencia previa que evidencia su amplia utilidad en esta área.
- En la zona de influencia del proyecto hidroeléctrico Porce III, el período de invierno se presenta entre abril y mayo, octubre y diciembre; y el de verano entre enero y marzo, junio y agosto.
- La realización de este trabajo demostró que el CE-QUALW2 es apto para seguirse empleando en el estudio de la calidad del agua del futuro embalse Porce III, puesto que permite realizar fácilmente esta simulación y se adapta a las condiciones del embalse, es decir, permite representarlo.
- Con el fin de obtener resultados totalmente confiables en las simulaciones, se considera necesario calibrar y verificar el modelo en un embalse que se encuentre en operación, como por ejemplo, Porce II.

- Dada la cantidad de información que recolecta EPM, se considera como buena estrategia implementar una metodología para analizar, depurar y organizar los datos de calidad del agua de aquellos embalses que monitorea. Esto con el fin de que dichos datos puedan emplearse posteriormente en estudios de calidad del agua en los embalses.

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Alberto Sierra Ramírez por su apoyo y constante acompañamiento y convertirse en más que un maestro, un amigo.

A Orlando y Blanca por el acompañamiento continuo y oportuno en todas las etapas de mi vida.

REFERENCIAS

- CAÑÓN VEGA, Nora. (2002). Guía para la elaboración y presentación de trabajos escritos. Universidad de la Salle. Bogotá.
- CHAPRA, Steven. (1997). Surface Water- Quality Modeling. New York: Mc Graw -Hill. USA.
- COLE, THOMAS M. & WELLS, SCOTT A. (2000). CE-QUALW2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2. Usuary Manual.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN (EPPM). GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN Y MODELACIÓN AMBIENTAL UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA (GAIA). (2005). Aplicación de un modelo matemático de simulación de calidad de agua al embalse del proyecto hidroeléctrico Porce III y al río Porce en el sector aguas abajo de la presa. Universidad de Antioquia. Medellín.
- EPM, - INGETEC S.A. - KLOHN CRIPPEN CO. LTD. Proyecto Hidroeléctrico Porce III. (2002). Predicción de la calidad de agua del embalse Porce III y del río Porce aguas abajo del embalse, REVISIÓN 1.VOLUMEN 1 DE 1 DOCUMENTO No. P3 - 4.1/D8 - 184. P3-INF-8210-184-R1.DOC.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. (1996). Tesis y otros trabajos de grado Bogotá. ICONTEC, NTC 1486 última actualización.
- SIERRA, Carlos Alberto. (2005). Calidad del agua. Diagnóstico y evaluación. Medellín.
- THE AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. (1975). Control de calidad y tratamiento del agua. Madrid.