

Ecología de un humedal altoandino

Ecología de un humedal altoandino

Modelación dinámica de
interacciones físicas
y bióticas

Julio Eduardo Beltrán Vargas



Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Jesús Orlando Rangel Churrio por toda su confianza y compromiso cuando me postulé al programa de doctorado, y quien como profesor me orientó y asesoró durante el desarrollo de la presente investigación. Al Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia, al Instituto de Ciencias Naturales y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) por el aporte de la información relacionada con el estudio de caso.

A la Rectoría de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y a la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por el apoyo económico otorgado para llevar a cabo el programa de doctorado. Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIIDC) y al Grupo de Investigación Indesos por su financiación para adquirir los programas computacionales, el equipo de cómputo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

A Elvira Alvarado Ch. y a Jorge Cárdenas, quienes me acompañaron en las salidas de campo y me retroalimentaron con sus ideas; a Néstor Bernal por sus aportes al procesamiento de la información; a Adriana Ríos, que me acompañó en el proceso de revisión de bibliografía; a Tatiana González y Diego Beltrán por su apoyo fundamental en la edición del documento, y a todas aquellas personas que de una u otra forma me dieron ánimo para culminar este proyecto.

Este trabajo lo dedico a mi esposa Mónica y a mis hijos Manuel y Valentina, quienes con su amor, comprensión y entusiasmo me dieron ánimos para llevarlo a cabo.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UD
Editorial



COLECCIÓN
TIERRA
Y VIDA

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© Julio Eduardo Beltrán Vargas
Primera edición, julio de 2016
ISBN: 978-958-8972-40-4

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
Nathalie De la Cuadra N.

Corrección de estilo
Lilia Carvajal Ahumada

Diagramación
Cristina Castañeda Pedraza

Imagen de cubierta
Julio Eduardo Beltrán Vargas

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Beltrán Vargas, Julio Eduardo

Ecología de un humedal altoandino. Modelación dinámica de interacciones físicas y bióticas/ Julio Eduardo Beltrán Vargas. -- Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.

236 páginas ; 24 cm.

ISBN 978-958-8972-40-4

1. Ecología de humedales 2. Humedales 3. Conservación de humedales 4. Limnología I. Tít.
333.918 cd 21 ed.

A1539047

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Presentación general del estudio y planteamiento del problema de investigación	13
Introducción	13
Problemática general	14
Modelación dinámica en sistemas acuáticos	15
Factores para tener en cuenta en el análisis del problema de investigación	16
Formulación del problema específico	18
Hipótesis que se procuraron verificar a través de la modelación dinámica	18
Método de modelación	19
Generalidades	21
Localización geográfica del área de estudio, humedal de Jaboque	21
La zonificación del humedal	21
Aspectos geológicos y geomorfológicos del humedal de Jaboque	26
Microflora. Vegetación del humedal de Jaboque	29
Estado trófico del humedal de Jaboque	29
Diagnóstico participativo social	33

Caracterización climática de la zona de influencia del humedal Jaboque	37
Resumen	37
Metodología	37
Resultados. Discusión	38
Consideraciones finales	53
Modelación de los procesos hidrológicos del humedal Jaboque	61
Resumen	61
Introducción	62
Estructura del modelo de simulación dinámica	63
Resultados	69
Discusión	87
Modelación del estado trófico del humedal Jaboque	109
Resumen	109
Introducción	110
Método de simulación	115
Estructura del modelo de simulación dinámica	116
Resultados	119
Discusión	133
Modelación dinámica de sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal Jaboque	135
Resumen	135
Introducción	136
Procesos ecológicos de los sólidos suspendidos totales	136
Modelos dinámicos de sólidos suspendidos en humedales	137
Estructura del modelo de simulación dinámica	139
Resultados	142
Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque	155
Resumen	155
Introducción	156
Modelos dinámicos de producción primaria	159
Resultados	164
Análisis de resultados	173

Aproximación a la modelación dinámica de la producción de biomasa de macrófitas flotantes en el humedal jaboque	177
Resumen	177
Procesos ecológicos	177
Estructura del modelo de simulación dinámica	180
Supuestos del modelo	182
Resultados	183
Discusión	187
Consideraciones finales	189
Recomendaciones	199
Referencias	200
Anexos	215
Anexo A. Registros estación Aeropuerto Eldorado, desde 1972 hasta 2010.	215
Anexo B. Ecuaciones del modelo de simulación ecológica humedal Jaboque.	222
B4. Componente producción primaria fitoplanctónica	230
B5. Componente biomasa de macrófitas	232

Presentación general del estudio y planteamiento del problema de investigación

Introducción

Los humedales proveen variados hábitats a numerosas especies de flora y fauna, previenen la inundación, protegen las costas, recargan acuíferos subterráneos y tienen importancia económica en cuanto a producción alimentaria y energética. Son eslabones de los sistemas migratorios de aves, acogen una gran variedad de especies vegetales y animales, preservan el capital genético, purifican el agua y absorben carbono. Actúan como reguladores del ciclo ecológico entre los cursos fluviales y los acuíferos; el humedal es como una esponja que retiene el exceso de agua durante periodos lluviosos amortiguando el efecto de la erosión (Chaparro, 2003; Rangel, 2003).

Desafortunadamente muchos humedales han sido convertidos en campos de cultivo, alterados por construcción de puertos, o rellenados para construir zonas residenciales, industriales o comerciales (Prescott y Tsanis, 1997). Como los ríos y los lagos, los humedales reciben agua y minerales de la lluvia, del agua subterránea y de la escorrentía superficial (Johnston, 1993; Mann y Wetzel, 2000). Los humedales reciben flujos considerables desde el exterior y tienden a retener lo que entra más que a exportar, debido a su morfometría, por esto se dice que su función ecológica es actuar como sumideros de materiales orgánicos e inorgánicos que llegan con las corrientes y que tienden a sedimentarse. Así, la materia orgánica se acumula y produce un incremento en la producción neta que genera un exceso de material vegetal que no es consumido por herbívoros y por lo tanto se convierte en detritus en el fondo del humedal. Aunque la eutrofización es algo natural, los aportes de materia orgánica de las actividades humanas hacen que este proceso se acelere convirtiéndola en uno de los problemas ambientales más generalizados (Reinhardt *et al.*, 2005; Gurkan *et al.*, 2006).

Actualmente la mayoría de los humedales de Colombia está en proceso de colmatación y eutrofización por la influencia de sustancias alóctonas como el fósforo proveniente de la actividad del hombre. La eutrofización, que implica la acumulación de nutrientes, favorece preferentemente a las macrófitas, lo que les permite expandirse sobre el espejo de agua (Donato, 1998).

En este estudio se trata de comprender el funcionamiento ecológico del humedal Jaboque mediante la elaboración de un modelo dinámico de simulación, en el cual se relacionan las variables abióticas y bióticas. El análisis del clima (capítulo 3) en los últimos cuarenta años fue el soporte sobre el cual se ensamblaron las variables morfométricas que permitieron modelar el hidropereodo en diferentes situaciones de variabilidad climática como los fenómenos de El Niño y La Niña, pudiéndose predecir de esta manera los tiempos hidráulicos de retención (capítulo 4) y su relación con las variables fisicoquímicas como el fósforo (capítulo 5) y los sólidos suspendidos totales (capítulo 6).

Para entender la influencia de las variables físicas y químicas sobre un aspecto biológico en el humedal y establecer su relación con el estado trófico, se modelaron las variables funcionales del sistema, como la producción primaria fitoplanctónica (capítulo 7), y se hizo una aproximación a la dinámica entre las variables fisicoquímicas y la producción de biomasa de macrófitas flotantes en el humedal (capítulo 8). Para finalizar, el capítulo 9 contiene la síntesis del estudio, integra los resultados de las modelaciones y sugiere recomendaciones para la restauración, conservación y manejo del humedal.

Los resultados de las modelaciones, que representan las interrelaciones físicas, químicas y biológicas en el humedal no solo son de naturaleza explicativa, sino que tienen un carácter predictivo, lo cual les imprime un valor agregado a los modelos elaborados como instrumentos de gestión y manejo en humedales. La información de campo utilizada en esta investigación en su mayoría fue generada por el Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, en el marco del Proyecto de Restauración Ecológica del Humedal Jaboque (Rangel, 2005).

Problemática general

La mayoría de los estudios limnológicos en sistemas de humedales de la sabana de Bogotá se han orientado a llevar a cabo inventarios exhaustivos sobre sus componentes abióticos y bióticos, sin profundizar en los aspectos explicativos. Asimismo, no se dispone de instrumentos de carácter científico que apoyen a los planificadores

y gestores ambientales en acciones orientadas a su recuperación y preservación. Las investigaciones de carácter funcional y los modelos explicativos, que permiten predecir el impacto de una intervención en un sistema acuático, hasta ahora se empiezan a desarrollar, y esos modelos se justifican porque le permiten al tomador de decisiones responder al menos algunas de las siguientes preguntas:

¿Cómo responderá un humedal frente a las transformaciones de su morfometría original? ¿Cuál es el rol del tiempo hidráulico de retención en el mantenimiento de la calidad ambiental del agua y del entorno? ¿El estado trófico aceptable del humedal se puede mantener después de una alteración morfométrica? ¿Si se cambia o controla la descarga de nutrientes, se alterará el estado trófico del humedal? ¿Cómo es el comportamiento de los sólidos suspendidos totales cuando se disminuye la carga hidráulica sobre el humedal? ¿Cuál es la dinámica del fitoplancton si aumenta la descarga de nutrientes? ¿Qué sucede con los sólidos suspendidos totales si cambia la descarga de agua al humedal y cuál será su incidencia en el estado trófico de este?

La importancia de las anteriores preguntas radica en que el humedal de Jaboque es un sistema estratégico para Bogotá, porque es proveedor de bienes y servicios ambientales como la conservación de la biodiversidad, la regulación de flujos del río Bogotá, refugio de fauna y área de recreación, entre otros. Sin embargo los actuales estudios no son suficientes para explicar y predecir su comportamiento, motivo por el cual es necesario elaborar modelos que permitan hacerlo. Se trata de encontrar explicaciones racionales al estado de funcionamiento del humedal con el fin de hacer recomendaciones para su recuperación y restauración.

Modelación dinámica en sistemas acuáticos

Los modelos de simulación se fundamentan en ecuaciones que describen el cambio dinámico entre las variables relacionadas. El modelo detalla la realidad con una precisión determinada. El proceso se puede utilizar para mejorar nuestra comprensión de un problema (Yue *et al.*, 2011). La simulación dinámica permite observar un sistema y su respuesta a las intervenciones en el tiempo (Gurkan *et al.*, 2006; Winz *et al.*, 2009). Las propuestas de modelación dinámica tienen limitaciones, no obstante han mostrado ser eficientes para localizar problemas relacionados con flujos de materiales, especialmente de nutrientes, sedimentos y contaminantes en el agua y en la biota. Se puede demostrar que pese a la complejidad de los sistemas limnológicos es posible representar y reflejar a partir de pocas variables el comportamiento de un sistema acuático. Las variables de estado como el pH, el fósforo total y los sólidos suspendidos totales son variables claves y pueden ser utilizadas para

hacer predicciones en diagnósticos y en simulaciones para investigación y manejo (Håkanson y Peters, 1995).

El modelo terrestre general (TEM) con cinco variables de estado fue usado en Sudamérica (Raich *et al.*, 1991) para estimar la producción primaria en lagos de la región, incorporando procesos de retroalimentación entre la evapotranspiración y la dinámica del ecosistema en un modelo de balance hidrológico. Se han desarrollado modelos dinámicos de simulación para humedales artificiales en zonas de restauración como en el área de Olentangy River Wetland Research Park (ORWRP) en Estados Unidos, que ha sido utilizada como laboratorio para investigaciones limnológicas y de restauración en humedales (Mitsch y Day, 2006). Igualmente se han surtido modelos dinámicos para simular los efectos del pulso de inundación sobre variables químicas en el lago Boa, en Caquetá, Colombia (Pinilla, 2006) y en la Ciénaga Grande de Santa Marta en el departamento de Magdalena (Mancera *et al.*, 2003).

Factores para tener en cuenta en el análisis del problema de investigación

Hidrología

La modelación y simulación de los procesos hidrológicos ayuda en el conocimiento de los procesos bióticos, los ciclos geoquímicos y de nutrientes y en la dinámica de la vegetación y el comportamiento trófico (Bradley y Gilvear, 2000; Hupp, 2000; Quinn y Hanna, 2003; Spieles y Mitsch, 2003). Hay consenso en que la hidrología de un humedal, entendida como una variable independiente, influye y permite explicar los ciclos geoquímicos y de nutrientes, sin embargo en muchos proyectos de restauración y conservación de humedales no han sido aplicados estos conocimientos (Mitsch y Gosselink, 2000). El tiempo hidráulico de retención (THR) es considerado como uno de los factores críticos para explicar la retención de nutrientes en humedales (Werner y Kadlec, 1996; Knight, 2000). El tiempo hidráulico de retención permite explicar los ciclos biogeoquímicos en sistemas acuáticos, al establecer una relación dependiente entre los procesos físicos de transporte y de mezcla (Werner y Kadlec, 1996).

Estado trófico

Los humedales funcionan como sumideros de grandes concentraciones de nutrientes (Mitsch *et al.*, 1995; Wang y Mitsch, 2000). La composición química de la roca

madre de los humedales influye en la retención de fósforo. Recientemente se ha optado por crear humedales artificiales o restaurar los naturales para mejorar la calidad del agua y controlar la polución (Mitsch *et al.*, 1995; Zacharias *et al.*, 2005).

La eutrofización es el principal problema de los humedales y de los embalses. El fósforo, clave para su control (Fraile *et al.*, 1995; Carpenter *et al.*, 1998), es un nutriente limitante en los suelos, por esto se utiliza en muchos fertilizantes y cuando llega a los lagos causa un aumento en la productividad biológica, crecimiento de las plantas, algas y bacterias que consumen el oxígeno, y eutrofización (Lassaletta, 2004). La eutrofización es un proceso natural en los humedales que pasan de un estado de bajo contenido en materia orgánica (oligotrófico) hacia uno de alto contenido de materia orgánica (eutrófico) con sobreproducción de algas y macrófitas.

Sólidos suspendidos totales (SST)

Los SST regulan dos de las mayores rutas de transporte, la de materiales disueltos en la zona pelágica y sedimentación de partículas y la ruta en la zona bentónica (Håkanson *et al.*, 2000; Håkanson *et al.*, 2005); a su vez están considerados como reguladores de la calidad del agua (Lindstrom *et al.*, 1999; Malmaeus y Håkanson 2003). Son indicadores ambientales para determinar cambios geomorfológicos, contaminación y cambio climático. Los sedimentos en suspensión transportan cargas de nutrientes absorbidos, pesticidas, metales pesados y otras toxinas, disminuyen la cantidad de luz que penetra, se afecta la fotosíntesis y la temperatura del agua, fenómenos altamente relacionados con el cambio climático (Salama y Monbaliu, 2004; Noe y Harvey, 2007). Los SST dominan la producción primaria tanto de fitoplancton y bacterioplancton como la secundaria de zooplancton y peces. Asimismo son importantes a escalas tróficas bajas como fuente de energía para bacterias, fitoplancton y zooplancton. Los SST son considerados un componente fundamental ya que tienen influencia sobre numerosas propiedades metabólicas.

Producción primaria fitoplanctónica

A la captación de energía por organismos autotróficos se le denomina producción primaria. En los lagos la producción primaria se divide en dos clases, una dentro del mismo lago (producción primaria autóctona) y la que llega al sistema luego de haber sido sintetizada fuera de él (producción primaria alóctona). En el Ecuador la producción fitoplanctónica depende de la disponibilidad de radiación dentro del lago y de la concentración de nutrientes, a diferencia de las latitudes altas donde depende de la fluctuación de la radiación solar a lo largo del año (Ramírez y Alcaráz, 2002). La productividad y la absorción de nutrientes en las plantas en humedales

están influenciadas por parámetros hidrológicos como el nivel, la frecuencia y la duración de las inundaciones. Las fluctuaciones en el nivel del agua pueden aumentar la productividad y la absorción de nutrientes. La entrada de agua al humedal por periodos trae consigo un aumento en la concentración de nutrientes que actúan como fertilizante para el crecimiento de las plantas (Anderson y Mitsch, 2005).

Macrófitas

Las plantas acuáticas de los humedales se caracterizan por tener altas tasas de producción primaria. La producción primaria neta anual en humedales de agua dulce a menudo excede los $2000 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Koch *et al.*, 1990). Las macrófitas producen materia orgánica principalmente en los tejidos por encima del nivel de agua y absorben carbono de la atmosfera o del agua, y simultáneamente toman nutrientes y otros elementos del agua o del agua intersticial en los sedimentos. Los productos de la fotosíntesis son distribuidos tanto en los tejidos por encima del suelo como en los que se encuentran por debajo para producir órganos o ser almacenados como recursos. La mayoría del material proveniente de plantas entra a la capa de detritos, donde los microorganismos, como bacterias y hongos, tienen un papel importante en la descomposición y mineralización de residuos (Kuehn *et al.*, 2000). La concentración de los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno determinan de manera significativa la presencia o ausencia de determinadas especies vegetales en un sistema acuático (Kiersch *et al.*, 2004).

Formulación del problema específico

A modo de preguntas se enuncia el problema de investigación: ¿El hidropериodo refleja la precipitación? ¿El hidropериodo y la morfometría de cada sección afectan el tiempo hidráulico de retención? ¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el fósforo total? ¿El estado trófico del humedal depende del ciclo hidrológico y de la descarga de fósforo? ¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en los sólidos suspendidos totales? ¿Las condiciones climáticas inciden en la clorofila *a* y de la producción primaria? ¿Es posible relacionar la biomasa de macrófitas y la carga de Pt? ¿Es posible, a través de la modelación dinámica, encontrar respuestas a las preguntas anteriores?

Hipótesis que se procuraron verificar a través de la modelación dinámica

- a. Los cambios en el volumen de agua del humedal Jaboque y el tiempo hidráulico de retención se encuentran en función del ciclo hidrológico y de las ca-

racterísticas morfométricas (profundidad, área, volumen de la cubeta); si es así, entonces es posible estimar los aportes de la cuenca aferente y el volumen de cada sección (capítulo 4).

- b. El estado trófico del humedal está relacionado con la carga interna del fósforo total debida al tiempo hidráulico de retención. En consecuencia es posible estimar el estado trófico del humedal con las dos variables (capítulo 5).
- c. La descarga de la cuenca aferente (hidroperiodo) está ligada con la condición de eutrofización, por lo tanto los sólidos suspendidos totales en las secciones del humedal pueden asociarse con la condición trófica (capítulo 6).
- d. La producción primaria fitoplanctónica se puede inferir de la concentración de clorofila_a, en consecuencia es posible estimar el estado trófico del humedal a partir de este parámetro (capítulo 7).
- e. Las macrófitas flotantes toman los nutrientes a partir de la columna de agua, en especial el fósforo, por ello se podría hacer una estimación aproximada (cualitativa) sobre la biomasa de macrófitas flotantes en diversas partes del humedal con base en la información sobre el fósforo total en el agua (capítulo 8).
- f. Las modificaciones en la morfometría de la cubeta (rellenos y desecación) del humedal modifican el hidroperiodo, y los vertimientos de nutrientes afectan su estado trófico; si esto es así, es de esperar que el impacto y el deterioro hayan sido de mayor intensidad en las secciones intervenidas.

Método de modelación

Las modelaciones se hicieron con el *software* Stella 9.1 *, que ha sido utilizado para investigaciones en sistemas hidrológicos y ecológicos (Duever *et al.*, 1988; Jørgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jørgensen, 2008). Se utilizó el sistema de interfaz de Stella, para desarrollar la modelación y analizar la sensibilidad del modelo, esto para comprobar su carácter predictivo (Jørgensen y Bendoricchio 2001; Håkanson, 2004). Con el fin de verificar el carácter determinístico y ejecutar la validación de este se elaboraron regresiones simples lineales (Legendre y Legendre, 1998) para comparar los datos estimados en campo con los resultados modelados. Se trató de evaluar la fortaleza del modelo para lo cual se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007).

Generalidades

Localización geográfica del área de estudio, humedal de Jaboque

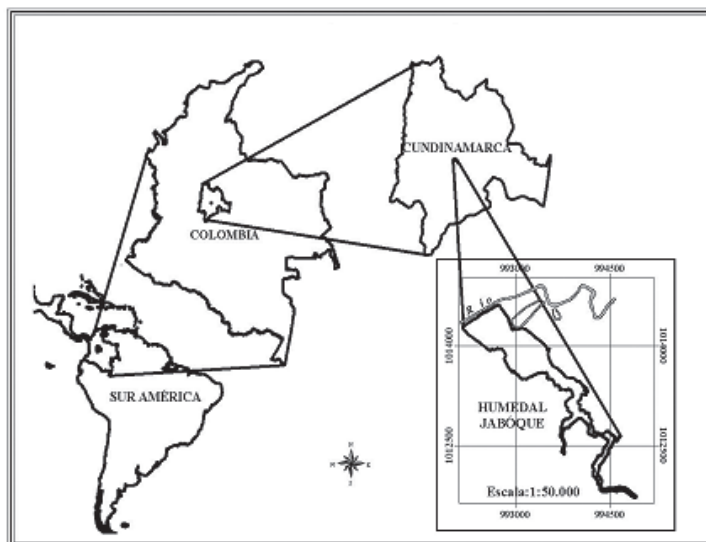
El humedal de Jaboque se localiza en la localidad de Engativá, al occidente de la ciudad, contiguo a la cuenca del río Juan Amarillo, entre el Aeropuerto Internacional Eldorado y la Autopista Medellín (figura 2.1). Limita por el occidente con el río Bogotá, por el sur con los barrios Engativá, Las Mercedes, Puerto Amor, Bolivia, Villa del Mar y la carretera que une a Engativá con el parque La Florida. Por el oriente limita con los barrios Álamos Norte, Álamos Sur y Bosques de Mariana entre otros. Por el norte con los barrios Villas de Granada, Los Ángeles y con áreas destinadas al pastoreo y cultivo. Presenta una forma alargada en dirección suroriente-noroccidente. Las vías de acceso son la entrada a Engativá, la calle 80, la carrera 96 y la carrera 112, esta última atraviesa el humedal en el sentido norte-sur. La cuenca del humedal es una de las más pequeñas del Distrito (1688 hectáreas correspondientes a la cuenca pluvial y 232 hectáreas, a la cuenca sanitaria), con una salida de sus aguas al río Bogotá, muy cerca al parque La Florida.

La zonificación del humedal

El impacto generado por los canales perimetrales fomentó una nueva división del humedal de Jaboque (figura 2.2), la cual se tomó como base para el desarrollo de proyectos de investigación (Muñoz, 2004). La primera división se denominó sección 1, zona intervenida, tercio alto. Empieza en la unión de los canales Carmelo y Jaboque, y termina en donde finalizó la construcción de los canales perimetrales, frente al brazo de Villa Gladys. La segunda se denominó sección 2 o zona de transición, tercio medio; comienza en la terminación de los canales perimetrales y termina al frente de la cancha de tejo que se encuentra dentro de la zona de ronda del humedal en el barrio La Faena. La tercera se denominó sección 3, zona conservada,

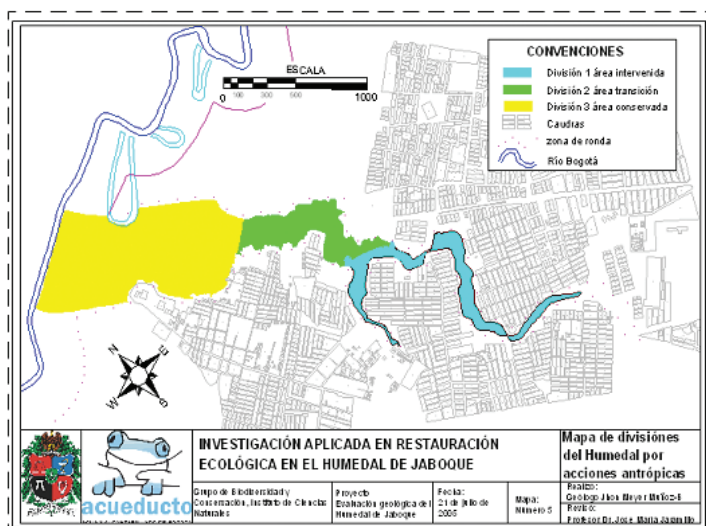
tercio bajo; comienza en la cancha de tejo mencionada y termina en el punto donde el humedal entrega las aguas al río Bogotá (Muñoz, 2004).

Figura 2.1. Localización geográfica del humedal de Jaboque



Fuente: Sierra y Monsalve, 2005.

Figura 2.2. Zonificación del humedal de Jaboque



Fuente: Muñoz y Jaramillo, 2005.

Para la caracterización del humedal y de sus zonas circunvecinas, se diseñó una grilla de trabajo que permitió unir y georreferenciar sesenta puntos de muestreo numerados de uno a sesenta, de los cuales se seleccionaron quince para la toma de datos morfológicos, fisicoquímicos e hidrobiológicos (figura 2.3) (Muñoz y Jaramillo, 2005).

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

Comprendida por los transectos de la grilla de trabajo H, J, K, L, M y N. Se caracteriza por estar altamente intervenida con obras civiles de canalización del cauce del humedal. En esta zona, el nivel de deterioro ambiental es grande, con altos niveles de contaminación de las aguas (figuras 2.4 y 2.5).

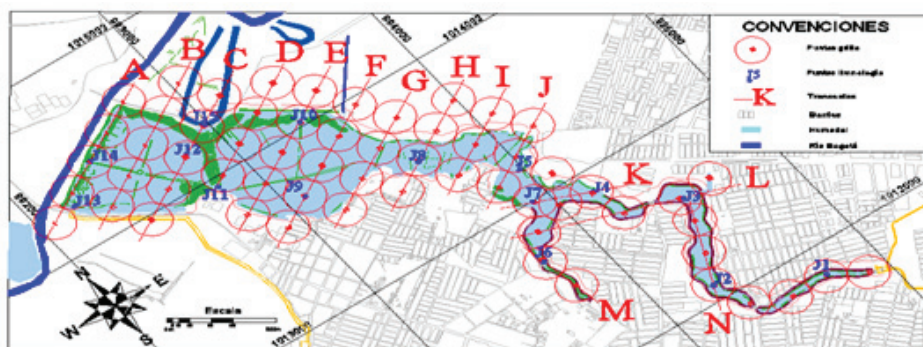
Sección 2, zona de transición (tercio medio)

Comprendida por los transectos D, E, F y G. Se observan fuertes procesos de eutrofización en combinación con algunos espejos de agua relativamente conservados y además se presentan obras hidráulicas (figuras 2.6 y 2.7).

Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

Comprendida por los transectos A, B y C. Se caracteriza por ser la que tiene menos intervención del hombre y presenta los menores índices de contaminación, a excepción del sector que se comunica con el río Bogotá (figuras 2.8 y 2.9).

Figura 2.3. Mapa de la grilla de trabajo para el humedal de Jaboque y puntos de muestreos limnológicos



Fuente: Muñoz y Jaramillo, 2005.

Figura 2.4. Sección 1, zona intervenida (tercio alto)



Figura 2.5. Sección 1, zona intervenida (tercio alto)



Figura 2.6. Sección 2, zona de transición (tercio medio)



Figura 2.7. Sección 2, zona de transición (tercio medio)



Figura 2.8. Sección 3, zona conservada (tercio bajo)



Figura 2.9. Sección 3, zona conservada (tercio bajo)



Aspectos geológicos y geomorfológicos del humedal de Jaboque

Durante gran parte del Cuaternario (últimos 2,5 millones de años), una porción considerable de la zona plana de Bogotá fue un lago, cuyo nivel de agua variaba con respecto a los cambios del clima y a la recurrente deposición de sedimentos (Hooghiemstra, 1984). La desecación de este gran lago se inició en el Pleniglacial Superior, producto del desagüe natural generado por el Salto de Tequendama (Van der Hammen, 2003).

Otro factor que ha modelado topográficamente la sabana de Bogotá, desde el Cuaternario hasta la actualidad, es la acción de las fuentes hídricas. El río Bogotá es el más importante en esta labor. Sus dinámicas formaron los humedales de la sabana y en otros casos ha influenciado con su nivel de inundación.

La evolución del humedal de Jaboque ha sido marcada tanto por la influencia hídrica como por el desarrollo cultural de las poblaciones humanas, convirtiéndolo en uno de los puntos claves para el estudio de la expansión urbana de la capital y su influencia sobre la sabana. Muñoz y Jaramillo (2005), basados en la interpretación de fotografías aéreas de 1949 y 2000, y de la información recolectada en campo en 2005, generaron análisis multitemporales en aspectos como el límite físico, las diferentes terrazas que lo componen, los lineamientos dentro y fuera del cuerpo de agua, los drenajes que lo conectan al sistema de humedales de la sabana y las estructuras antrópicas que han influenciado su modelamiento.

La evaluación del registro estratigráfico depositado en los últimos miles de años, evidencia los cambios naturales y antrópicos del humedal (Muñoz y Jaramillo, 2005). Las estratigrafías hechas en dicho estudio fueron somera (cincuenta centímetros), profunda (contacto con la formación sabana) y arqueológica (evidencias prehispánicas). La primera reconoce el impacto de la intervención humana, la segunda evidencia la evolución del humedal y la última expone cuándo y cómo fue afectado por culturas prehispánicas (Muñoz, 2004).

La interpretación de las fotografías aéreas permitió reconocer las diferentes formas y relacionarlas con las características actuales. El humedal Jaboque se desarrolla dentro de una planicie cuaternaria, con pendientes entre uno y cinco grados. Presenta una forma alargada, similar a la morfología de una quebrada recta en un valle erosional. En su trayecto se observan varios cambios de dirección alrededor de los 70° hacia el NE, los cuales vuelven a su dirección original luego de varios metros de recorrido. Estos cambios de dirección le dan al humedal un aspecto de escalera.

Entre los cambios significativos detectados en el análisis multitemporal se evidenció el paso de cuatro niveles en 1949, a solo dos en 2000, debido al cambio de dirección en su trayectoria. Al humedal llegaban varias quebradas, de las cuales en la actualidad solo existe la más grande, conocida como brazo de Villa Gladys. Hay una división geomorfológica bien marcada, en la cual se separa mediante una terraza la dinámica del río Bogotá en sus últimos años, de un valle erosional que cubre homogéneamente el resto del área. También fueron identificadas diferentes obras de manejo a través del tiempo del humedal de Jaboque; en su geomorfología se diferencian patrones de abanico, ajedrezado, longitudinal, espina de pescado y paralelo (Muñoz, 2004).

Al analizar cada vuelo por año se obtuvo que para 1949 solo había una carretera que atravesaba el humedal, que existe actualmente y se conoce como la carrera 111 C, dicha vía era el único acceso para las fincas que rodeaban el humedal; estas fincas eran de uso agrícola o vacacional. La influencia de la expansión de la ciudad de Bogotá era nula, el Aeropuerto Eldorado no existía. El agua que llegaba al humedal provenía de la escorrentía depositada en la planicie circunvecina y de las fincas aledañas. El control del humedal se daba por una serie de lineamientos que se basaban en su forma escalonada. El río Bogotá se encontraba dentro de un ambiente de ríos meándricos. En el vuelo de 2000, hecho por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se observó el crecimiento de la ciudad sobre la antigua terraza alta, la cual separaba la cárcava del humedal de las antiguas zonas de cultivo, y en algunas zonas dentro del límite físico, siendo las más afectadas las quebradas afluentes y algunos lugares del cauce principal. Para este tiempo el humedal se divide en un sector intervenido y un sector conservado.

Los principales afluentes son las aguas residuales de los barrios circunvecinos, las aguas lluvias y de escorrentías. El río Bogotá presenta meandros abandonados, que obstaculizan el recorrido del cauce debido a intervenciones antrópicas. Los datos recolectados en 2005 presentan un cambio drástico del área física del humedal debido a los canales perimetrales aún no terminados, que recogen el agua que le llega y la trasladan a la zona conservada, para evitar posibles inundaciones en las zonas circunvecinas. Dicha obra, por deficiencias en su diseño, ha deteriorado en algunos sitios de manera irreversible la salud de este cuerpo de agua. Debido a estos canales se observa una nueva división del humedal, que ha originado una zona intervenida, una zona de transición y una zona conservada.

Los resultados de la estratigrafía somera muestran que existen dos tipos de sedimentos característicos; los primeros son arcillas sedimentadas de color negro con

alto contenido en materia orgánica, de un espesor mayor a cincuenta centímetros, en avanzado proceso de putrefacción, que dan como resultado altos contenidos de metano. Estos sedimentos se generaron por la acumulación permanente de aguas residuales, la falta de flujo del agua y el grado de anoxia en el agua del humedal. Los segundos sedimentos son arcillas mezcladas irregularmente con las arcillas negras, debido a los procesos de relleno y remoción del fondo del cuerpo de agua.

En la desembocadura de los canales perimetrales los sedimentos son de color negro, similares a los de la zona intervenida. La parte transicional presenta depósitos orgánicos distribuidos uniformemente, con un espesor de quince centímetros. La zona conservada tiene un perfil muy homogéneo; la parte superior está conformada por sedimentos dejados por la dinámica actual, seguida por una transición de sedimentos de color gris claro, con gran cantidad de intraclastos de color negro y una base de depósitos gris oscuro de textura plástica. El material en esta fase pertenece a las formaciones Sabana y Chía. La formación Sabana no presenta afloramientos en ninguna de las márgenes del humedal; el material es arcilla lodosa gris claro, con presencia de óxidos color rosa y una textura muy plástica. La formación Chía se encuentra en contacto con la formación Sabana, a una profundidad que aumenta de sureste a noroeste, con mayor espesor, aproximadamente tres metros, junto al río Bogotá. En algunos lugares esta formación se encuentra cubierta por escombros o rellenos de tierra hechos en los últimos cincuenta años.

Al analizar la interpretación multitemporal de los últimos años se concluye que el humedal de Jaboque y el río Bogotá no tuvieron ningún cambio por dinámica natural, por el contrario, dichos cambios se generaron por acción antrópica. Se pudo establecer que estas intervenciones se originaron desde la época prehispánica, a través de obras como camellones y terraplenes para el manejo de los cultivos (Muñoz, 2004; González *et al.*, 2005). También se definió que el mayor impacto que ha sufrido el humedal es debido a la expansión urbana, iniciada por la construcción del Aeropuerto Eldorado; esto ha llevado a que se desequen sus afluentes y parte del cauce principal (Muñoz y Jaramillo, 2005).

El humedal de Jaboque, se originó gracias al taponamiento de la desembocadura de la quebrada Rudas, que posteriormente formó un drenaje impedido. El nuevo cuerpo de agua fue aprovechado por los muiscas para implementar sus distritos de riego. Por último, una nueva intervención llegó en los años cincuenta con la construcción del Aeropuerto Eldorado y la instalación de viviendas dentro y fuera del humedal, las cuales generan gran cantidad de aguas residuales que ingresan a él directamente (González *et al.*, 2005; Izquierdo, 2005).

En la actualidad el humedal de Jaboque se encuentra en una llanura cuaternaria con sedimentos fluviales y depósitos lacustres, causados por la secuencia de eventos glaciales e interglaciares que dieron paso a periodos de bajos o altos niveles del lago de la sabana. En los depósitos de sedimentos se presenta un estrato compuesto por material fino granular con alto contenido orgánico proveniente de la descomposición de los elementos vegetales (Muñoz y Jaramillo, 2005).

Microflora. Vegetación del humedal de Jaboque

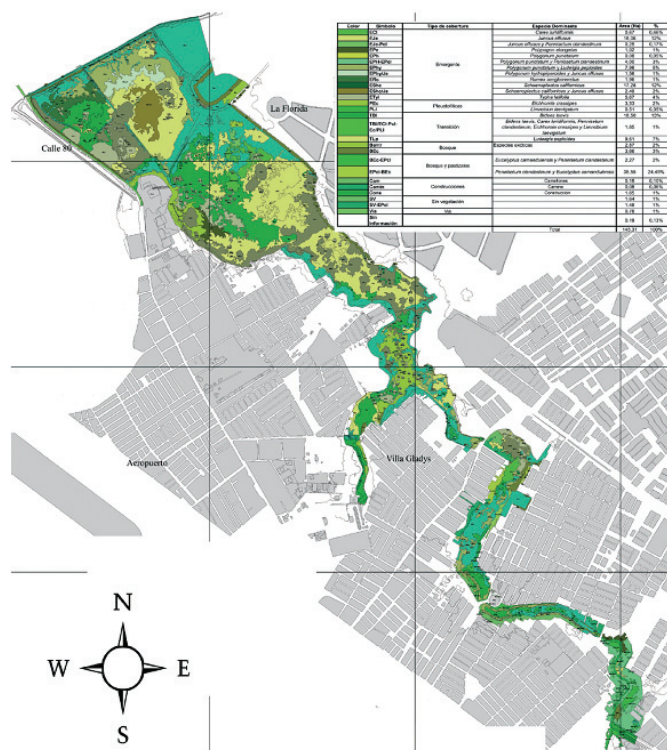
Según el trabajo de Valencia *et al.* (2005) sobre la evaluación de la microflora en el humedal de Jaboque, los morfotipos microbianos de mayor presencia son los del género *Pseudomonas* (*Pseudomonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas fluorescens*) y los de menor presencia pertenecen a la especie *Micrococcus roseus*. Otros microorganismos mencionados para el humedal de Jaboque son: *Stenotrophomonas maltophilia*, *Chryseobacterium indologenes*, *Klebsiella sp.*, *Enterobacter gergoviae*, *Burkholderia cepacia*, *Serratia sp.*, *Micrococcus sp.* y *Bacillus sp.*

La vegetación del humedal de Jaboque, según Rangel y Aguirre (1983) y Hernández y Rangel (2009) incluye catorce comunidades vegetales distribuidas en sus diferentes ambientes (figura 2.10). En la ribera predominan los juncuales de *Schoenoplectus californicus*, de *Juncus effusus* y el totoral de *Typha latifolia*. En los pantanos en las orillas o zonas de terrazas dentro de las cubetas predominan los herbazales de *Polypogon elongatus*, de *Rumex conglomeratus* y el cortaderal de *Carex luriformis*. En las áreas de transición entre los ambientes acuáticos y terrestres se localizan los camalotales, compuestos por vegetación semiarraigada de *Bidens laevis*, asociada con *Ludwigia peploides*, *Hidrocotyle ranunculoides* y *Polygonum punctatum*, y donde se reduce el espejo de agua dominan especies flotantes de comunidades de *Eichhornia crassipes*, *Limnobium laevigatum* y *Lema gibba*. Estas formaciones ofrecen diversidad de hábitats ricos y propicios para el establecimiento de nichos de aves endémicas y migratorias, para mamíferos, anfibios, artropofauna y microorganismos acuáticos.

Estado trófico del humedal de Jaboque

El humedal de Jaboque desempeña funciones específicas como trampa de nutrientes y de sedimentos provenientes de su cuenca de captación. Fenómenos como la colmatación y eutrofización se han acelerado debido a la presión ejercida por el crecimiento urbano, que modifica la calidad del recurso hídrico y la estructura de las comunidades acuáticas asociadas; así se afectan las principales vías de procesamiento de materia y energía que se presentan dentro de él (Álvarez, 2005).

Figura 2.10. Tipos de cobertura vegetal en el humedal de Jaboque



Fuente: Hernández y Rangel, 2009.

El oxígeno disuelto (Álvarez, 2005) muestra el predominio de una condición de déficit o hipoxia en sus aguas (1,73 mg/L). En zonas donde el espejo de agua es permanente las concentraciones de oxígeno son más altas (14,9 mg/L) con respecto a las áreas de mayor intervención, donde son más bajas (<0,6 mg/L). La temperatura es la responsable de las reacciones químicas y bioquímicas que se dan en el agua, como la solubilidad de los gases y la velocidad de descomposición en los ecosistemas acuáticos (Wetzel, 1981). Según Álvarez (2005), en el Jaboque la temperatura del agua varía entre 13,3 y 22,7 °C, con una media de 16 °C. Esta variable depende del grado de cobertura de macrófitas, que permite una mayor exposición a la radiación solar. El pH, como medida de la acidez o alcalinidad de una solución, define el agua del humedal como ligeramente ácida, siendo la media 6,54. Las zonas donde se identifica una alta producción de algas se relacionan con un aumento del pH (>7), debido a la utilización del CO₂ para procesos fotosintéticos.

Respecto a la alcalinidad total del agua, siendo la capacidad para neutralizar ácidos, reaccionar con iones de hidrogeno y la medida del contenido total de sustancias alcalinas, presenta un promedio de 2,02 meq/L; este valor se considera como alto y sugiere una buena capacidad amortiguadora de las aguas del humedal y variación baja del pH (Álvarez, 2005). Por otra parte, la dureza total del agua, producida principalmente por la presencia de iones de calcio y magnesio (Wetzel, 1981), muestra un valor promedio de 93 mg/L de CaCO_3 , lo que permite clasificar las aguas como moderadamente duras; esta dureza se relaciona químicamente con los bicarbonatos y se le da el nombre de dureza carbonácea.

La conductividad del agua, como una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, depende de la concentración de sustancias ionizadas disueltas en ella, que se relaciona con el grado de mineralización de las aguas, y su productividad registra un valor promedio de 268 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (intervalos entre 38 y 482 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los valores altos están asociados a la entrada de agua gracias a los canales perimetrales en la parte intermedia del humedal, y los valores bajos se asocian a la reducción de alcalinidad y dureza en algunas zonas del cuerpo de agua.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina (de forma indirecta) la concentración de materia orgánica en el agua, y es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la oxidación o estabilización de la materia orgánica biodegradable (Romero, 1996). En el humedal de Jaboque este valor oscila entre 2 y 43 mg/L de O_2 (Álvarez, 2005) Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), que representa el contenido orgánico total de una muestra oxidable gracias a un agente oxidante fuerte, exhibe un valor medio de 64 mg/L de O_2 ; los valores máximos para esta variable se relacionan con la presencia de sustancias húmicas originadas por la descomposición de biomasa vegetal. Al evaluar la relación DQO:DBO en el humedal, se observa que el valor de la DQO es mayor a la DBO, que manifiesta un predominio de material biológicamente resistente (Romero, 1996; Sawyer *et al.*, 2001) y con tasas de degradación lentas como son la celulosa y la lignina, y cantidades significativas de plantas acuáticas flotantes.

La determinación de nitrógeno y fósforo, en sus diferentes estados de oxidación, muestran que los nitratos son la forma de nitrógeno inorgánico menos abundante en el humedal (intervalo entre 0,1 y 0,3 mg/L de N-NO_3), debido al predominio de condiciones reductoras y un bajo nivel de oxígeno disuelto en el agua (Álvarez, 2005); esto conlleva a la utilización del nitrato por parte de los microorganismos como aceptor de electrones durante la respiración. La variación del nitrógeno total

es de 0,56 y 24,4 mg/L de N, los altos niveles se deben a la entrada de los canales perimetrales y a la parte intermedia estrecha del humedal (Álvarez, 2005).

La concentración de amonio es elevada, con un valor medio de 1,99 mg/l NH_4 ; los valores máximos se asocian a la gran actividad de las zonas de cultivos, donde se dan procesos dominantes de descomposición de material orgánico (mineralización del nitrógeno orgánico) por parte de bacterias de tipo amonificante. También se incrementan los niveles de nitrógeno amoniacal por entradas alóctonas en periodos en los que aumenta la precipitación, a través de los canales perimetrales en la parte estrecha del humedal (Álvarez, 2005).

Según los registros del fósforo soluble se tiene una variación entre 0,05 y 4,35 mg/L de P-PO_4 . Estos valores se consideran altos y evidencian nuevamente el aporte de nutrientes a través de los canales perimetrales. Cuando desciende el nivel del agua se registran concentraciones altas, siendo el promedio 1,6 mg/L. Los valores de fósforo total presentan fluctuaciones entre 0,14 y 4,68 mg/L de P, altamente disponible para el crecimiento de organismos autotróficos y regulado por las tasas de mineralización de los microorganismos solubilizadores de fosfato (Valencia *et al.*, 2005).

La relación de N:P total promedio es de 7, lo que hace al humedal potencialmente limitado en nitrógeno, y favorece la dominancia de cianobacterias al ser mejores competidoras por nitrógeno que muchos otros taxones fitoplanctónicos (Vitousek *et al.*, 2002). Estas características llevan a clasificar el estado trófico del humedal como hipertrófico.

En el humedal los sólidos suspendidos totales se encuentran entre 2 y 184 mg/L, siendo el promedio 47 mg/L; y los sólidos totales presentan una concentración entre 92 y 452 mg/L, con un valor medio de 247 mg/L (Álvarez, 2005).

En el análisis de las características hidrobiológicas del humedal se incluyen las comunidades de algas y de zooplancton. Respecto a la comunidad algal se tiene conocimiento de 93 taxones de microalgas, entre especies y morfoespecies identificadas, la mayoría típicos del perifiton y de ambientes bénticos. Las clases *Bacillariophyceae* y *Euglenophyceae* fueron los grupos con mayor riqueza dentro de esta comunidad, mientras que los grupos con menor riqueza registrada son las clases *Crysoophyceae*, *Cryptophyceae* y *Dinophyceae*. Los taxones de algas más frecuentes son *Nitzschia palea*, *Gomphonema parvulum*, *Navicula cf. cryptocephala*, *Cryptomonas erosa*, *Phacus curvicauda* y *Trachelomonas volvocinopsis* (Álvarez, 2005).

En el zooplancton se registraron 93 taxones, de los cuales los microcrustáceos y rotíferos se identificaron casi en su totalidad. Esta comunidad muestra componen-

tes típicos de la zona litoral de cuerpos de agua someros y los organismos que la constituyen tienen hábitos bénticos y perifíticos (Dole *et al.*, 2000; Ricci y Balsamo, 2000; Duggan, 2001; Pereira *et al.*, 2002). El mayor número de especies se localiza en el sector intermedio y amplio del humedal; esta diversidad se da por la variabilidad del sustrato, presencia de macrófitas y una baja profundidad de la columna de agua (Ortega *et al.*, 2000). Donde se da un flujo mayor del agua se produce un efecto de lavado, lo que dificulta el establecimiento de la comunidad. La baja riqueza se atribuye a fluctuaciones drásticas del nivel del agua, a una baja disponibilidad de este líquido y a los lixiviados provenientes de las prácticas de agricultura, en especial los pesticidas (Dodson y Lillie, 2001).

Diagnóstico participativo social

El diagnóstico participativo social (Peñuela, 2005) para la zona del humedal de Jaboque muestra las expectativas de la comunidad que se encuentra dentro de la zona de influencia, enmarcándolas en temáticas de conservación, transformación, sentido de pertenencia, cuidado, propuestas y alternativas frente a las problemáticas actuales (caza, ganadería, inseguridad, construcción de ciclorrutas y canales, viabilidad de un encerramiento, necesidades de la población). Se trata de alcanzar un equilibrio entre las condiciones ecológicas del humedal y el factor humano.

Según la Alcaldía de Bogotá (2009) los aspectos sociales generales de la localidad de Engativá donde se ubica el humedal de Jaboque, son:

- La población es de 836 124 habitantes.
- El 14,76 % de la población de la localidad se ubica en la UPZ Boyacá Real, seguida de Las Ferias y el Minuto de Dios con el 13,14 %; Garcés Navas (18 %), Bolivia (15 %), Santa Cecilia (10 %), Engativá (15,81 %), Álamos (1 %) y Jardín Botánico (0,36 %).
- El 98,7 % de la población se encuentra en una estratificación socioeconómica baja, 0,7 % sin clasificar y 0,6 % en estrato medio.

La zona de la ronda del humedal, clasificada como estrato dos, empezó a ser urbanizada aproximadamente desde el año 2002, lo que produjo la desecación de tierras, como es el caso del barrio Los Ángeles. Estas acciones de urbanización, tanto legales como ilegales e incentivadas por el Estado y la ciudadanía, han generado la pérdida de dos tercios de tierra del humedal, que pasaron de 450 hectáreas en los años sesenta a 147 en la actualidad (con base en fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi —IGAC—).

En las zonas de los canales perimetrales se ha trabajado con proyectos de capacitación ambiental, que la Alcaldía local ha promovido en articulación con la EAAB, el Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA, hoy Secretaría Distrital de Ambiente), la Universidad Nacional, el Jardín Botánico y ONG. Las acciones comunitarias más relevantes, implementadas por estas entidades, se enumeran a continuación.

El Grupo de Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional llevó a cabo el proyecto “Capacitación en recursos ambientales utilizando como herramientas los humedales de la localidad de Engativá”, enmarcado dentro de la “Elaboración de la línea base de investigación del humedal de Jaboque como instrumento para la generación e implementación de un plan de manejo del ecosistema” durante 2002 y 2003. Se hicieron talleres de sensibilización, puesta en común y salidas de campo, además, se impartió conocimiento, tanto a la comunidad como a los estudiantes, sobre el medio biótico y físico del humedal y su problemática. El DAMA ejecutó en 2004 el proyecto “Campañas pedagógicas para el manejo racional del medio ambiente de la localidad de Engativá, especialmente lo relacionado con la conservación y apropiación del humedal de Jaboque”, con actividades como talleres, reuniones, encuentros, salidas pedagógicas al humedal y puestas en común. También adelantó talleres de video divulgativo en el proyecto “Lenguaje y producción visual como herramienta para la construcción social de conocimiento alrededor del humedal de Jaboque”. La empresa Cafam, que tiene a cargo la administración del humedal, desarrolló en 2005 un proyecto de educación ambiental a lo largo de toda la zona de ronda.

Entre las fundaciones ambientales se tienen en cuenta la Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental (Adessa), que ha trabajado en la protección y recuperación del humedal a través de la educación ambiental y la sensibilización comunitaria. La Fundación Nuevo Mundo ha generado proyectos de educación ambiental en colegios de la localidad. La Fundación Lagarto Azul asesora a los grupos ambientales de la localidad y acerca a niños y adultos, por medio de presentaciones lúdicas, al conocimiento y funcionamiento del humedal. La Fundación Ciudad Humana colabora en la sensibilización del uso adecuado de la ciclorruta a través de ciclopaseos con la gente de la localidad. La Fundación Interpretemos ejecutó en 2005 un proyecto de educación ambiental para que se diera la apropiación del espacio y el apoyo a los grupos ambientales del sector.

Gracias a la labor llevada a cabo por estas entidades se consolidaron grupos de trabajo para la recuperación del lugar, siendo los más importantes la organización

Amigos del Humedal, que nació por iniciativa de miembros del barrio Villa Constanza y que ha trabajado en la recuperación de sus zonas de ronda, en jornadas de arborización, limpieza de los canales perimetrales y salidas ecológicas, con miras a la conservación del humedal; y el grupo del barrio Villa Amalia, que ha adelantado labores ecológicas en él.

La acción comunitaria de estas entidades y grupos locales va orientada a disminuir la problemática alrededor del humedal de Jaboque, pero de sus propias instituciones y más específicamente de sus actividades se generan nuevas dificultades. Por ejemplo, los problemas de hacer educación ambiental van desde dar continuidad al trabajo hecho con la comunidad, para que esta sea partícipe de la solución, hasta lograr que las personas se vinculen y se apropien del entorno biofísico donde viven (Peñuela, 2005).

Si se generan estas nuevas necesidades entre la población se puede dar la conformación de comités, vigilantes y grupos con apoyo institucional, tanto económico como pedagógico; además, al crear una cultura organizacional, a partir de las juntas de acción comunal (JAC) y la formación de líderes locales, se aumenta el sentido de pertenencia entre los habitantes de la ronda del humedal y se apoya la recuperación integral y el desarrollo adecuado de un plan de manejo de este ambiente natural.

Para solucionar los problemas de la localidad de Engativá se deben tener en cuenta las altas tasas de inseguridad, la falta de alumbrado, el uso del espacio público, la adjudicación de baldíos y la baja calidad de vida de sus habitantes. Algunas de las soluciones presentadas por las JAC frente a esta problemática fueron que en los sitios baldíos se planificaran proyectos para el desarrollo de la comunidad, ambientes de esparcimiento y de recreación.

En los barrios Marandú y El Porvenir los líderes de las JAC han propuesto la construcción de un colegio, un salón comunal y un parque. La JAC del barrio La Faena propuso a la Alcaldía local la construcción de una biblioteca y un jardín infantil, además de una urbanización y un parque ecológico de bosque nativo en la ronda del humedal (conservando sus características naturales). En el barrio Centauros del Danubio la JAC busco recursos para la construcción de un salón comunal.

El 19 de febrero del año 2005 la Alcaldía menor y los vecinos, con apoyo de los vecinos de la ronda, lograron el desalojo de las carboneras; fabricas ilegales que durante cinco años quemaron material vegetal afectando la salud de los habitantes.

En las áreas donde hay un contacto permanente con el humedal los habitantes sienten el deseo de conservar y recuperar la zona a través de la arborización, la descontaminación y de un fácil acceso al lugar. Se espera aumentar la motivación

y las jornadas de sensibilización, la no continuidad de las ciclorrutas (debido al aumento de la inseguridad) y los canales perimetrales (debido al alto grado de contaminación) y el aislamiento del humedal por medio de barreras naturales o de un enmallado.

En las zonas intervenidas la perspectiva de los habitantes varía en lo que respecta a la ciclorruta; en general los habitantes de la ronda y de la localidad comparten su preocupación por lograr un ambiente físico agradable, que se dé el cuidado y mantenimiento de las obras actuales y procurar la gestión de nuevas obras con menor intervención dentro del plan de restauración.

A través de los colegios se llevan a cabo programas de investigación, haciendo que niños y jóvenes interactúen con los espacios naturales. Las juntas administradoras fortalecen los diferentes frentes de trabajo en temas de conservación y seguridad, especialmente con la gente que habita las rondas del humedal. La comunidad hace el manejo de basuras y de desechos, además de programas de revegetalización y de proyectos productivos, como caminatas, ciclopaseos y educación ambiental, por los cuales reciben algún ingreso para sus hogares (Peñuela, 2005).

En conclusión las acciones deben estar organizadas en proyectos y programas donde la comunidad participe y obtenga un beneficio económico, o simplemente de manera pedagógica, de esta forma se fomentaría la creación de grupos ambientales comprometidos. Se deben fortalecer las JAC ya existentes, que harán que la población local se vincule a la solución, y den continuidad al trabajo comunitario, para que haya apropiación del entorno biofísico por parte de las comunidades y se tenga una visión experimental e investigativa dentro del plan de restauración del humedal.

Caracterización climática de la zona de influencia del humedal Jaboque

Resumen

Con base en la información proveniente de la estación meteorológica del Aeropuerto Eldorado (manejada por el Ideam) se caracterizó la variación de la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, el balance hídrico y el brillo solar en el humedal de Jaboque, para el periodo de 1972-2010. El régimen de distribución de lluvias es de tipo bimodal-tetraestacional, el monto anual es de 829,6 mm, los periodos lluviosos se presentan entre abril y mayo y entre octubre y noviembre, y los periodos secos entre diciembre y marzo y entre junio y septiembre.

La temperatura media anual registrada fue 13,6 °C; el valor extremo de temperatura máxima (24,9 °C) se presentó en enero (año 1995) y en marzo (año 1992), y el valor más bajo de temperatura mínima (-6,4 °C) se registró en febrero (año 1995). La amplitud diurna de temperatura es de aproximadamente 1 °C. La humedad relativa, presenta un valor promedio anual de 80 %. Los valores de brillo solar presentan un promedio de 133,26 horas/mes, elevándose considerablemente en enero con 184,9 horas/mes. El tipo de clima, según Thornwaite, es ligeramente húmedo; el balance hídrico muestra exceso de agua en octubre (44,8 mm) y en ningún mes se muestra deficiencia de agua en el ambiente.

Metodología

Obtención de la información climática

Se tomaron como base los registros del Ideam de la estación Aeropuerto Eldorado, desde 1972 hasta el 2010 (anexo A). Esta estación meteorológica se ubica en Bogotá, en las coordenadas 0442 N, 7409 W, a una altitud de 2547 m s. n. m.

Procesamiento de la información

Se analizaron los registros de precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar (tabla 3.1), con base en los planteamientos de Van der Hamen *et al.* (1995). El balance hídrico se elaboró según las formulas de Thornthwaite (Eslava *et al.*, 1986), utilizando los valores medios de temperatura y precipitación registrados por la estación meteorológica Aeropuerto Eldorado. El enfoque del capítulo sigue los lineamientos metodológicos de Rangel y Arellano (2008) y Rangel y Carvajal-Cogollo (2009).

Resultados. Discusión

Precipitación

El régimen de distribución de lluvias es del tipo bimodal-tetraestacional, con un monto anual de 829,6 mm y un promedio mensual multianual de 69,1 mm, con variaciones entre 28,7 mm para enero, y 111,3 mm para octubre.

Los periodos de mayor pluviosidad se presentan desde marzo hasta mayo, con un valor de 279 mm que representa el 33,6 % del total de lluvia, y de octubre a noviembre, con un valor de 204,4 mm, que corresponde al 24,6 % de la pluviosidad total. Los valores máximos son 107 mm y 111,3 mm para abril y octubre. Los periodos de menor concentración van desde diciembre hasta febrero y desde junio hasta septiembre, los meses que presentan mínimos valores son enero y julio con 28,7 mm y 44,9 mm respectivamente (figura 3.1).

Figura 3.1. Marcha anual de la precipitación, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado. Promedio multianual 1972-2010

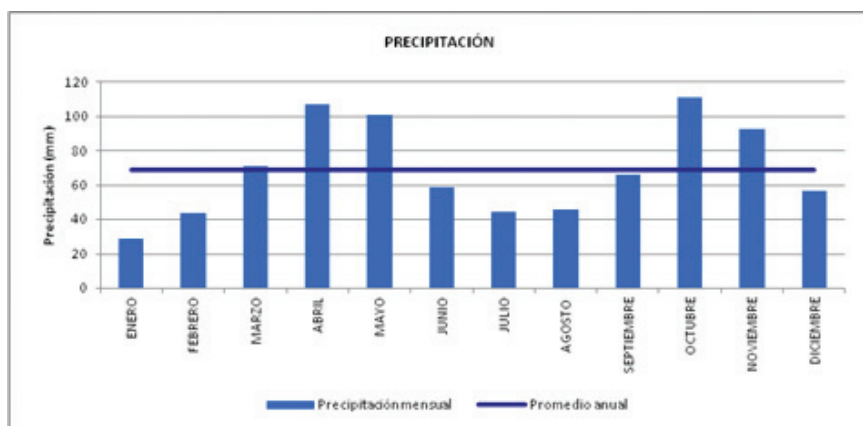


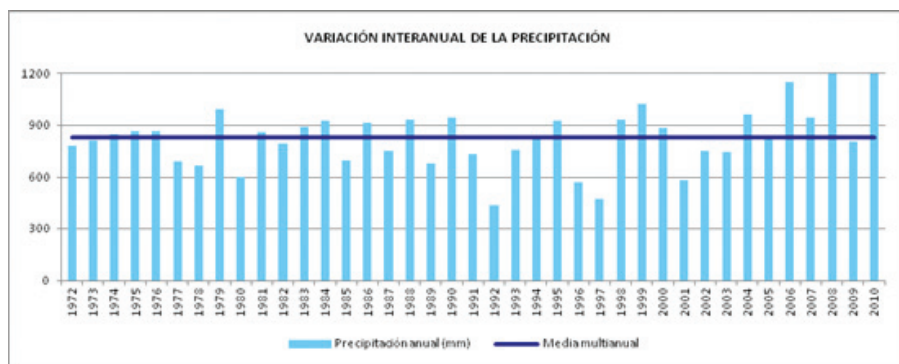
Tabla 3.1. Parámetros climatológicos estación meteorológica

Estación Aeropuerto Eldorado	Meses												Monto anual	Prom.
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Parámetros														
P Media (mm)	28,7	44,1	71,3	107	100,7	59	44,9	45,9	66,4	111,3	93,1	57,1	829,6	69,1
T °C máxima	21,9	22,5	22,2	21,9	21,5	20,8	20,4	21,1	21,4	21,5	21,4	21,4		21,5
T °C media	13,1	13,6	13,8	14	14	13,8	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,3		13,6
T °C mínima	0,2	0,7	2,2	3,9	4,3	4,1	3,7	2,7	2,1	2,6	2,7	1,1		2,5
Oscil. Temp. (°C)	21,7	21,8	20	17,9	17,2	16,7	16,7	18,3	19,3	18,8	18,6	20,3		
Brillo solar (horas/ mes)	184,9	151,7	137,9	106,4	107,1	113,2	134	135	123,1	118,9	128	158	1598,2	133,2
Humedad relativa (%)	79	79	81	82	82	79	77	77	79	82	83	81		80

Variación interanual

En la serie de 39 años el promedio multianual es 829,6 mm. No se diferencia un patrón en la serie de años secos y húmedos (figura 3.2). Los años 1992 y 1997, calificados como años con expresión del fenómeno de El Niño, presentan valores de precipitación muy bajos.

Figura 3.2. Variación interanual de la precipitación, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



Años secos

En la serie de datos los periodos secos corresponden a 1972-1980 y 1991-2000 (figura 3.2). En el primer periodo 1972, 1973, 1977, 1978 y 1980 se encuentran por debajo de la media (829,6 mm) con una disminución de la precipitación del 5,8 %, 2,1 %, 17 %, 19,8% y 27,9% respectivamente. Estos últimos tres corresponden a años típicos del fenómeno de El Niño. Los años 1974, 1975, 1976 y 1979 se encuentran por encima de la media, con un aumento de la precipitación del 2,2 %, 4,2 %, 4,3 % y 19,5 % respectivamente. La intensificación de las lluvias en este último año se debió al fenómeno de La Niña.

Para el periodo de 1991-2000 fueron secos 1991, 1992, 1993, 1994, 1996 y 1997, con una disminución de la precipitación del 11,6 %, 47,6 %, 8,3 %, 0,5 %, 31,5 % y 42,7% respectivamente. El año 1996 es típico del fenómeno de El Niño, y en 1992 y 1997 este se agudizó. Los que superaron la media fueron 1995, 1998, 1999 y 2000, con un aumento de las precipitaciones de 11,8 %, 12,4 %, 23,8 % y 6,7 % respectivamente. El incremento de las lluvias en 1999 se debió al fenómeno de La Niña.

Según la variación interanual, el año más seco fue 1992 con el fenómeno de El Niño más extremo, y un monto anual de 434,7 mm, que representa el 52,4 %

del monto promedio multianual, dejándose de recibir 394,9 mm. Los únicos meses por encima de la media multianual fueron septiembre, noviembre y diciembre, con 49,7, 108,3 y 59 mm respectivamente (figura 3.3).

Años húmedos

Los periodos húmedos que se observan en la serie de datos corresponden a 1981-1990 y 2001-2010 (figura 3.2). Para el primer periodo 1981, 1983, 1984, 1986, 1988 y 1990 presentan un aumento de las precipitaciones por encima de la media de 3,4 %, 7,2 %, 12,1 %, 10,3 %, 12,6 % y 14,3 % respectivamente, considerándose años húmedos. En 1990 el aumento de lluvias se debió al efecto del fenómeno de La Niña. Los años 1982, 1985, 1987 y 1989 presentaron una disminución de la precipitación por debajo de la media de 4,5 %, 15,9 %, 9,5 % y 18,2 % respectivamente. En 1985 y 1989 dicha disminución se debió al efecto del fenómeno de El Niño.

En el periodo 2001-2010 el aumento de las precipitaciones es significativo, y se consideran años húmedos 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2010, con un aumento de las precipitaciones del 16 %, 1,9 %, 38,6 %, 13,9 %, 45,5 % y 50,7 % respectivamente. Las altas precipitaciones en los años 2006, 2008 y 2010 se deben a la agudización del fenómeno de La Niña. En 2001, 2002, 2003 y 2009 se observa una disminución de las lluvias de 30,1 %, 9,3 %, 9,8 % y 2,8 % respectivamente. En 2001 se observa claramente el efecto del fenómeno de El Niño en la disminución de las precipitaciones por debajo de la media.

En estos dos periodos el año más húmedo fue 2010, que corresponde al fenómeno de La Niña más extremo, con precipitaciones anuales que alcanzaron los 1250,5 mm, es decir, se recibieron 420,9 mm más del promedio multianual (50,7 %); cinco meses están por debajo de la media (enero, febrero, marzo, agosto y septiembre) (figura 3.3).

Temperatura

Temperatura máxima

El valor promedio fue 21,5 °C; el mayor valor, 22,5 °C, se obtuvo en febrero y el menor, 20,4 °C, en julio (figura 3.4). La amplitud entre los valores extremos es de 2,1 °C. El año con el registro más alto fue 1997, con una temperatura promedio de 22,9 °C; el año con el menor valor registrado fue 1974, con una temperatura promedio de 20,2 °C.

Temperatura mínima

El valor promedio fue de 2,5 °C; el mayor valor, 4,3 °C, se alcanzó en mayo y el menor, 0,2 °C, en enero (figura 3.4). La oscilación mayor de los meses (mínima máxima y mínima mínima) fue 4,1 °C. El año más frío fue 1995 con una temperatura mínima promedio de 0,6 °C; el año con el valor más alto fue 2006, en el cual se registró una temperatura promedio de 5 °C. La variación interanual fue de 4,4 °C.

Figura 3.3. Marcha anual de la precipitación en un año húmedo frente a uno seco

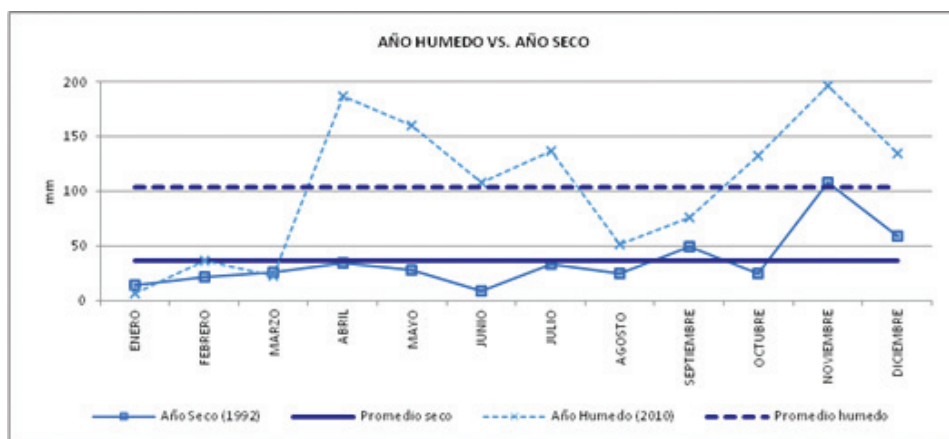
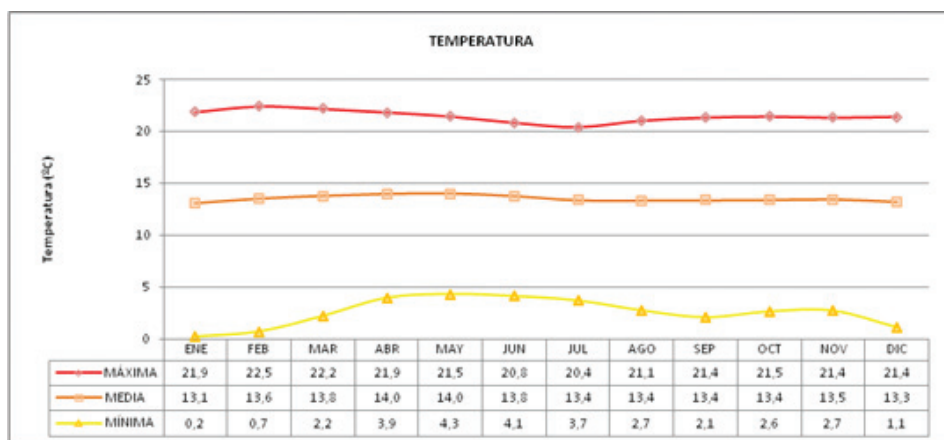


Figura 3.4. Marcha anual de la temperatura, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado. Promedio multianual 1972-2010



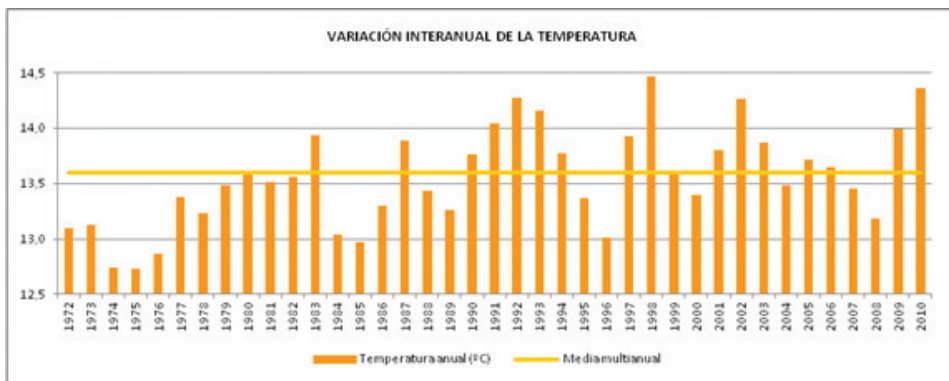
Temperatura media

La marcha de la temperatura media es del tipo isotérmico con un valor promedio de 13,6 °C; la amplitud térmica (diferencia entre el mes más frío y el más cálido) es de aproximadamente 1 °C. El valor mínimo se presentó en enero con 13,1 °C, y el mayor entre abril y mayo con 14 °C (figura 3.4). La variación interanual muestra que el año con mayor valor fue 1998, con un valor promedio de 14,5 °C. Los años con temperaturas más bajas fueron 1974 y 1975, los cuales registraron 12,7 °C. La diferencia entre el año más cálido (1998) y los más fríos (1974 y 1975) fue de 1,8 °C.

Variación interanual

En la serie histórica de 39 años (figura 3.5), el periodo 1972-1980 presentó montos inferiores a la media multianual, considerándose años fríos. Los años 1974, 1975 y 1976 son los que presentan menores valores (12,7, 12,7 y 12,9 °C respectivamente). El mayor valor se registró en 1980 siendo igual a la temperatura media (13,6 °C). En el periodo 1981-1990 los datos se acercan más a la media, siendo inferiores 1981, 1984, 1985, 1986, 1988 y 1989, mayores 1983, 1987 y 1990, e igual a la media 1982. Se consideran como fríos 1984 y 1985 con temperatura igual a los 13 °C. Los más cálidos fueron 1983 y 1987 con una temperatura igual a 13,9 °C. Las altas temperaturas de los dos periodos se asocian con el fenómeno de El Niño, por encima de la media anual en 1980, 1982, 1983 y 1987.

Figura 3.5. Variación interanual de la temperatura media, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



Los periodos de 1991-2000 y 2001-2010 son considerados cálidos, debido a que la mayoría de los años están por encima de la media multianual (figura 3.5). Para el

primer periodo solo tres años están por debajo de la media, 1995, 1996 y 2000. El valor más bajo se registró en 1996 (13 °C). Las temperaturas más altas se registraron en 1991, 1992, 1993 y 1998, con valores iguales a 14,1, 14,3, 14,2 y 14,5 °C respectivamente. En el segundo periodo, 2001-2010, los años por debajo de la media fueron 2004, 2007 y 2008, siendo este último el más bajo con una temperatura de 13,2 °C. Los más cálidos fueron 2002, 2009 y 2010 con temperaturas iguales a 14,3, 14,0 y 14,4 °C respectivamente. Las altas temperaturas de los dos periodos se asocian con el fenómeno de El Niño, por encima de los 14 °C en 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. Las bajas registradas en 2008 se asocian a la agudización de La Niña.

Humedad relativa

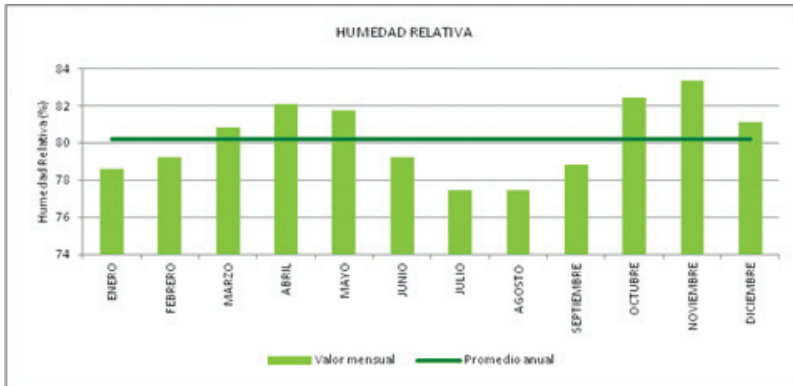
El valor promedio es de 80 %. El máximo valor registrado fue de 83 % en noviembre, y el mínimo de 77 % en julio y agosto (figura 3.6). La marcha mensual del meteoro guarda relación con la oscilación de las temperaturas y con los meses de mayor y menor valor de precipitación. Según la variación interanual, el año con mayor humedad relativa fue 2008, con un promedio de 85,8 %; el de menor valor fue 1992 con 75,8 %. La diferencia fue del 10 % de humedad relativa.

Variación interanual

La variación interanual de la humedad relativa muestra para el periodo 1972-1980 tres años por debajo de la media, 1972, 1979 y 1980; este último presentó la más baja con 79,4 %. Los años que se encontraron por encima de la humedad relativa media (80,2 %) fueron 1973, 1974 y 1975, siendo este último el mayor registro para el periodo, con una humedad de 82,3 %. El valor registrado para 1980 se debe al fenómeno de El Niño, cuando las altas temperaturas y la disminución de las precipitaciones hicieron que la humedad que retiene el aire descendiera.

El periodo 1981-1990 es considerado húmedo debido a que solo tres años, 1987, 1989 y 1990 están por debajo de la media, con valores de 79,7 %, 79,3 % y 78,0 % respectivamente. Los de mayor humedad relativa fueron 1981, 1982, 1984, 1986 y 1988, con montos de 81,1 %, 81,5 %, 82,6 %, 81,5 % y 81,0 % respectivamente. El año 1990, aunque es considerado típico del fenómeno de La Niña, debe la baja humedad en el aire a las altas temperaturas registradas. En cambio en 1984 sucede el efecto contrario, ya que se tienen altas precipitaciones y una baja en la temperatura, haciendo que el aire se sature de vapor de agua.

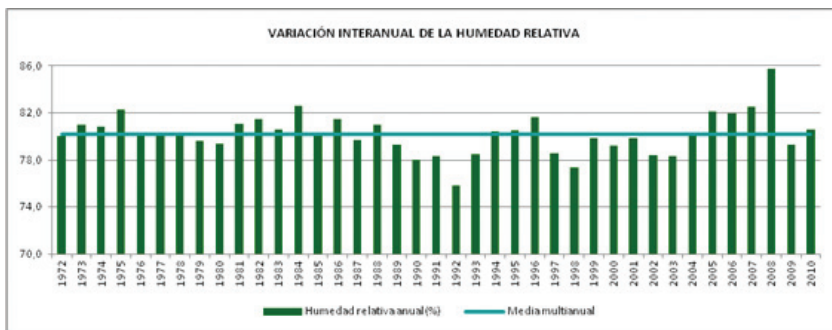
Figura 3.6. Marcha anual de la humedad relativa, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado. Promedio multianual 1972-2010



Para el periodo 1991-2000 se tienen registros de años secos, en los que 1991, 1992, 1993, 1997, 1998, 1999 y 2000 están por debajo del valor medio multianual, siendo los más bajos 1992 con 75,8 % (el más bajo en la serie de datos) y 1998 con 77,3 % de humedad relativa. El más alto se obtuvo en 1996 (81,7 %). La baja humedad relativa de 1992 y 1998 se asocia a la agudización del fenómeno de El Niño.

El último periodo, 2001-2010, está altamente influenciado por La Niña. Los años 2001, 2002, 2003 y 2009 se encuentran por debajo de la media, con valores registrados de 79,8 %, 78,4 %, 78,3 % y 79,3 % respectivamente. El incremento en la humedad es considerable en 2005, 2006, 2007 y 2008, debido a que en este subperiodo hubo un descenso de la temperatura y un aumento significativo de las precipitaciones. El año 2008, cuando se agudizó el fenómeno de La Niña, presenta el valor más alto en la serie de datos de humedad relativa, 85,8 % (figura 3.7).

Figura 3.7. Variación interanual de la humedad relativa, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



Balance hídrico

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de todos los meses están por encima de los 50 mm. La clasificación climática según Thorthwaite es un clima ligeramente húmedo (tabla 3.2).

La ETP presenta un monto anual de 670,9 mm. En la síntesis anual los mayores valores se presentaron entre marzo y junio; no hay déficit de agua. El valor total de exceso de agua es 158,6 mm, el mes con el mayor exceso es octubre con 44,8 mm. La clasificación climática para esta estación es $B_1RB'_1$ clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco.

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de los periodos secos, exceptuando enero-febrero y julio-agosto, se encuentran por encima de los valores de precipitación, lo cual indica un déficit de agua en estos meses. En octubre se alcanza la mayor acumulación de agua y es el mes con mayor precipitación del segundo periodo de alta pluviosidad; en mayo se presenta el máximo valor de ETP (60,6 mm) y el valor mínimo (51,1 mm) se registra en febrero (figura 3.8).

Diagrama ombrotérmico

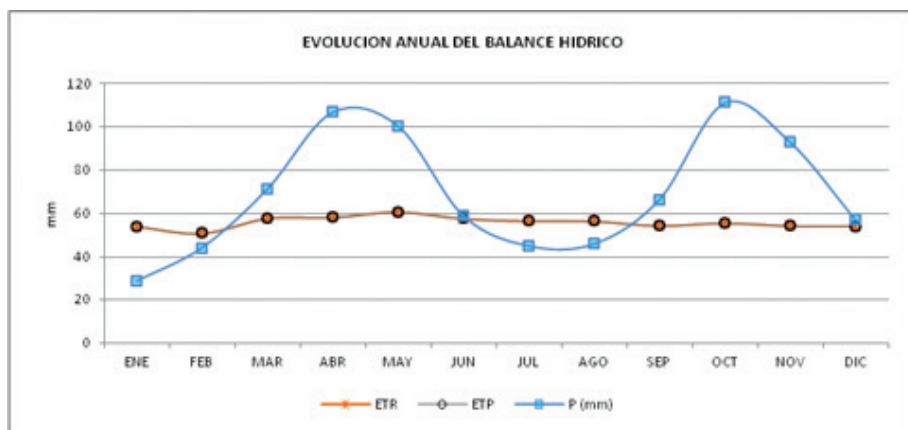
Mediante la representación de la distribución de los promedios de precipitación multianual y temperatura media mensual, se establece que no se originan periodos ecosecos (Gaussen, 1955), sino que por el contrario se presenta un nivel alto de humedad, por lo tanto existe un excedente de agua a lo largo de todo el año.

La precipitación nunca alcanza valores por debajo del valor de la temperatura, además, la temperatura tiende a ser constante, presentándose un clima húmedo con dos periodos perhúmedos, el primero en abril-mayo y el segundo en octubre-noviembre, que superan los 100 mm de precipitación (figura 3.9). El de mayor pluviosidad fue octubre, con 111,3 mm, que es uno de los de menos temperatura, con 13,4 °C.

Tabla 3.2. Balance hídrico multianual, Aeropuerto Eldorado

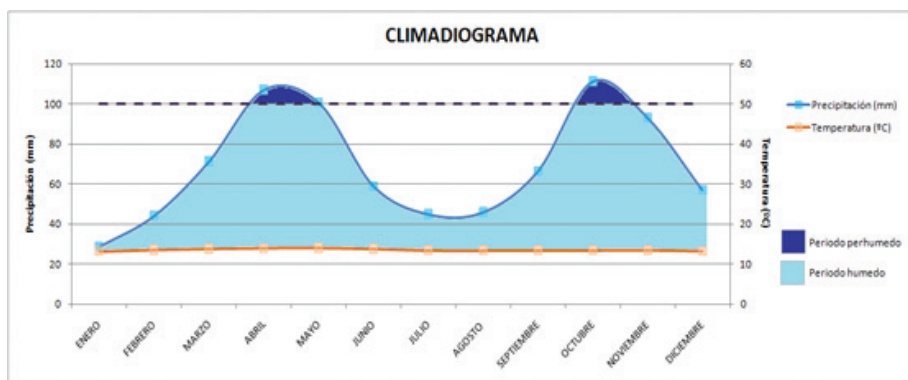
Municipio: Departamento: Estación:		Bogotá D. C.		Bogotá D. C.		Apto. Eldorado		Lat.		Long.		Grados												Cardinal (N, S, E, W)											
		Dic*	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual																				
T °C		13,3	13,1	13,6	13,8	14,0	14,0	13,8	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,3	13,6																				
P mm		57,1	28,7	44,1	71,3	107	100,7	59	44,9	45,9	66,4	111,3	93,1	57,1	829,5																				
F		1,02	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02																					
I		4,4	4,3	4,5	4,7	4,8	4,8	4,7	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4	54,3																				
ETP		54,4	53,3	51,1	57,8	58,3	60,6	57,8	57,1	56,6	54,4	55,5	53,9	54,4	670,9																				
P - ETP		2,7	-24,6	-7,0	13,5	48,7	40,1	1,2	-12,2	-10,7	12,0	55,8	39,2	2,7																					
difer. P - ETP		2,7	24,6	7,0	13,5	48,7	40,1	1,2	12,2	10,7	12,0	55,8	39,2	2,7	55,8																				
Ai calc.		102,7	75,4	68,3	81,9	130,6	140,1	101,2	87,8	77,1	89,0	144,8	139,2	102,7																					
A		100,0	75,4	68,3	81,9	100,0	100,0	100,0	87,8	77,1	89,0	100,0	100,0	100,0																					
delta A		0,0	-24,6	-7,0	13,5	18,1	0,0	0,0	-12,2	-10,7	12,0	11,0	0,0	0,0																					
E		2,7	0,0	0,0	0,0	30,6	40,1	1,2	0,0	0,0	0,0	44,8	39,2	2,7	158,6																				
D		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0																				
ETR		54,4	53,3	51,1	57,8	58,3	60,6	57,8	57,1	56,6	54,4	55,5	53,9	54,4	670,9																				
RH		0,05	-0,46	-0,14	0,23	0,83	0,66	0,02	-0,21	-0,19	0,22	1,00	0,73	0,05																					
A		1,35																																	
Ih		23,64																																	
Ia		0,00																																	
Fh		23,64																																	
F= factor de correc. según latitud		E= exceso de agua																																	
I= índice calórico mensual		D= deficiencia de agua																																	
ETP = evapotranspiración potencial		ETR= evapotranspiración real																																	
A= almacenaje		RH= relación de humedad																																	

Figura 3.8. Balance hídrico, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



Con base en los resultados obtenidos anteriormente se puede decir que esta zona es húmeda, con periodos fríos de larga duración y con un clima axérico; no hay tiempos secos cuando la media de las temperaturas esté por encima de la precipitación. Se observan dos periodos escasamente secos de baja precipitación en enero-febrero y julio-agosto.

Figura 3.9. Climadiograma, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



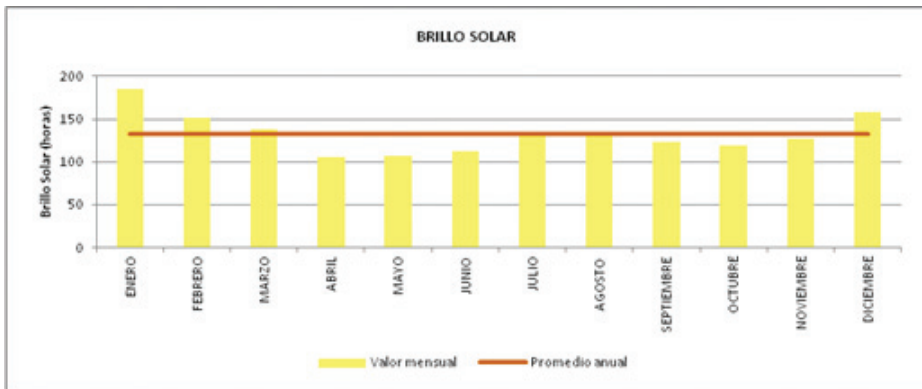
Fuente: Adaptado de Gaussen, 1995.

Brillo solar

El valor promedio anual del brillo solar es 133,2 hora/mes (h. m.) La marcha anual es del tipo bimodal-tetraestacional. Se diferenciaron dos períodos de mayor concentración, uno de diciembre a marzo, en el que enero presenta el mayor valor con

184,9 h. m., y otro entre julio y agosto, en el que agosto presenta el mayor valor con 135 h. m. Los periodos de menor insolación comprenden los meses restantes, los cuales están por debajo de la media (133,26 h. m.) (figura 3.10). El año con el mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas anuales; el de menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348. La variación interanual registrada fue de 564 horas/año.

Figura 3.10. Brillo solar, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



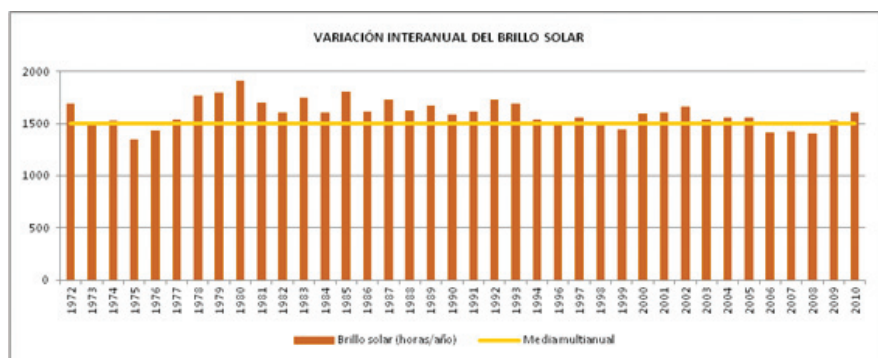
Variación interanual

En la serie histórica 1972-2010 se tiene que el primer periodo, 1972-1980, es considerado cálido, debido a que la mayoría de los años presentaron mayor número de horas/año con respecto a la media multianual; 1973, 1975 y 1976 son los únicos que se encuentran por debajo de la media, con valores de 1486,8, 1348,3 y 1433,4 horas/año respectivamente. El menor dato del periodo se presentó en 1975, que tuvo menores temperaturas y mayor humedad relativa. El máximo valor lo obtuvo 1980 con 1911,9 horas/año, el cual presenta la mayor temperatura y la menor humedad relativa del periodo especificado, y se considera típico de El Niño.

De 1981 a 1990 se consideró cálido. Ningún año se encuentra bajo la media multianual. El mayor valor se registró en 1985 (1811,5 horas/año). Este último año tuvo la temperatura más baja del periodo, pero su humedad relativa se mantuvo en la media multianual, lo que asocia este meteoro al fenómeno de El Niño (figura 3.11).

En el periodo 1991-2000 se presentaron dos años por debajo de la media multianual, 1996 con 1497,4 horas/año y 1999 con 1444,7 horas/año. El mayor valor estuvo en 1992 (1735,2 horas/año); este presentó el fenómeno de El Niño más extremo de la serie histórica de datos (la menor humedad relativa y la más baja precipitación de toda la serie, y temperatura mayor a 14 °C).

Figura 3.11. Variación interanual del brillo solar, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado



Para 2001-2010, los años 2006, 2007 y 2008 registraron los menores valores de brillo solar, con 1418,2, 1424,7 y 1403,3 horas/año respectivamente; este subperiodo se asocia con la agudización del fenómeno de La Niña. El año 2002 presenta el mayor valor de brillo solar (1662,9 horas/año), con baja humedad relativa, altas temperaturas y precipitaciones por debajo del promedio multianual (figura 3.11).

Comparación entre 2004 y 2005

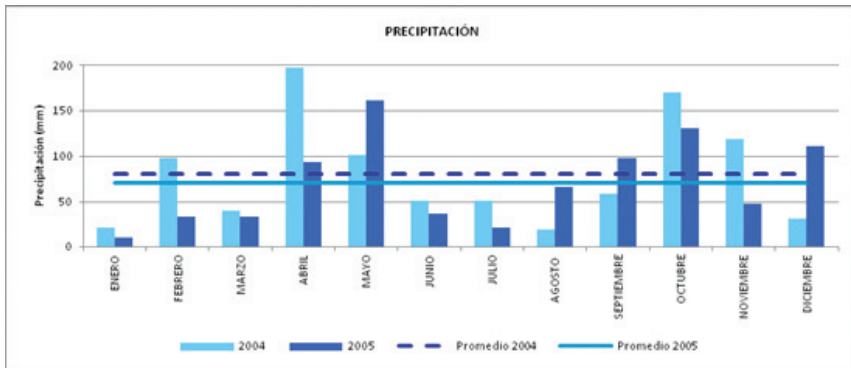
Precipitación

El monto anual de la precipitación para 2004 fue mayor (962 mm) en comparación con 2005 (845 mm). El mes más húmedo en 2004 fue abril (197,7 mm), seguido de octubre (170 mm); el mes más seco fue enero con 22 mm de precipitación. En 2005 el mes más húmedo fue mayo (161.3 mm) seguido de octubre (131.3 mm), el más seco fue enero con 11,1 mm de precipitación (figura 3.12).

En los meses húmedos la mayor variación se dio en abril, con una diferencia de 104 mm, siendo mayor en 2004. En los meses considerados secos la mayor amplitud se dio en diciembre, con una diferencia de 79 mm, siendo mayor en 2005. La menor diferencia se dio en marzo, variando en tan solo 7 mm de un año al otro (figura 3.12).

En los registros de variación interanual 2004 presentó una precipitación mayor a la media multianual en 16 %. El año 2005 solo excedió la media multianual en 1,9 % (figura 3.2).

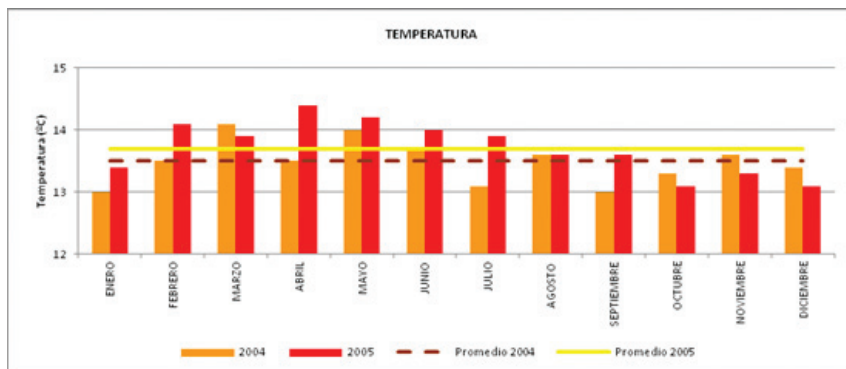
Figura 3.12. Marcha anual de la precipitación, 2004-2005



Temperatura

La temperatura media fue mayor para 2005 (13,7 °C) frente a 2004 (13,5 °C). Para 2004 los meses más fríos fueron enero, julio, septiembre, octubre y diciembre, con valores de 13, 13,1, 13, 13,3 y 13,4 °C respectivamente. El más cálido fue marzo con 14,1 °C seguido de mayo con 14 °C. En 2005 los más cálidos fueron febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio, que excedieron los 13,9 °C. Abril registró la mayor temperatura (14,4 °C). Los más fríos fueron octubre y diciembre con una temperatura registrada igual a 13,1 °C. La mayor variación de un año a otro se dio en abril, con una diferencia de 0,9 °C, seguido por julio con una diferencia de 0,8 °C (figura 3.13).

Figura 3.13. Marcha anual de la temperatura, 2004-2005

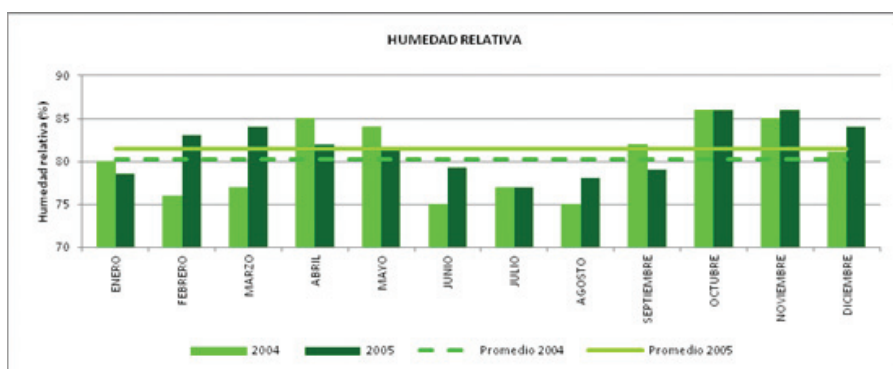


Con respecto a la variación interanual, 2005 (13,7 °C) fue más cálido que 2004 (13,5 °C); los datos de los dos años solo se alejaron en 0,1 °C de la media multianual (figura 3.5).

Humedad relativa

El porcentaje de humedad relativa fue mayor para 2005 (81,6 %) en comparación con 2004 (80,3 %). Los meses más húmedos en 2004 fueron abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, siendo el más extremo octubre con 86 % de humedad relativa, seguido de abril y noviembre con 85 %. Los más secos fueron junio y agosto (75 %). Para 2005 los meses más húmedos fueron febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, siendo octubre y noviembre los de mayor valor registrado (86 %). El más seco fue julio con 77 % de humedad relativa. La mayor variación de un año a otro se dio en febrero y marzo con una diferencia de siete puntos porcentuales (figura 3.14).

Figura 3.14. Marcha anual de la humedad relativa, 2004-2005



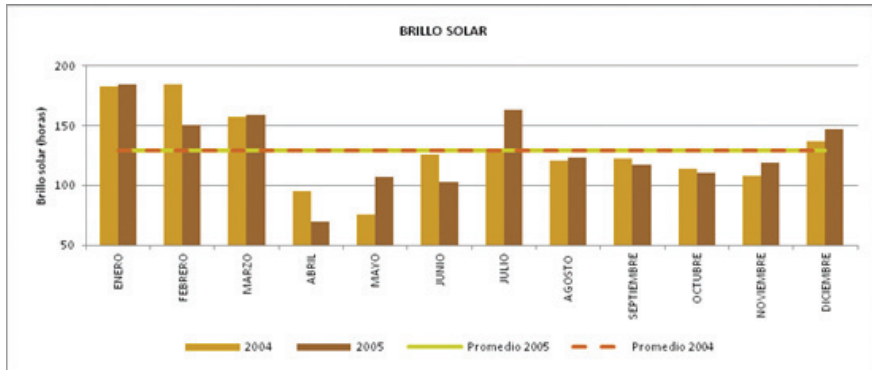
Según los datos de la serie histórica, 2004 se encontró sobre el rango de la media multianual y 2005 lo excedió en 1,9 puntos porcentuales (figura 3.7).

Brillo solar

La diferencia en horas anuales de brillo solar entre 2004 y 2005 no es significativa. En 2004 los meses con mayores valores fueron enero, febrero, marzo y diciembre con 182,7, 185, 157,6 y 137,2 horas/mes. El menor valor se registró en mayo (75,8 horas/mes). Para 2005 los meses con mayor número de horas de brillo solar fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre, siendo el mayor enero con 184,9 horas. Abril fue el mes con menor número de horas de brillo solar para este año. La mayor variación se dio en julio (35,1 horas/mes), siendo mayor en 2005, seguido de febrero (34,1 horas/mes), cuando el mayor brillo se dio en 2004 (figura 3.15).

En los registros de la variación interanual las horas totales de brillo solar al año son mayores que la media multianual tanto para 2004 como para 2005, considerándose años cálidos. Excedieron la media multianual en aproximadamente 58 horas/año (figura 3.11).

Figura 3.15. Marcha anual del brillo solar, 2004-2005



Consideraciones finales

Precipitación

Los valores de precipitación más altos se presentan en abril y mayo, con 107 mm y 100,7 mm respectivamente, y en octubre y noviembre, con 111,3 mm y 93,1 mm respectivamente. Se presentó un tipo de distribución bimodal-tetraestacional, con épocas secas en diciembre hasta febrero y en junio hasta agosto. Los meses más húmedos fueron abril y octubre y el más seco enero.

Cuando se analizó la variación interanual en series largas (cuarenta años aproximadamente) se detectó cierto patrón asociado a los fenómenos de El Niño y de La Niña. En 1991, 1992, 1996 y 1997 El Niño se acentuó. En los dos primeros se registraron temperaturas medias superiores a los 14 °C y en los dos últimos se dieron variaciones de, aproximadamente, 1 °C de un año al otro. La Niña aparece levemente en 1984, 1986, 1988, 1990 y 1995. Los años 1999, 2006, 2008 y 2010 fueron excepcionalmente húmedos, por lo que se consideran típicos del fenómeno de La Niña; los dos últimos pasaron los 1200 mm de lluvia anual.

El periodo 1972-1980 se considera seco. Los años 1977, 1978 y 1980 son típicos de El Niño. En 1979 se intensificaron las lluvias debido a La Niña. El periodo 1981-1990 se considera de años húmedos. En 1985 y 1989 disminuyeron las lluvias debido a El Niño. En 1990 por el contrario aumentaron por un nuevo fenómeno de

La Niña. Para 1991-2000 los años tendieron a ser secos. En 1992 y 1997 se agudizó El Niño. En 1999 se dio un nuevo La Niña. Finalmente en el periodo 2001-2010, el efecto de El Niño se observó claramente en 2001, además, hubo un subperiodo muy húmedo de 2006 a 2010 debido a la agudización de La Niña.

Temperatura

La serie histórica de 1972 a 2010 registró valores promedio de temperatura máxima igual a 21,5 °C, de media de 13,6 °C y mínima de 2,5 °C.

Las altas temperaturas se asocian con El Niño en los periodos de 1982-1993, 1996-1997 y 2001-2003, que superaron los 14 °C en 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. En 2009 y 2010 se presentó una anomalía de los datos debido a que en un periodo típico del fenómeno de La Niña se registraron temperaturas superiores a los 14 °C.

Se consideran periodos fríos de 1972 a 1980 y de 1981 a 1990. Las altas temperaturas, por encima de la media multianual, se asocian con el fenómeno de El Niño (1980, 1982, 1983 y 1987). Se consideran cálidos los periodos 1991-2000 y 2001-2010; en ellos el efecto de El Niño se ve claramente en 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. Las bajas temperaturas registradas en 2008 se asocian a la agudización de La Niña.

Humedad relativa

La humedad relativa registró un valor de 80 %, siendo 83 % el más alto en noviembre y 77 % el más bajo en julio y agosto. Según la variación interanual, el año con mayor humedad relativa fue 2008, con un promedio de 85,8 %, asociado con un fenómeno de La Niña intenso. El año con menor valor de humedad relativa fue 1992, con un promedio de 75,8 %, y relacionado con un año típico de El Niño.

La variación interanual mostró que en el periodo 1972-1980, 1980 es típico de El Niño, cuando las altas temperaturas y la disminución de las precipitaciones hacen que la humedad que retiene el aire descienda. El periodo 1981-1990 se consideró húmedo. El año 1990, aunque típico de La Niña, presentó menos humedad en el aire debido a las altas temperaturas registradas.

Un periodo seco fue 1991-2000. La baja humedad relativa de 1992 y 1998 se asocian a la agudización de El Niño. El periodo 2001-2010 está altamente influenciado por La Niña. El incremento en la humedad es considerable en 2005, 2006, 2007 y 2008, debido a que en este subperiodo se generó un descenso de la temperatura y un aumento significativo de las precipitaciones.

Balance hídrico

La clasificación climática según Thornthwaite para esta estación es $B_1RB'_1$, clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco.

Brillo solar

El brillo solar obtuvo un monto anual de 133,2 h. m., con su mayor expresión en enero (184,9 h. m.). El año con mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas anuales; el de menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348 horas anuales.

En la serie histórica de 39 años (1972-2010) se tiene que el primer periodo, 1972-1980, es considerado cálido; 1975 presentó el menor dato del periodo, y corresponde al año con menores temperaturas y mayor humedad relativa; el máximo valor lo obtuvo 1980, el cual presenta la mayor temperatura y la menor humedad relativa del periodo especificado y se considera un año típico del fenómeno de El Niño. El periodo 1981-1990 también se consideró cálido. El meteoro de 1985 está asociado a El Niño. En el periodo 1991-2000 se presentó El Niño más extremo de la serie histórica de datos. El año 1992 obtuvo la menor humedad relativa, la más baja precipitación y temperaturas mayores a los 14 °C. En el periodo 2001-2010 se presentó la agudización del fenómeno de La Niña.

Periodos serie histórica

1972-1980

En este periodo la precipitación anual fue de 790,5 mm, la temperatura media promedio fue de 13,1 °C, la humedad relativa tuvo un valor de 80,4 % y el brillo solar fue 134,5 horas/mes. Los meses más lluviosos fueron marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre, siendo octubre el de mayores precipitaciones (111,9 mm). Los más cálidos fueron marzo, abril y mayo, con una temperatura de 13,6 °C. La mayor humedad relativa se concentró en abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Los meses con mayor número de horas de exposición al brillo solar fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre (tabla 3.3). El año típico de La Niña fue 1975 debido a su alta precipitación (864,3 mm), baja temperatura (12,7 °C), alta humedad relativa (82,3 %) y pocas horas de brillo solar (1348,3 horas/año). El año típico de El Niño fue 1980, con una precipitación anual de 598,1 mm, temperatura media de 13,6 °C, humedad relativa de 79,4 % y brillo solar de 1911,9 horas/año.

1981-1990

En este periodo la precipitación anual fue 842,9 mm, la temperatura media 13,5 °C, la humedad relativa 80,6 % y el brillo solar promedio 139,3 horas/mes. Las épocas de mayor expresión de los parámetros climatológicos fueron para la precipitación en abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre; la mayor concentración de lluvias fue en abril con 129,6 mm. Para la temperatura, mayo fue el mes más cálido con 14 °C; para la humedad relativa marzo a mayo y de octubre a diciembre, y para el brillo solar los subperiodos de diciembre-marzo y julio-agosto (tabla 3.3). El año 1984 fue típico del fenómeno de La Niña, con precipitaciones de 929,8 mm anuales, temperatura media anual de 13 °C, humedad relativa anual de 82,6 % y brillo solar de 1612 horas/año. El año 1987 fue típico de El Niño debido a su baja precipitación (750,5 mm), alta temperatura (13,9 °C), baja humedad relativa (79,7 %) y alta exposición al brillo solar (1733,3 horas/año). El año 1990 es atípico debido a que alcanzó una precipitación anual igual a 948,2 mm, pero su temperatura fue alta, 13,8 °C, su humedad relativa descendió hasta 78 % y las horas de brillo solar fueron de tan solo 1587,9 horas/año.

1991-2000

Este periodo presentó la precipitación más baja con 757,1 mm al año, al igual que la más baja humedad relativa con 79 %; el brillo solar disminuyó, a diferencia de los dos periodos anteriores, hasta 131,4 horas/mes, pero su temperatura media anual aumentó hasta los 13,8 °C. Los meses de mayor precipitación fueron de marzo a mayo y de septiembre a noviembre; el mayor fue mayo con 95,4 mm. Los meses más cálidos fueron abril y junio con una temperatura que alcanzó los 14,3 °C. La humedad relativa se concentró en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. El brillo solar alcanzó su mayor expresión en el subperiodo de diciembre-marzo y en agosto (tabla 3.3). En 1992 se tuvieron los registros más intensos de El Niño, con una precipitación que disminuyó hasta los 434,7 mm anuales, un descenso de la humedad relativa hasta el 75,8 %, y una temperatura promedio que ascendió a los 14,3 °C, lo que aumentó las horas de brillo solar hasta 1735,2 horas/año. El año 1999 fue típico de La Niña, con una precipitación igual a 1027,1 mm, temperatura media de 13,6 °C, humedad relativa de 79,8 % y brillo solar de 1444,7 horas/año.

2001-2010

Este presentó el mayor monto anual de precipitaciones de los cuatro periodos evaluados, siendo igual a 924,6 mm; la temperatura media ascendió hasta

13,8 °C, la humedad relativa también registró el valor más alto de los cuatro periodos, 80,9 %, y el brillo solar promedio fue el más bajo de todos, con tan solo 127,5 horas/mes. Las mayores precipitaciones se concentraron en marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo la más alta octubre (125,4 mm). La máxima temperatura se registró en mayo (14,2 °C). La humedad relativa se concentró entre marzo y mayo y de octubre a diciembre. Para el brillo solar se diferencian dos épocas de mayor expresión del parámetro: diciembre-marzo y julio-septiembre (tabla 3.3).

Un año típico del fenómeno de El Niño fue 2001, debido a su baja precipitación (579,8 mm), alta temperatura (13,8 °C), baja humedad relativa (79,8 %) y alta exposición al brillo solar (1605,8 horas/año).

Tabla 3.3. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado

Periodos	Meses												Promedio
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1972 - 1980													
P. media (mm)			⋮	⋮	⋮				⋮	¥	⋮		790,5
T °C media			Σ	Σ	Σ								13,1
h. r. (%)				=	=					=	=	=	80,4
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐				☐					☐	134,5
1981 - 1990													
P. media (mm)				¥	⋮				⋮	⋮	⋮		842,9
T °C media					Σ								13,5
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	80,6
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐				☐	☐				☐	139,3
1991 - 2000													
P. media (mm)			⋮	⋮	¥				⋮	⋮	⋮		757,1
T °C media				Σ		Σ							13,8
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	79,0
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐					☐				☐	131,4
2001 - 2010													
P. media (mm)			⋮	⋮	⋮					¥	⋮		924,6
T °C media					Σ								13,8
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	80,9
Brillo solar (h/m)	☐	☐					☐	☐	☐			☐	127,5

⋮:~ Meses de mayor precipitación.

¥: Mes con la más alta precipitación.

Σ: Mes con temperatura máxima.

=: Meses de mayor humedad relativa.

☐: Meses de mayor exposición al brillo solar.

Los últimos años de este periodo están fuertemente influenciados por La Niña: en 2008 hubo valores extremos, con precipitación igual a 1206,8 mm anuales, temperatura promedio igual a 13,2 °C, humedad relativa anual de 85,8 % y horas de brillo solar igual a 1403,3 horas/año. En 2010 se alcanzó el monto más alto de precipitación de la serie histórica, 1250,5 mm anuales; se registró el segundo valor más alto de la temperatura multianual, 14,4 °C; la humedad relativa fue de 80,6 % y el brillo solar fue de 1606,7 horas/año.

Comparación entre 2004 y 2005

Año 2004

Este año presentó un monto anual de precipitación igual a 962,1 mm. Las mayores precipitaciones fueron en febrero, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo el más extremo abril con 197,7 mm. La temperatura media anual fue de 13,5 °C. El mes que registró la máxima temperatura fue marzo con 14,1 °C. La humedad relativa fue igual a 80,3 %. Las épocas de mayor concentración fueron abril-mayo y septiembre-diciembre. El brillo solar promedio fue de 129,7 horas/mes. La mayor exposición se dio de enero a marzo y en diciembre (tabla 3.4).

Año 2005

La precipitación promedio anual fue de 845 mm. Los meses de mayor concentración de lluvias fueron abril, mayo, septiembre, octubre y diciembre, con el máximo valor en mayo, 161,3 mm. La temperatura media fue de 13,7 °C. El registro más extremo se obtuvo en abril (14,4 °C). La humedad relativa anual fue igual a 81,6 %. Se definieron dos épocas de mayor humedad relativa, febrero-mayo y octubre-diciembre. El brillo solar fue de 129,7 horas/mes. Los meses de mayor expresión de este parámetro fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre (tabla 3.4).

Tabla 3.4. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos para 2004 y 2005, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado

Periodos	Meses												Promedio
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2004													
P. media (mm)		⋮		¥	⋮					⋮	⋮		962,1
T °C media			Σ										13,5
h. r. (%)				=	=				=	=	=	=	80,3
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐									☐	129,7
2005													
P. media (mm)				⋮	¥				⋮	⋮		⋮	845
T °C media				Σ									13,7
h. r. (%)		=	=	=	=					=	=	=	81,6
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐				☐					☐	129,7

⋮: Meses de mayor precipitación.

¥: Mes con la más alta precipitación.

Σ: Mes con temperatura máxima.

=: Meses de mayor humedad relativa.

☐: Meses de mayor exposición al brillo solar.

Modelación de los procesos hidrológicos del humedal Jaboque

Resumen

Se propone un modelo de simulación dinámico para explicar los procesos hidrológicos del humedal Jaboque, en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo incluye los flujos de entrada y salida de agua para cada una de las secciones del humedal. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales. Se utilizó el método Euler de integración con el programa computacional Stella 9.1[®]. El comportamiento hidrológico del humedal tiene una alta dependencia de los aportes de la cuenca aferente, que a su vez obedecen fundamentalmente a las condiciones climáticas de la cuenca. En 1992 la precipitación fue 432,7 mm/año con una descarga de agua estimada de la cuenca aferente de 905,225 m³/año, el valor más bajo en los últimos 39 años, y en 2010 la precipitación anual fue de 1250,5 mm, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/año, los valores más altos para el mismo periodo. La comparación entre los flujos de entrada y salida del humedal Jaboque muestran una diferencia bruta de 82 165 m³/mes para un total anual de 985 980 m³/año.

La modelación hidrológica se hizo en las tres secciones, el tiempo hidráulico de retención modelado (THR) se estimó en 15 para la primera sección, y 36 y 42 días/año para la segunda y tercera secciones. El tiempo hidráulico de retención del agua promedio en el humedal fue de 93 días/año, y en las condiciones actuales el humedal recambia su volumen cuatro veces al año, reconfirmando el papel amortiguador que tienen todas las secciones y en especial la segunda y la tercera, al recibir y atenuar el impacto de las crecientes de la cuenca aferente sobre todo el conjunto del humedal. El análisis de sensibilidad del modelo corroboró la relación entre la precipitación y los factores morfométricos del humedal. La modelación entre las entradas y salidas de agua reproduce de manera parcial la descarga al río Bogotá, pero también reconfirma el papel amortiguador que tienen todas sus secciones.

Introducción

La hidrología es un referente muy importante en los estudios sobre humedales naturales o artificiales. Las condiciones hidrológicas pueden modificar o cambiar directamente las propiedades físicas y químicas del agua como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes y los tiempos hidráulicos de retención (Wetzel, 2001; Håkanson, 2005; Jørgensen, 2008). El estudio de los procesos hidrológicos en humedales naturales y artificiales ha permitido desarrollar propuestas exitosas para la creación y restauración de este tipo de sistemas (Mitsch y Day, 2004; Zhang y Mitsch, 2005). La modelación y simulación de los procesos hidrológicos ayuda en la comprensión de los procesos bióticos, de los ciclos geoquímicos, de los ciclos de nutrientes, de la dinámica de la vegetación y del comportamiento trófico (Bradley y Gilvear, 2000; Hupp, 2000; Quinn y Hanna, 2003; Spieles y Mitsch, 2003).

El hidroperiodo afecta el nivel de agua en un humedal y es considerado el factor dominante en el control de la composición florística de la comunidades de plantas acuáticas (Duever *et al.*, 1988). Cuando las condiciones hidrológicas en un humedal cambian ligeramente, la biota puede responder con cambios en la riqueza de especies y en la productividad del ecosistema (Mitsch *et al.*, 2009). Se han planteado varios métodos para determinar la influencia del agua sobre un humedal. Los más reconocidos consideran el hidroperiodo como un descriptor de inundabilidad teniendo en cuenta la cantidad de agua que ingresa al sistema y la forma como se inunda (Nutter y Brinson, 1994; Brinson, 2004). Fundamentalmente el hidroperiodo está conformado por la intensidad de la inundación (altura del nivel del agua en el humedal), el tiempo de duración (tiempo que permanece cubierto de agua), la frecuencia (número de veces que el sistema se inunda) y la estacionalidad (en qué momento del año se produce la inundación). Muchas veces es importante considerar también la variación interanual del hidroperiodo. El hidroperiodo, entonces, define el patrón estacional del nivel del agua en un humedal.

Es bien conocido el consenso de que la hidrología de un humedal, entendida como una variable independiente, influye y permite explicar los ciclos geoquímicos y de nutrientes, sin embargo en muchos proyectos de restauración y conservación de humedales no se aplican estos conocimientos (Mitsch y Gosselink, 2000). En varios casos se utilizan técnicas de drenaje inadecuadas para restaurar humedales; estas alteran el hidroperiodo y como consecuencia se presentan inundaciones cortas e inesperadas, que dificultan el anclaje o fijación de macrófitas o la emigración de macroinvertebrados y vertebrados. También disminuye la biodiversidad y hay pérdida de la funciones del humedal. En todos los casos las alteraciones ambienta-

les y sociales son significativas, como en las intervenciones en humedales urbanos (Zhang y Mitsch, 2005).

Estructura del modelo de simulación dinámica

A partir del análisis de balance de masas se estimaron los flujos de entrada y salida del humedal (tablas 4.1 y 4.2) y se determinó la estructura de un modelo dinámico de simulación para estimar su comportamiento hidrológico mensual (Mitsch y Gosselink, 2000; Zhang y Mitsch, 2005; Acreman *et al.*, 2007) Las ecuaciones se ajustaron de la siguiente manera:

$$dv/dt = f_{ent}(t) - f_{sal}(t) \quad (1)$$

$$f_{ent}(t) = P(t) + Si(t) \quad (2)$$

$$f_{sal}(t) = So(t) + Et(t) \quad (3)$$

Donde:

dv/dt = Tasa de cambio del volumen agua, si $dv/dt = 0$

$f_{ent}(t)$ = Entradas

$f_{sal}(t)$ = Salidas

$Si(t)$ = Flujo mensual promedio

$P(t)$ = Precipitación media mensual

$So(t)$ = Flujo promedio salida

$Et(t)$ = Evapotranspiración mensual

Entradas

El flujo de entrada al humedal se calculó a partir de los aportes de la cuenca afluente (m^3/mes) que se recogen por medio de los canales de Los Ángeles y Carmelo. Estos transportan el flujo de agua hacia el interior del humedal. Para los flujos de entrada de cada una de las secciones se tuvo en cuenta el promedio mensual de precipitación efectiva (p. e.-mm) sobre cada sección, más el flujo proveniente de cada sección.

Precipitación (P) mensual: Los datos de precipitación media mensual fueron tomados de la estación hidrometeorológica. Eldorado (Ideam) entre enero de 1972 y diciembre de 2010, y fueron utilizados para elaborar la caracterización climática de la zona del humedal y para alimentar el modelo de simulación.

Tabla 4.1. Variables utilizadas en el modelo. Flujos de entrada y salida de agua del humedal Jaboque

Nombre	Origen de entradas	Unidades	Dirección salidas	Unidades
Sección 1	Cuenca aferente área Precipitación efectiva sección 1	km ² mm/mes/m ²	Entrega a la sección 2 Evapotranspiración, área sección 1	m ³ /mes mm/mes/m ²
Sección 2	Flujo sección 1 a sección 2 Precipitación efectiva sección 2	m ³ /mes mm/mes/m ²	Flujo de sección 2 a sección 3 Evapotranspiración, área sección 2	m ³ /mes mm/mes/m ²
Sección 3	Flujo sección 2 a sección 3 Precipitación efectiva sección 3	m ³ /mes mm/mes/m ²	Flujo salida río Bogotá Evapotranspiración, área sección 3	m ³ /mes mm/mes/m ²

Salidas

Para la predicción de las pérdidas de agua por evapotranspiración para cada sección del humedal se utilizó la relación planteada por Kadlec (1990, 1994) y Werner y Kadlec (1996), la cual se basa en la determinación de las tendencias de evapotranspiración para sistemas de tratamiento en humedales, entendiendo que la evapotranspiración real (ET) es el volumen de agua que realmente sale del sistema en una unidad de tiempo, dependiendo de que exista suficiente agua disponible para evaporar.

$$Et = K_e \cdot ETF \cdot SA \quad (4)$$

K_e : Constante de evapotranspiración mm/mes

ETF : Factor de corrección

SA : Superficie de la sección (m²)

Supuestos del modelo

El modelo tiene los siguientes supuestos con el fin de delimitar su alcance y posterior generalización o aplicación:

- En cada una de las secciones del humedal se toma su profundidad media.
- El flujo de agua al humedal proviene básicamente de la descarga de la cuenca aferente y de la precipitación efectiva en cada una de las secciones.

- La descarga de la cuenca aferente se calculó con base en la relación existente entre precipitación y área en kilómetros cuadrados de la cuenca aferente (Håkanson y Petres, 1995).
- No se tienen en cuenta los planos de desborde del humedal, debido a la construcción de canales perimetrales en los dos primeros tercios y las obras de infraestructura (terraplenes) en el tercio bajo, calle 64, costado sur y terraplén con ciclovía, jarillón río Bogotá, barreras artificiales que impiden la inundación, generando un sistema hidrológico de volumen controlado.
- Todas las simulaciones se hicieron teniendo en cuenta los promedios mensuales y anuales de datos climatológicos entre 1972 y 2010.
- Dadas las condiciones arcillosas en el sustrato de la zona (Van der Hamen, 1995; Muñoz y Jaramillo, 2005), se considera que la infiltración es mínima y que no existen flujos de aguas subterráneas hacia el cuerpo de agua del humedal.

Tabla 4.2. Variables del modelo, unidades y fuentes

Humedal Jaboque	Variables e índices	Valores/unidades	Fuente
Sección 1	Aporte cuenca aferente (Canales Los Ángeles más Carmelo) = Flujo de entrada	m ³ /mes	Cálculo a partir de datos del Ideam Estimación
	Precipitación efectiva (área de sección)	mm/mes	Ideam
	Evapotranspiración (ET-Sec 1)	mm/mes	Ideam
	Profundidad	m /mes	Datos de campo U. Nacional, Adessa/ simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	Días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
	Salida a sección 2	m ³ /mes	Simulación

Humedal Jaboque	Variables e índices	Valores/unidades	Fuente
Sección 2	Flujo entrada sección 1	Promedio m ³ /año	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Ideam
	Evapotranspiración (ET-Sección 2)	mm/mes	Ideam
	Profundidad sección 2	m /mes	Datos de campo U. Nacional – Adessa/ simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	Días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
	Salida a sección 3	m ³ /mes	Simulación
Sección 3	Flujo entrada sección 2	m ³ /mes	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Ideam
	Evapotranspiración (ET-sección 3)	mm/mes	Ideam
	Profundidad	m /mes	Datos de campo U. Nacional – Adessa / simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	Días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
	Salida a río Bogotá	m ³ /mes	Simulación

El modelo de simulación hidrológica

El modelo se elaboró para determinar el comportamiento hidrológico (Wu y Marceau, 2002) del humedal en condiciones climáticas normales. Sin embargo es posible manipular cada una de las variables a criterio del investigador para establecer qué podría suceder en épocas de sequía o de grandes precipitaciones, o si se disminuye el área del vaso de cada sección con relación al tiempo hidráulico de retención. Estas operaciones permiten verificar la sensibilidad del modelo. Se trata de obtener respuestas de las variables considerando los cambios inducidos en factores claves o variables (Wetzel, 2001; Fisher y Acreman, 2004; Scheffer y Nes, 2007).

El tiempo hidráulico de retención es considerado como uno de los factores críticos para explicar la retención de nutrientes en humedales (Knight, 2000; Werner y

Kadlec, 2000). Es importante porque aumenta la cantidad de tiempo para la transformación, adsorción y absorción de nutrientes en el humedal. El tiempo de residencia hidráulica se define como la medida del tiempo de retención de un volumen de agua en un humedal antes de salir del sistema (Werner y Kadlec, 2000). El TRH se encuentra determinado por dos factores fundamentales, la hidrología (la distribución temporal de las entradas y salidas) y el sistema hidráulico, es decir, los patrones de flujo que se desarrollan en la cuenca durante un evento (Tuttle *et al.*, 2008).

El THR sirve para explicar los ciclos biogeoquímicos en sistemas acuáticos al establecer una relación dependiente entre los procesos físicos de transporte y de mezcla. Estos procesos permiten determinar la ubicación espacial de las sustancias disueltas y suspendidas en un determinado instante de tiempo (Werner y Kadlec, 2000). El aumento del TRH promueve el asentamiento de sedimentos, que constituyen un importante vector para el fósforo y otros elementos. En la construcción de humedales para tratamiento de aguas residuales el THR es una de las variables principales utilizadas para determinar el diseño de un humedal artificial. El THR puede calcularse de acuerdo con los lineamientos de Almendinger (1999), Håkanson (1999) y Werner y Kadlec (1996).

$$THR = V = \frac{L * W * D}{Q * T^{-1}} \quad (5)$$

Donde

V = Volumen de la sección

T = Duración del flujo

L = Longitud del humedal

W = Ancho promedio

D = Profundidad promedio

Q = Caudal que ingresa a la sección

A partir de esta ecuación se simplifica el procedimiento y de acuerdo con Håkanson y Boulion (2002), Håkanson (2004) y Zhang y Mitsch (2005), el THR se puede calcular a partir de:

$$THR = V / Q \quad (6)$$

Donde THR es el tiempo hidráulico de retención (días/año), V es el volumen de agua (m^3), y Q es el caudal promedio anual ($m^3/año$) en términos de entradas y salidas del sistema.

Método de simulación

Las simulaciones se hicieron usando Stella 9.1[®], *software* que ha sido utilizado para elaborar modelos hidrológicos y ecológicos (Duever *et al.*, 1988; Mancera *et al.*, 2003; Zhang y Mitsch, 2005; Håkanson, 2005) entre otros. Se utilizó el sistema de interfaz de Stella, para simular cambios mensuales y condiciones extremas de mayor inundación y menor precipitación. De igual manera, para analizar la sensibilidad del modelo se relacionó la precipitación con las variables dependientes como volumen, THR y profundidad.

Con el fin de verificar el carácter determinístico y validar el modelo, se hicieron regresiones simples lineales (Legendre y Legendre, 1998), para comparar los datos calculados con los resultados modelados. Asimismo, con el fin de evaluar su fortaleza, se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007) y para comprobar su carácter predictivo se hizo el análisis de sensibilidad (Jørgensen y Bendoricchio 2001; Håkanson, 2004).

Submodelo de descarga de la cuenca aferente del humedal de Jaboque

Para predecir los aportes de agua provenientes de la cuenca aferente del humedal se ajustó el submodelo de descarga (Håkanson y Peters, 1995). Se calcularon las descargas medias mensuales (Q) que llegan al humedal Jaboque a través de los canales Carmelo y Los Ángeles, para lo cual se tuvieron en cuenta las siguientes variables: Área de la cuenca aferente, 5,8 km², y escorrentía igual a 0,01 m³/km^{2s}, calculados para la elaboración de los estudios técnicos para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque (Universidad Javeriana, 2007) y precipitación media anual (P), a partir de los datos de precipitación de la Estación Eldorado 1979-2010, del Ideam.

$$Q = ADA * (P/817.7) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 \quad (7)$$

$$Q = 5.8 \text{ Km}^2 (P/817.7) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 \quad (8)$$

Donde:

Q : Caudal cuenca aferente m³/mes (tabla 4.3)

ADA : Área de la cuenca aferente

P : Precipitación media anual

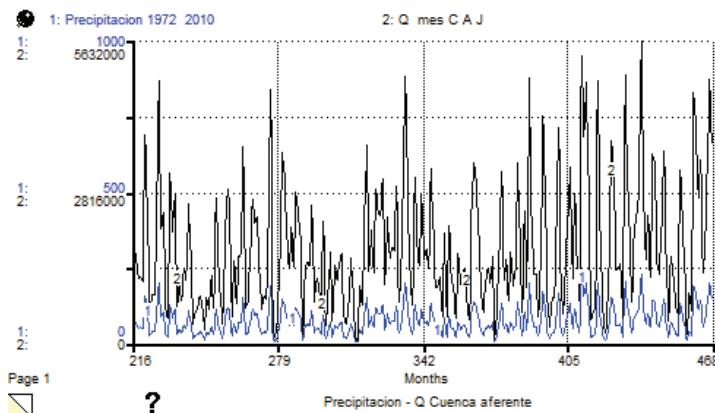
Resultados

El modelo permite simular las fluctuaciones de volumen del humedal con relación a los flujos de entrada y de salida, provenientes de la cuenca aferente y la precipitación efectiva para cada una de las secciones. Este muestra que el hidroperiodo tiene una alta dependencia de los aportes de la cuenca aferente, que a su vez dependen fundamentalmente de las condiciones climáticas de la zona. Hay dos incrementos fuertes, uno entre abril y mayo y otro entre octubre y noviembre. Los descensos se presentan entre diciembre y enero y julio y agosto, típico de la zona alto andina en Colombia. De igual manera se determinó y simuló el tiempo hidráulico de retención para cada sección. El análisis de sensibilidad del modelo demostró una fuerte relación entre la precipitación y los THR y entre el volumen de cada sección y el THR.

Descarga de la cuenca aferente

La descarga de la cuenca aferente del humedal (Q : m^3/mes), se asimila al patrón pluviométrico de la zona (figura 4.1 y tabla 4.3), donde se muestra la relación entre la magnitud de las descargas en m^3 y la precipitación en mm, entre los años 1990 y 2010. Se evidencia que las variaciones de la descarga de la cuenca aferente responden a la precipitación; los valores extremos de precipitación corresponden también a montos extremos en los caudales.

Figura 4.1. Estimación de la precipitación y la modelación de la descarga de la cuenca aferente, humedal Jaboque. Promedio multianual, 1990-2010



- 1: Precipitación en mm
- 2: Q cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m^3/mes

En los últimos 39 años se han presentado variaciones significativas en la precipitación, que obviamente afectan la descarga de la cuenca aferente al humedal. Los años con mayores precipitaciones fueron 1979, 1984, 1990, 1995, 1999, 2004, 2006, 2008 y 2010 cuando el promedio anual osciló entre 920 mm hasta 1250 mm, con descargas superiores entre 1 933 408 y 471 654 m³/año.

Los años con menores precipitaciones fueron 1977, 1978, 1980, 1985, 1989, 1996 y 2001 cuando el promedio anual osciló entre 598,1 mm y 683,3 mm con descargas que fluctuaron entre 1 206 273 y 1 432 008 m³/año.

El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828,86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m³/año, lo cual evidencia un alta variabilidad entre los valores extremos de esta y de la precipitación.

Variabilidad según valores extremos

Se puede inferir una alta influencia de los valores extremos; la menor precipitación anual se presentó en 1992 (432,7 mm/año) y correspondió con una descarga calculada de la cuenca aferente de 905 225 m³/año, que es el valor más bajo en los últimos 39 años, y el más alto, 1250,5 mm, se encontró en 2010, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/año. Estos valores afectan de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal y se modifica el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.*, 2008), que incide en sus procesos geoquímicos y biológicos. Una situación parecida se presenta actualmente en algunos lagos europeos y se asocia con fenómenos de cambio climático (Håkanson *et al.*, 2003).

En la figura 4.2 y la tabla 4.3 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación y la descarga de la cuenca aferente para 1992, año de máxima sequía, típico de El Niño. Se puede apreciar que la curva de la marcha de la precipitación coincide con la descarga a la cuenca aferente.

Predomina un largo periodo seco desde enero hasta la mitad de octubre cuando se incrementa súbitamente la precipitación a partir de este mes y hasta noviembre, lo cual obviamente se refleja en la descarga de la cuenca aferente.

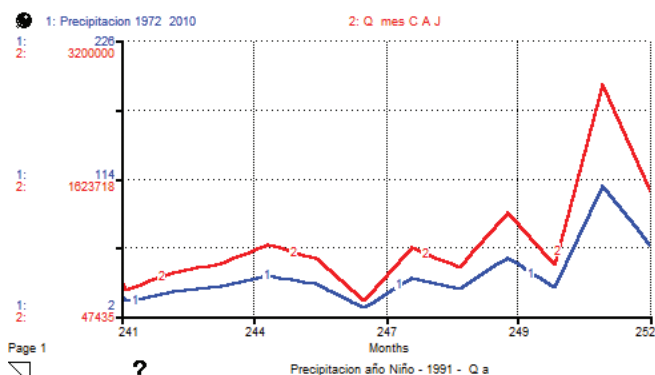
Tabla 4.3. Precipitación mensual y anual. Descarga anual estimada, 1979-2010

Mes Año	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec anual/mm	Descarga anual estimada m3/año
1972	72,1	21,9	57,2	159,4	118,1	58,1	36,7	39,6	17,4	71,6	101,1	28,5	781,7	1626.326,92
1973	2,9	3,8	50,1	39,3	75	59,5	55,1	57,4	130,3	115,4	105,8	117,3	811,9	1689.158,00
1974	79,6	100	28,5	83,8	61,3	65,5	15,8	46,8	91,8	100,3	150,6	24	848	1763.223,92
1975	5,5	32,2	130	57,9	105,3	56,4	60,3	52,2	55,1	160,8	70,7	77,9	864,3	1798.176,08
1976	31,2	59,9	118,3	122,1	104,4	58,9	17,4	34,7	47,3	140	81,6	49,5	865,3	1800.256,58
1977	9,1	20,4	72,2	86,4	34,1	15,9	52	52,9	115,7	120,4	82,3	26,9	688,3	1432.008,00
1978	5,6	25	55,7	121,4	73,5	71,2	52,9	12,9	66,4	102,9	47,4	30,2	665,1	1383.740,33
1979	27,5	44,8	55	137	84,5	77,5	64,8	114	86,3	133	142	25,4	991,7	2.063.231,83
1980	28,2	63,4	28,9	46	39,5	76,9	10,6	40,3	49,3	62,1	50,7	102	598,1	1.245.387,25
1981	2,5	27,3	13,7	174,6	202,1	78,1	23,7	34,4	51,1	113,4	111,8	25,5	858,2	1785.485,17
1982	78,5	43,3	86,2	218,1	81,1	15,9	12,8	21,4	14,2	112,7	63,6	44,6	792,4	1648.588,25
1983	6	18,4	124,4	207,3	120,4	50,3	45,7	34,9	29,3	77	43	132,6	889,3	1850.188,58
1984	99,6	55,2	65,7	140,1	118	90,5	35,5	73,4	74,9	50,4	86,3	40,2	929,8	1933.408,58
1985	2,8	5,1	28,3	31,4	118,4	25,3	44,6	95,9	157,9	79,8	73,8	34,7	698	1452.189,00
1986		112,2	61,2	96,5	74	95,6	36,2	38,3	56,9	217,5	122,3	4	914,7	1903.033,33
1987	42,8	32,2	25,7	95	113,2	13,8	91,2	25	69,5	148,7	64,2	29,2	750,5	1467.808,69
1988	13,8	50,5	12,2	143,9	58,7	68,5	46,9	73,2	119,1	117,9	151	78,8	934,5	1944.227,17
1989	11,7	41	154	32,9	53,8	48,2	39,1	34,9	84,8	82,1	30,7	66,2	679	1.412.659,50
1990	48,3	48,9	45,6	155,7	102,5	21,9	35,9	35,8	75,7	195,5	85	97,4	948,2	1972.730,00
1991	25,5	18,3	126,3	82,6	110	27,1	43,4	31	54,2	47,1	103,9	64,1	733,5	1526.046,83
1992	14	22,1	26,2	35	28,4	8,8	33,3	24,5	49,7	25,4	108	59	434,7	905.225,50
1993	34,7	13,8	78,6	114,2	106,3	19,7	60,6	29,2	63,8	67,5	146,9	25,5	760,8	1582.844,42
1994	30,6	65,6	107,1	89,4	94,2	55	24,4	34,5	32,6	93,9	189,1	9,3	825,7	1715.996,50
1995	3,4	20,7	68,1	142,3	126,2	81,1	55,1	86,7	56,6	112	97,3	78,4	927,9	1930.496,00
1996	6,5	53,3	60	57,5	102,5	30,6	47,7	43,6	28,7	90,6	12,6	34,7	568,3	1182.348,25
1997	67,3	16,1	58	46,4	59,7	66	18,8	14	25,1	63	38,1	2,7	475,2	988.653,67
1998	1,9	41,8	27,8	96,2	147,5	52,7	84,1	51,6	115,2	96,3	94,7	122,7	932,5	1940.066,25
1999	43,4	93,8	62,7	71,2	68,6	116,9	29,8	51,3	140,3	199,3	101,9	47,9	1027,1	2.136.881,50
2000	28,3	123,4	73,9	57,5	110,9	61,6	70,1	55,9	130,6	90,7	41,5	41,1	885,5	1842.282,75
2001	49,3	19,3	81,9	19,4	87	47,2	40,5	17,7	66,4	43,1	54,2	53,8	579,8	1206.273,83
2002	26,8	16,8	111,5	134,8	116,3	74,8	39,7	22,5	45,5	55,7	44	64,1	752,5	1565.576,33
2003	3	24,1	75,4	128	46,4	61,5	31,1	67,6	42,6	54,9	134,8	78,8	748,2	1556.630,17
2004	22	98,7	40,8	197,7	101,4	51,1	51,2	19,7	59	170	118,6	31,9	962,1	2.001.649,00
2005	11,1	33,2	33,7	93,6	161,3	36,6	21,4	66	97,8	131,3	47,8	111,2	845	1758.022,58
2006	58,1	31,7	215	154	195	115	16,5	22,7	25,1	196	91,1	30,2	1149,9	2.391.264,25
2007	7,6	10,9	62	150,6	125,4	54,2	56,1	58,9	18	200,6	117,4	82,9	944,6	1965.240,25
2008	30,5	84,6	93,8	113	226	120	61,5	94,7	48,8	141	134	60	1206,8	2.510.747,42
2009	51,4	91,4	142,8	55,2	15,7	64,1	53,2	28,4	21,5	129,1	95,1	58,4	806,3	1677.507,08
2010	6,3	36,6	23,2	187	160	108	137	51,8	76,4	133	197	135	1250,5	2.471.634,08
Promedio	28,668	44,15	71,31	107	100,7	58,97	44,93	45,89	66,43	111,3	93,12	57,09	828,8692	1718.646,51

1: Precipitación en mm

2: Q cuenca aferente, descarga en m3/mes

Figura 4.2. Modelación de la descarga de la cuenca aferente al humedal Jaboque, 1992 (año fenómeno de El Niño)

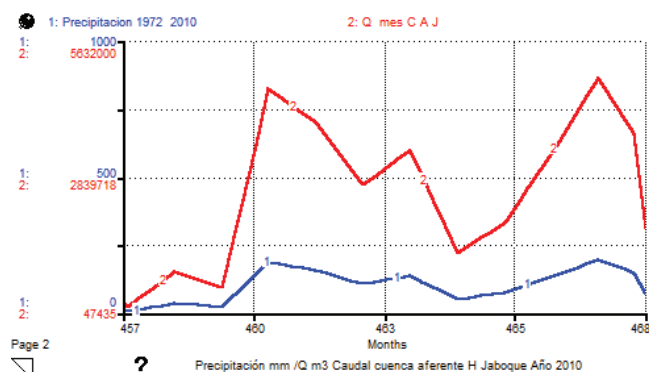


1: Precipitación en mm

2: Q cuenca aferente, descarga en m³/mes

En la figura 4.3 y la tabla 4.11 se muestran los resultados de la modelación de precipitación en milímetros y la descarga de la cuenca aferente para 2010, correspondiente al año de máxima precipitación por La Niña. Se puede apreciar que la curva de la marcha de la precipitación coincide con la descarga a la cuenca aferente durante diciembre, enero, febrero, marzo, agosto y septiembre, y las mayores descargas en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre.

Figura 4.3. Modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque, 2010 (año fenómeno de La Niña)



1: Precipitación en mm

2: Q cuenca aferente – descarga cuenca aferente en m³/mes

Comparando las curvas en ambas situaciones se puede apreciar que en un fenómeno de La Niña extremo la descarga aumenta aproximadamente 25 % con relación al promedio histórico, y 150 % respecto a El Niño. Es decir, el hidroperiodo se caracteriza por una alta variabilidad dependiendo de las condiciones climatológicas globales. Esta situación confirma que los fenómenos climáticos globales afectan fenómenos físicos locales de suma importancia como el hidroperiodo en el humedal, y tienen impacto en los procesos biogeoquímicos y biológicos (Håkanson *et al.*, 2003).

El comportamiento hidrológico, años 2004-2005

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Para establecer la relación entre las variables moderadoras independientes y las de estado del modelo, se desarrollaron las respectivas ecuaciones (anexo B1). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones del volumen (m^3) de agua del humedal en sus tres secciones, con relación a los flujos de entrada, y en especial al proveniente de los canales Los Ángeles y Carmelo que recogen las aguas de sus respectivas cuencas aferentes en la sección 1 (figura 4.4), y los derivados de la precipitación efectiva (mm) para cada una de sus secciones, durante el periodo comprendido entre 2004 y 2005, para un total de 24 meses. Se determinó el THR para cada una de las secciones y de igual manera se estableció para la totalidad del humedal Jaboque.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

En parte el volumen del tercio alto depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente, porque las estructuras que recogen el flujo proveniente de los canales Carmelo y Los Ángeles, se encuentran encauzadas por estructuras perimetrales que dirigen los excesos de flujo hacia la parte media del humedal.

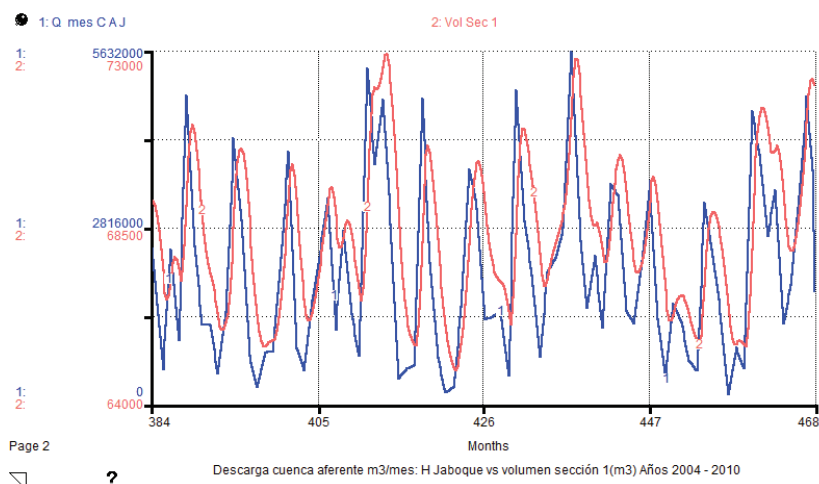
En la figura 4.4 y las tablas 4.9 y 4.11 se muestran los resultados de la simulación entre la descarga de la cuenca aferente y el volumen de la sección 1 para 2004 y 2005. En 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril ($66\,137\text{ m}^3$), mayo ($70\,643\text{ m}^3$), octubre ($72\,447\text{ m}^3$) y noviembre ($67\,643\text{ m}^3$), que corresponden a los meses con mayores precipitaciones. Los de menor almacenamiento de agua fueron enero ($50\,300\text{ m}^3$), febrero ($53\,976\text{ m}^3$) y diciembre ($61\,500\text{ m}^3$), que tuvieron menores valores en precipitación. En 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril ($66\,400\text{ m}^3$), mayo ($74\,643\text{ m}^3$), octubre ($71\,888\text{ m}^3$) y noviembre ($70\,500\text{ m}^3$), cuando se presentaron las mayores precipitaciones. Los

meses con menor almacenamiento de agua fueron enero ($58\,300\text{ m}^3$), febrero ($62\,551\text{ m}^3$) y agosto ($59\,200\text{ m}^3$), en los que hubo menores valores en precipitación.

Se puede observar que las dos curvas representan el hidroperiodo en la sección 1, y se distinguen desfases entre las dos, tanto en los picos como en los valles, esto se debe en principio a la influencia que tiene el tiempo hidráulico de retención en el volumen de la sección.

Una comparación entre el conjunto de datos estimados y simulados, mediante un análisis de regresión entre los dos grupos, encontró una buena correspondencia, $r^2 = 0,704$; $y = 0,8692x + 23033$ (figura 4.5, tablas 4.9 y 4.11).

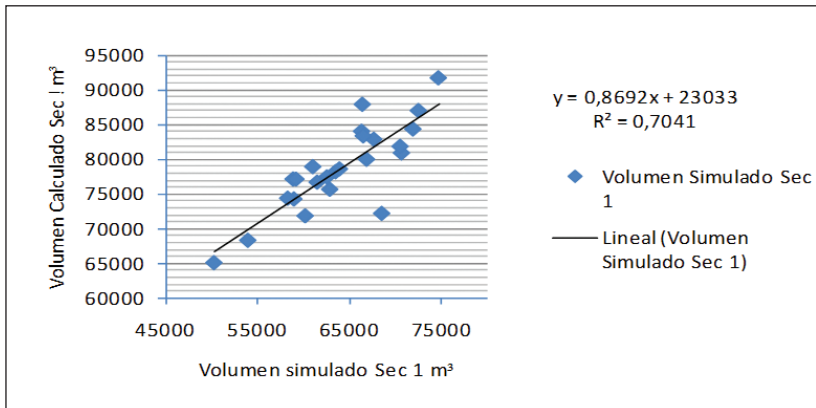
Figura 4.4. Descarga cuenca aferente Jaboque frente a volumen sec. 1, 2004-2005



1: Q Cuenca aferente, descarga en m^3/mes

2: Vol. sección 1, variación mensual del volumen sección 1 en m^3/mes

Existe una diferencia entre los valores estimados y observados, que podría deberse en parte a las alteraciones morfométricas que ha sufrido esta sección, y en especial a la construcción de los canales perimetrales y de las materas centrales, que originaron una morfometría compleja en ella. Se logra que las variaciones de volumen sean poco apreciables, de acuerdo con el propósito de eliminar el riesgo por inundación sobre las áreas aledañas. Las diferencias entre el caudal y el volumen de esta sección se deben en parte al THR de 15 días promedio, que es suficiente para el tratamiento de aguas residuales según Zhang y Mitsch (2005).

Figura 4.5. Relación volumen calculado sec. 1 frente a volumen simulado sec. 1

Sección 2, zona de transición (tercio medio)

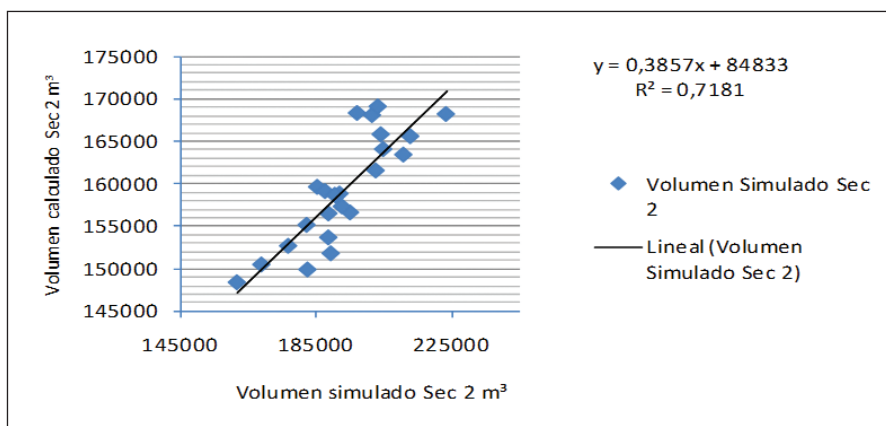
Esta sección en comparación con el tercio alto se diferencia porque se encuentra medianamente intervenida por obras civiles y recibe agua por escurrimiento y a través de pequeñas aberturas localizadas en los camellones que la delimitan.

En 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (204 071 m³), mayo (197 066 m³), octubre (210 747 m³) y noviembre (201 478 m³), que corresponden a los de mayores precipitaciones. Los que tuvieron menor almacenamiento de agua fueron enero (161 556 m³), febrero (198 801 m³), agosto (176 705 m³) y diciembre (187 598 m³), con menores valores en precipitación. En 2005 los de mayor almacenamiento fueron abril (212 779 m³), mayo (223 328 m³), septiembre (191 882 m³), octubre (204 788 m³) y noviembre (203 130 m³), que corresponden a los meses con mayores precipitaciones. Los de menor almacenamiento de agua fueron enero (182 411 m³), febrero (189 295 m³), agosto (188 581 m³) y diciembre (190 496 m³), meses con menores valores en precipitación.

En la descarga proveniente del tercio alto, las variaciones del volumen son perceptibles, con algunas inundaciones en los barrios de invasión (Adessa, 2004), sin embargo su intensidad se ha visto reducida en el flanco sur debido a la construcción de un canal interceptor que recoge las aguas de escorrentía provenientes del costado sur del humedal. Comparados los grupos de datos referentes al volumen estimado y al volumen simulado se encontró una correlación aceptable, con un nivel de correspondencia de $r^2 = 0,7181$; $y = 0,3857x + 84833$ (figura 4.6 y tablas 4.9 y 4.11).

Las variaciones entre el volumen calculado y el simulado en esta sección se pueden deber en parte a las discontinuidades batimétricas producto de la construcción de jarillones posiblemente de origen precolombino (Van der Hammen, 2003; Muñoz, 2004), patrón que se replicó en el tercio bajo, ocasionando múltiples puntos de acumulación y transporte de sedimentos (Håkanson y Peters, 1995), lo cual dificulta establecer una relación 1:1 entre profundidad y volumen. Al igual que el tercio alto, el volumen de agua de la sección depende en gran medida de los aportes de la precipitación y de la cuenca aferente, que son transportados desde el tercio alto.

Figura 4.6. Relación volumen calculado sec. 2 frente a volumen simulado sec. 2



Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

Esta sección, a diferencia de las dos primeras, es la de mayor extensión del sistema con 315 308,4 m², y con un volumen de agua de 230 175 m³ (Izquierdo, 2005). Muestra capacidad para almacenar agua y amortiguar crecientes en épocas de altas descargas.

En 2004 el mayor almacenamiento de agua ocurrió en abril (245 155 m³), mayo (236 697 m³), junio (222 476 m³) octubre (253 216 m³) y noviembre (242 024 m³), que corresponden a los meses con mayores precipitaciones. Los de menor almacenamiento fueron enero (193 820 m³), febrero (202 537 m³) y agosto (212 111 m³), meses con menores valores en precipitación. En 2005 el mayor almacenamiento fue en abril (255 669 m³), mayo (265 992 m³); octubre (246 020 m³) y noviembre (239 621 m³), los meses con mayores precipitaciones. Los de menor almacenamiento fueron enero (219 001 m³), febrero (227 314 m³), agosto (226 451 m³) y diciembre (223 067 m³), meses con menores valores en precipitación.

Al igual que en las secciones anteriores, se encontró una buena correspondencia entre los valores calculados y simulados con una correspondencias de $r^2 = 0,7125$; $y = 0,4627x + 84609$ (figura 4.7 y tablas 4.9 y 4.11). Persiste una diferencia del 29 % entre los valores calculados y simulados que obedecen a las complejas condiciones morfométricas, producto de una batimetría irregular coadyuvada por la construcción de diques y jarillones especialmente.

Error relativo

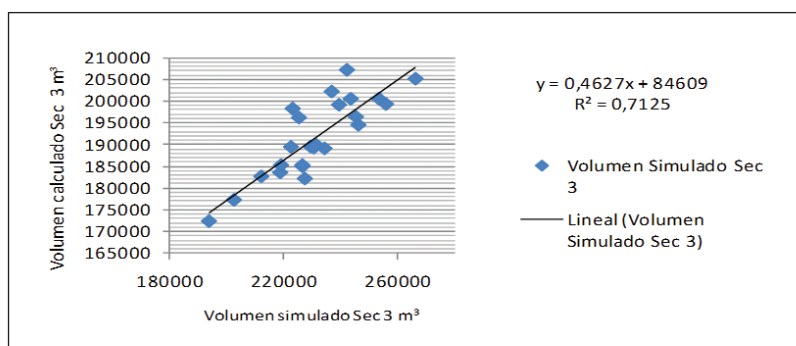
Con el fin de verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007) en cada una de las secciones, para lo cual se compararon los promedios de los valores de los volúmenes calculados para cada sección y los valores de volumen simulados. Los resultados anteriores permiten reafirmar la bondad del carácter predictivo del modelo, sin embargo es importante señalar que aunque el valor promedio de la desviación estándar del error relativo es cercano a cero (tablas 4.4 y 4.10), en la primera sección puede existir una tendencia a la sobrestimación de las predicciones y en la segunda y tercera una subestimación, debido probablemente a las complejas condiciones morfométricas de estas.

Descarga al río Bogotá

El volumen total de agua del humedal que se descarga hacia el río Bogotá sucede en tres salidas o desfuegos, dos localizados en la parte occidental del tercio alto, en el jarillón que separa el humedal del río Bogotá, y otro construido en el margen norte de esta misma sección y que forma parte del jarillón-ciclo vía, que aísla el humedal de su antigua área natural de desborde. En épocas de altas precipitaciones la descarga se aumenta, controlándose así las posibles inundaciones en este tercio. Una comparación entre los flujos de entrada y salida del humedal Jaboque (figura 4.8 y tabla 4.11) muestran una diferencia bruta de 82 165 m³/mes para un total anual de 985 980 m³/año, con lo cual el promedio del THR es de 93 días/año, es decir que el humedal, en las condiciones actuales recambia su volumen cuatro veces al año. Las diferencias entre el patrón del volumen con relación a los flujos de entrada se explican por el THR de la sección.

Tabla 4.4. Comparación del error relativo entre las secciones del humedal de Jaboque

Humedal Jaboque	Vol. sección 1	Vol. sección 2	Vol. sección 3
Error relativo	0,23	- 0,17	- 0,17
Desviación estándar	0,06	0,04	0,03
r ²	0,704	0,718	0,713

Figura 4.7. Relación volumen calculado sec. 3 frente a volumen simulado sec. 3

En la figura 4.8 y en la tabla 4.11 se muestran los resultados de la modelación de la descarga de la cuenca aferente, de la descarga al río Bogotá, y del volumen de la tercera sección. Nótese que existe coincidencia entre el patrón de picos y valles de cada curva tanto para los meses de mayores precipitaciones como para los más secos. También se puede apreciar que no hay coincidencia temporal entre la curva de descarga de la cuenca aferente y el volumen de la tercera sección y la descarga al río Bogotá, originada especialmente por el THR.

Tiempo hidráulico de retención

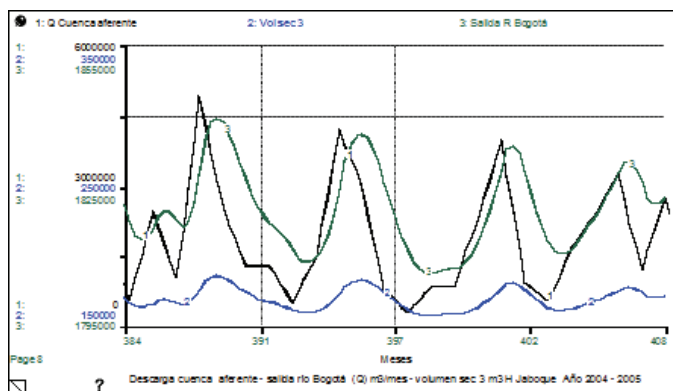
Cada sección tiene un tiempo hidráulico de retención diferente, debido principalmente a las características morfométricas: volumen, área, profundidad de la cubeta, patrón irregular del fondo, y diques artificiales de origen precolombino y de la Colonia. El THR mensual promedio del primer tercio corresponde a 15 días, tiempo sugerido óptimo para tratamiento de aguas residuales municipales; para la sección intermedia el promedio es de 36 días/año, y en el tercer tercio de 42 días (figura 4.9

y tabla 4.11), cifras que superan los valores mínimos recomendados para épocas de verano según Zhang y Mitsch (2005), en lagunas facultativas de tratamiento de aguas residuales. En principio este resultado demuestra la capacidad depuradora de cada una de las secciones, desde la perspectiva del THR. Debido a la influencia del hidropereodo en el THR se modelaron dos periodos extremos de precipitación, uno seco correspondiente al fenómeno de El Niño (año 1992) y uno de máximas precipitaciones, fenómeno de La Niña (año 2010).

Modelación del THR en condiciones del fenómeno de El Niño

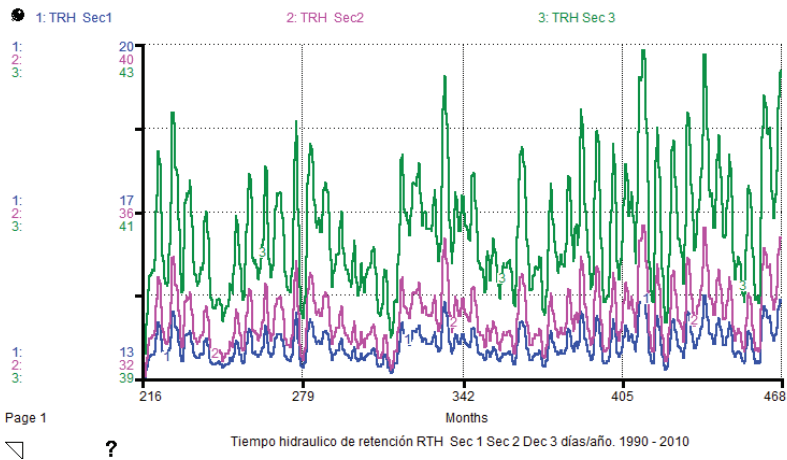
En la figura 4.10 y en la tabla 4.5 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación y del THR en las tres secciones en 1992. El THR correspondiente a una precipitación mínima de 8,8 mm fue de 108 días/año para la primera sección, y de 265 días/año y 314 días/año para la segunda y la tercera.

Figura 4.8. Descarga río Bogotá, descarga cuenca aferente



- 1: Q Cuenca aferente, descarga en m³/mes
- 2: Salida río Bogotá en m³/mes
- 3: Volumen sec. 3 m³

Figura 4.9. Modelación del THR, 1990-2010



- 1: THR sec. 1, días-año
- 2: THR sec. 2, días-año
- 3: THR sec. 3 días-año

Indicando que a menores precipitaciones el THR aumenta, y disminuye cuando estas son mayores, con precipitaciones de 108,8 mm en diciembre en la primera sección el THR fue de 9 días/año, de 22 en la segunda y 27 en la tercera. Es muy notorio que las dos últimas secciones logran mantener la función depuradora. Los resultados de la desviación estándar reflejan una tendencia hacia una alta variabilidad, por lo que es importante señalar que este comportamiento corresponde a un año atípico, como el fenómeno de El Niño de 1992.

Tabla 4.5. Resultados de la modelación del THR, 1992

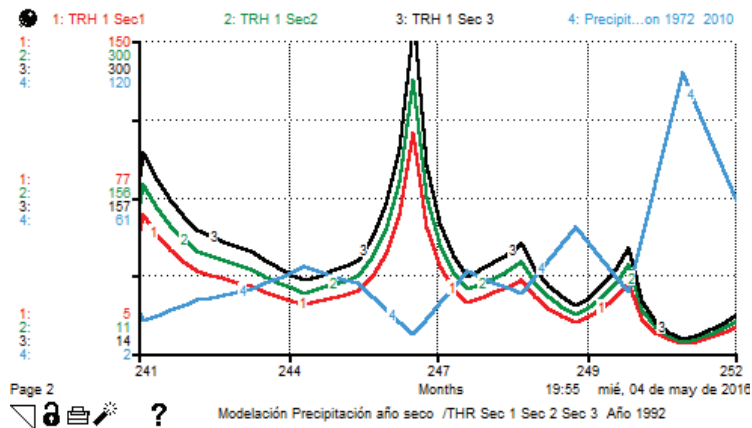
Meses	Precipitación promedio mensual en mm	Sección 1 THR días/año	Sección 2 THR días/año	Sección 3 THR días/año
Enero	14	69	169	199
Febrero	22,1	43	107	127
Marzo	26,2	36	90	108
Abril	35	27	68	81
Mayo	28,4	34	83	99
Junio	8,8	108	265	314
Julio	33,3	29	71	85

Meses	Precipitación promedio mensual en mm	Sección 1 THR días/año	Sección 2 THR días/año	Sección 3 THR días/año
Agosto	24,5	39	96	115
Septiembre	49,7	19	48	57
Octubre	25,4	38	93	111
Noviembre	108,3	9	22	27
Diciembre	59,4	17	41	49
Promedio multianual	36	39	96	114
Desviación estándar	26,60	26,56	64,94	76,52

Modelación del THR en condiciones del fenómeno de La Niña

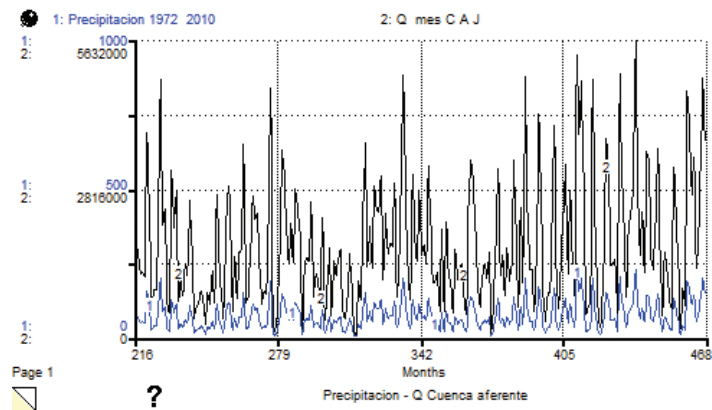
En la figura 4.11 y la tabla 4.6 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación y del THR en las tres secciones para 2010, año de La Niña.

Figura 4.10. Resultado de la modelación del THR, 1992



- 1: THR sec. 1, días-año
- 2: THR sec. 2, días-año
- 3: THR sec. 3, días-año
- 4: Precipitación mensual (mm)

Figura 4.11. Resultado de la modelación del THR, 2010, (fenómeno de La Niña)



- 1: THR sec. 1, días-año
- 2: THR sec. 2, días-año
- 3: THR sec. 3, días-año
- 4: Precipitación mensual (mm)

Tabla 4.6. Resultado de la modelación del THR, 2010

Meses	Precipitación	Sección 1 THR días/ año	Sección 2 THR días/ año	Sección 3 THR días/año
Enero	6,3	152	365	420
Febrero	36,6	26	65	77
Marzo	23,2	41	102	121
Abril	187,3	5	13	16
Mayo	160,3	7	16	19
Junio	107,8	10	24	28
Julio	136,7	8	19	22
Agosto	51,8	20	48	57
Septiembre	76,4	13	32	38
Octubre	132,9	8	19	22
Noviembre	196,6	5	13	16
Diciembre	72,1	15	36	42
Promedio	99	26	62	73

Meses	Precipitación	Sección 1 THR días/ año	Sección 2 THR días/ año	Sección 3 THR días/año
Desviación estándar	64,26	41,28	98,68	113,55

En enero y marzo, cuando las precipitaciones fluctuaron entre 6,3 mm y 23,2 mm, los tiempos hidráulicos de retención para la primera sección se estimaron entre 152 y 41 días/año, para la segunda 365 y 102 días/año, y para la tercera 420 y 121 días/año, y entre agosto y septiembre, cuando la precipitación se encontró entre 51,8 mm y 76,4 mm, en la primera sección el THR fluctuó entre 20 y 13 días/año, en la segunda 48 y 32 y en la tercera 38 y 22 días/año; los valores más altos.

En abril, mayo, junio y julio, meses de mayores precipitaciones, estas fluctuaron entre 187,3 mm y 136,7 días/año, los tiempos hidráulicos de retención para la primera sección se estimaron entre 5 y 8 días/año, para la segunda 13 y 24 días/año y para la tercera 16 y 22 días/año, y entre octubre y noviembre, cuando la precipitación se encontró entre 132,9 mm y 136,6 mm, en la primera sección el THR fluctuó entre 8 y 5 días/año, en la segunda 19 y 13 y en la tercera 22 y 16 días/año; los valores más bajos. Esto evidencia la disminución del THR, e indica un mayor transporte de agua en las cubetas del humedal como lo sugiere Jørgensen (2003), lo que hace posible el lavado de nutrientes.

Se puede concluir entonces que en condiciones extremas de variabilidad climática los tercios medio y bajo del humedal pueden desempeñar una función depuradora importante.

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad involucra la modelación y la simulación, y muestra la manera en que el cambio de una variable independiente como la precipitación afecta una variable dependiente como el THR. Se valida así el carácter predictivo de la modelación, mientras que las otras variables del modelo se mantienen constantes. Este tipo de análisis tiene un papel determinante en todos los tipos de modelación que han sido utilizados para predecir el comportamiento de sistemas lóticos y léticos (Jørgensen y Bendoricchio, 2001; Håkanson, 2004).

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de precipitación en la zona (P) en la cuenca aferente como variable independiente, y la descarga al río Bogotá (tabla 4.7) y el THR para las tres secciones como variables

dependientes. Para ambos casos las variaciones de valores de la precipitación se establecieron según clases entre 400 y 1300 mm/año, a partir de los valores extremos de la precipitación en la cuenca aferente, entre los años 1990 y 2010 (tabla 4.3).

Se puede observar (figura 4.12 y tabla 4.8) que en la medida en que aumenta la precipitación aumenta la descarga hacia el río Bogotá. Esto indica que el tercio bajo recibe el mayor impacto de la descarga de la cuenca aferente. Se corrobora así el supuesto de que en condiciones extremas de precipitación el humedal se convierte en el canal de paso de aguas lluvias, toda vez que el THR disminuye a medida que aumenta la velocidad de transporte de agua en la sección.

Tabla 4.7. Variables del análisis de sensibilidad precipitación/flujo salida río Bogotá

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Clases : Prec/mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Salida río Bogotá m ³ /mes	928614	1148444	1368274	1588105	1807935	2027765	2247595	2467426	2687256	2907086

Otro aspecto que se tuvo en cuenta para verificar la sensibilidad del modelo fue relacionar la precipitación con el THR para cada sección. Se encontró una disminución del THR en la medida en que aumenta el caudal de descarga. Esto significa que a medida que aumenta la descarga de la cuenca aferente los tiempos de retención disminuyen en cada sección (figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15; tabla 4.8), ya que aumenta el volumen de agua que se transporta entre cada una, con lo cual este se asemeja a un sistema de tratamiento de aguas residuales de volumen controlado. Sin embargo de continuar el proceso de desecación y colmatación se reduciría de manera significativa la capacidad de almacenaje de agua, especialmente de las dos primeras secciones, por lo cual se podría inferir que el THR disminuiría significativamente para las secciones 1 y 2 y probablemente se encontraría por debajo del valor mínimo recomendado según Zhang y Mitsch (2005) para el tratamiento de aguas residuales. Si el proceso persiste el tercio bajo recibirá el impacto de la descarga y degradará la zona más conservada del humedal.

La figura 4.13 muestra el resultado del análisis de sensibilidad para el tercio alto. Se aprecia que a medida que aumenta la precipitación, el THR disminuye, variando entre 30 días/año con una precipitación anual promedio de 400 mm y 9 días/año con una precipitación anual promedio de 1300 mm (tablas 4.8 y 4.12). Ello indica que en condiciones extremas de precipitación, esta sección no cumpliría con su función de depurar las aguas residuales, debido a que transporta un mayor caudal en menor tiempo y por lo tanto el THR es menor.

La figura 4.14 y las tablas 4.8 y 4.13 muestran el resultado del análisis de sensibilidad para el tercio medio. El THR varía entre 72 días/año a una precipitación anual promedio de 400 mm y 22 días/año a una precipitación anual promedio de 1300 mm. El resultado indica que variables morfométricas como profundidad, área de la cubeta y relación profundidad-área, inciden de manera notable en el THR.

Para el tercio bajo o zona conservada, el análisis mostró que se mantiene el patrón del THR con relación a la precipitación; varía entre 84 días/año con una precipitación anual promedio de 400 mm y 27 días/año con una precipitación anual promedio de 1300 mm (figura 4.15; tablas 4.8 y 4.14). Eso se debe a las condiciones morfométricas de estas secciones, como mayor área y profundidad promedio, que le permiten a esta sección recibir mayor volumen de agua y retenerla más tiempo, favoreciendo así su función depuradora.

Tabla 4.8. Variables del análisis de sensibilidad-precipitación, secciones 1, 2 y 3

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Clases en precipitación/ mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
THR sección 1: días/año	30	24	20	17	15	13	12	11	10	9
THR sección 2: días/año	72	58	48	41	36	32	29	27	24	22
THR sección 3: días/año	84	68	57	49	43	38	35	32	29	27

El análisis de sensibilidad reveló que la variabilidad entre valores mínimos de precipitación, por ejemplo los relacionados con el fenómeno de El Niño, muestra que a promedios de precipitación entre 400 mm/año y 600 mm/año, el THR oscila entre 30 y 20 días/año para la sección 1; 72 y 48 días/año para la sección 2 y para la sección 3 entre 84 y 57 días/año (tabla 4.8). A condiciones de alta precipitación, correspondientes al fenómenos de La Niña, entre 1200 mm/año y 1300 mm/año, el THR se reduce de manera significativa: para la primera sección se determinaron valores de THR 10 y 9 días/año, para la segunda de 24 y 22 días/año y para la tercera entre 29 y 27 días/año. Estos resultados concuerdan con las modelaciones del THR elaborados para un año de El Niño (1992) y uno de La Niña (2010), lo que comprueba el carácter predictivo del modelo.

Figura 4.12. Análisis sensibilidad precipitación, flujo salida río Bogotá

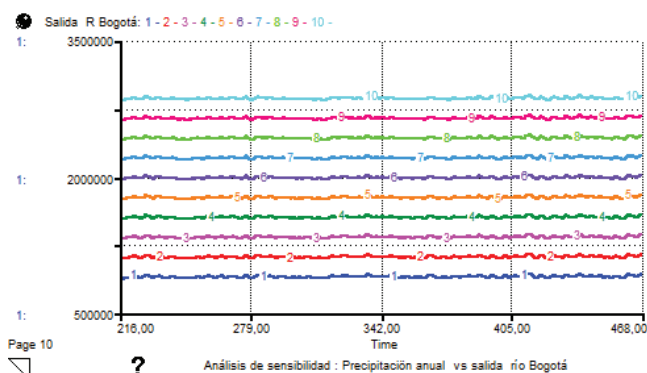
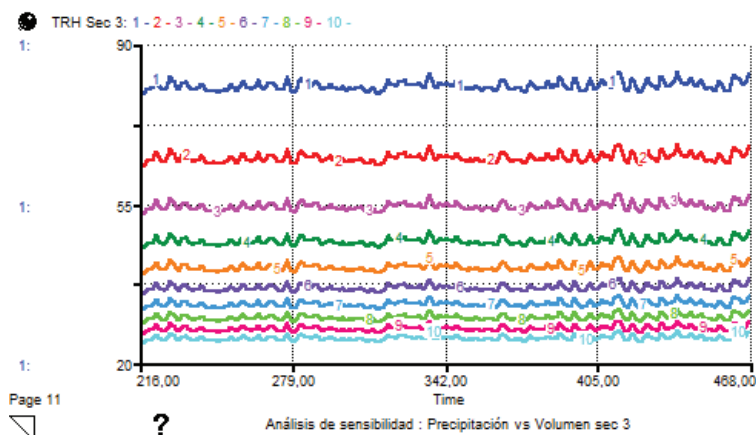


Figura 4.15. Análisis de sensibilidad precipitación frente a THR sección 3



La comparación entre los valores extremos se fijó entre límites de 800 y 900 mm/año, entre los cuales oscila el promedio multianual de la precipitación; el THR es de 15 y 13 días/año en la primera sección, en la segunda de 36 y 32 y la tercera entre 43 y 38. Se muestra que en condiciones cercanas al monto promedio de la precipitación, la función depuradora la asumirían las secciones dos y tres del humedal, pudiéndose considerar que esta situación sería la más apropiada. Sin embargo la variación entre los valores extremos no generan las mejores condiciones para la preservación de la función depuradora del humedal y en especial cuando aumenta de manera drástica la precipitación, que es cuando mayor cantidad de agua transporta y obviamente la tercera sección recibiría el mayor impacto de la descarga.

Discusión

Los resultados de la modelación hidrológica del humedal permiten inferir una fuerte relación entre las condiciones de precipitación de la cuenca aferente y los procesos hidrológicos de este; esa circunstancia se manifiesta en las tres secciones de manera distinta. La modelación permitió establecer una mayor comprensión sobre el hidroperiodo en el humedal y las relaciones existentes entre la descarga de la cuenca aferente, el volumen de cada sección y la descarga al río Bogotá, y sirvió para definir un patrón estacional del nivel del agua para cada sección.

Tabla 4.9. Valores estimados del volumen frente a valores simulados, 2004-2005

Años 2004-2005	Sección 1	Sección 1	Sección 2	Sección 2	Sección 3	Sección 3
	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado
Meses	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
Enero	50 300	65 059	161 556	148 454	193 820	172 315
Febrero	53 976	68 288	168 801	150 546	202 567	177 200
Marzo	58 891	77 117	188 610	156 550	226 486	184 933
Abril	66 317	84 009	204 071	165 846	245 155	196 308
Mayo	70 643	80 887	197 066	168 350	236 697	202 105
Junio	62 867	75 637	185 289	159 670	222 476	189 400
Julio	58 976	74 240	182 155	155 201	218 693	183 500
Agosto	60 200	71 811	176 705	152 736	212 111	182 600
Septiembre	63 500	78 176	190 985	158 585	229 354	189 446
Octubre	72 477	86 985	210 747	163 460	253 216	200 456
Noviembre	67 643	82 853	201 478	168 102	242 024	207 105
Diciembre	61 500	76 666	187 598	159 169	225 264	196 115
Enero	58 300	74 354	182 411	149 956	219 001	185 200
Febrero	62 551	77 423	189 295	151 858	227 314	182 102
Marzo	66 863	79 966	195 000	156 670	234 202	189 038
Abril	66 400	87 890	212 779	165 618	255 669	199 237
Mayo	74 643	91 701	223 328	168 230	265 992	205 060
Junio	66 500	83 344	202 580	161 592	243 355	200 446
Julio	61 024	78 900	192 609	157 373	231 315	189 829
Agosto	59 200	77 104	188 581	153 730	226 451	185 200

Años 2004-2005	Sección 1	Sección 1	Sección 2	Sección 2	Sección 3	Sección 3
	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado
Septiembre	63 918	78 576	191 882	158 878	230 437	189 200
Octubre	71 888	84 328	204 788	164 102	246 020	194 456
Noviembre	70 500	81 833	203 190	169 120	239 261	199 072
Diciembre	68 500	72 164	190 496	158 736	22 3067	198 200
Promedio	64 065,71	78 721,29	193 000,00	159 272,17	231 247,79	191 605,13
Desviación estándar	5974,42	6188,93	13 828,11	6294,06	16 425,67	9003,47

En los últimos 39 años el menor valor de la precipitación anual se presentó en 1992 (año de El Niño) y fue de 432,7 mm/año y con una descarga calculada de la cuenca aferente de 905 225 m³/mes, el valor más bajo en este periodo, y 1250,5 mm de precipitación anual, el más alto correspondiente a 2010 (año de La Niña), con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/mes. El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828,86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m³, lo cual evidencia una alta variabilidad entre la precipitación y la descarga de agua al humedal de Jaboque. Estos valores afectan de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal y modifica el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.*, 2008), que incide en sus procesos geoquímicos y biológicos, lo que podría asociarse a situaciones relacionadas con el cambio climático (Håkanson *et al.*, 2003).

La comparación entre los flujos de entrada y de salida del humedal muestran una diferencia bruta de 82 165 m³/mes para un total anual de 985 980 m³/año, con lo cual el promedio del THR es de 93 días/año, es decir, el humedal en las condiciones actuales recambia su volumen cuatro veces al año. La modelación entre las entradas y salidas de agua reproducen de manera parcial el aporte de aguas al río Bogotá, pero también reconfirma el papel amortiguador que tienen todas las secciones del humedal y en especial la segunda y la tercera, al recibir y atenuar el impacto de las crecientes de la cuenca aferente sobre todo el conjunto.

El volumen de agua en la primera sección depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente en el año 2004. Los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril con 66 317 m³, mayo con 70 643 m³, octubre con 72 477 m³ y noviembre con 67 643 m³ correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (50 300 m³), febrero (53 976 m³) y julio (58 976 m³). En 2005 el mayor almacenamiento de agua fue en abril (66 400 m³), mayo (74 643), octubre (71 888 m³) y noviembre (70

500 m³), los meses con mayores precipitaciones. El menor almacenamiento de agua ocurrió en enero (58 300 m³) y febrero (62 551 m³), meses con menores valores en precipitación. La comparación entre el conjunto de datos estimados y simulados permitió establecer una buena correspondencia $r^2 = 0,704$; $y = 0,8692x + 23033$.

En la sección 2 en 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (204 071 m³), mayo (19 706 666 m³), octubre (210 747 m³) y noviembre (201 478 m³), los de mayores precipitaciones. El menor almacenamiento ocurrió en enero (161 556 m³), febrero (198 801 m³), agosto (176 705 m³) y diciembre (187 598 m³), meses con menores precipitaciones. En 2005 el mayor almacenamiento fue en abril (212 779 m³), mayo (223 328 m³), octubre (204 788 m³) y noviembre (203 130 m³), meses con mayores precipitaciones. El menor almacenamiento tuvo lugar en enero (182 411 m³), febrero (189 295 m³), agosto (188 581 m³) y diciembre (190 496 m³), meses con menores valores en precipitación. Comparados los grupos de datos referentes al volumen estimado y al volumen simulado se encontró una correlación aceptable con un nivel de correspondencia de $r^2 = 0,7181$; $y = 0,3857x + 84833$.

En el tercio bajo del humedal en 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (245 155 m³), mayo (236 697 m³), junio (222 476 m³), octubre (253 216 m³) y noviembre (242 024 m³), los de mayores precipitaciones. El menor almacenamiento de agua ocurrió en enero (193 820 m³), febrero (202 537 m³) y agosto (212 111 m³), meses con menores valores en precipitación. En 2005 los meses con mayor almacenamiento fueron abril (255 669 m³), mayo (265 992 m³), octubre (246 020 m³) y noviembre (239 621 m³) los de mayores precipitaciones. El menor almacenamiento fue en enero (219 001 m³), febrero (227 314 m³), agosto (226 451 m³) y diciembre (223 067 m³), meses con menores valores en precipitación. Se encontró una buena correspondencia entre los valores calculados y simulados: $r^2 = 0,7125$; $y = 0,4627x + 84609$. Persiste una diferencia del 29 % entre los valores calculados y simulados, producto de las complejas condiciones morfométricas que obedecen a una batimetría irregular coadyuvada por la construcción de diques y jarillones especialmente.

De acuerdo con los resultados anteriores se concluye que en la primera sección o tercio alto del humedal, el volumen de agua depende fundamentalmente de la precipitación y la descarga de la cuenca aferente; en el tercio medio de los aportes de la descarga de cuenca aferente y la precipitación, y el tercio bajo recibe la descarga del tercio medio y amortigua las crecientes fuertes en las dos primeras secciones. Las condiciones climáticas de la zona se reflejan en el hidropериodo; el mayor volumen de agua de cada sección se presentó en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, con descensos en diciembre-enero y julio-agosto.

La comparación de los volúmenes de agua estimados y calculados para todas las secciones indica que es necesario disponer de datos de los parámetros morfométricos con mayor detalle, en especial los que hacen referencia a la batimetría del humedal, que es compleja y dinámica, debido a los procesos de colmatación. La fortaleza de predicción del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo cercano a cero de 0,23 para la primera sección y de -0,17 para la segunda y tercera. Esto sugiere la posibilidad de utilizar el modelo en estudios de caso similares, como los demás humedales localizados al menos en la jurisdicción de Bogotá D. C.

En 1992 (año de El Niño) la precipitación mensual promedio fue de 36 mm y el THR modelado fue de 39 días/año para la primera sección, de 64,9 días/año para la segunda y 76,5 días/año para la tercera.

En 2010 (año de El Niño) la precipitación mensual promedio fue de 99 mm y el THR modelado fue de 26 días/año para la primera sección, de 62 para la segunda y de 73 días/año para la tercera.

La modelación del THR permitió establecer una aproximación al rol hidrológico y ecológico de cada sección en el contexto del humedal, y de ello se infiere que la tercera sección cumple un función reguladora y quizá de estabilizador fisicoquímico y biológico. En las dos primeras secciones el THR estimado corresponde a 15 y 36 días/año, equivalente al mínimo recomendado para tratamientos primarios de aguas residuales de acuerdo con Zhang y Mitsch (2005). Esto confirma que el THR permite amortiguar el impacto de la contaminación difusa ocasionada por múltiples vertimientos ilegales en la cuenca aferente.

El análisis de sensibilidad muestra que a promedios de precipitación entre 400 y 600 mm/año, el THR oscila entre 30 y 20 días/año para la primera sección; 72 y 48 días/año para la segunda y entre 84 y 57 días/año para la tercera. A condiciones de altas precipitaciones, entre 1200 y 1300 mm/año, el THR se reduce de manera significativa: para la primera sección se determinaron valores de 10 y 9 días/año, para la segunda de 24 y 22 días/año y para la tercera entre 29 y 27 días/año. Estos resultados permitieron comparar situaciones de variabilidad climática extrema y su relación entre un año seco con fenómeno de El Niño y un año húmedo con fenómeno de La Niña, y se estableció que los tercios medio y bajo desempeñan un rol importante como depuradores, debido en parte a que estas secciones tienen mayor extensión y por supuesto una mayor capacidad de retención. Entre límites de 800 y 900 mm/año, valores entre los cuales oscila el promedio multianual de la precipitación, el THR es de 15 y 13 días/año en la primera sección, en la segunda de 36 y 32 días/año y en la tercera entre 43 y 38 días. En condiciones cercanas al monto promedio de la precipitación, la función depuradora la asumirían las secciones 2 y 3, situación que se puede considerar la más apropiada para el humedal.

Los resultados de la modelación indican que las variables de precipitación, caudal de la descarga de la cuenca aferente y al río Bogotá, por una parte, y las morfométricas, es decir, profundidad, área de la cubeta y volumen, por otra, permiten una aproximación a entender el THR, motivo por el cual estas variables se deberían tener en cuenta para futuras investigaciones relacionadas con medidas de restauración y conservación del humedal.

Tabla 4.10. Cálculo del error relativo para la tres secciones, 2004-2005

Meses	Sección 1	Sección 2	Sección 3
1	0,29	-0,08	-0,11
2	0,27	-0,11	-0,13
3	0,31	-0,17	-0,18
4	0,27	-0,19	-0,2
5	0,15	-0,15	-0,15
6	0,2	-0,14	-0,15
7	0,26	-0,15	-0,16
8	0,19	-0,14	-0,14
9	0,23	-0,17	-0,17
10	0,2	-0,22	-0,21
11	0,22	-0,17	-0,14
12	0,25	-0,15	-0,13
13	0,28	-0,18	-0,15
14	0,24	-0,2	-0,2
15	0,2	-0,2	-0,19
16	0,32	-0,22	-0,22
17	0,23	-0,25	-0,23
18	0,25	-0,2	-0,18
19	0,29	-0,18	-0,18
20	0,3	-0,18	-0,18
21	0,23	-0,17	-0,18
22	0,17	-0,2	-0,21
23	0,16	-0,17	-0,17
24	0,05	-0,17	-0,11
Error relativo	0,23	-0,17	-0,17
Desviación estándar	0,06	0,04	0,03
r ²	0,704	0,718	0,713

Tabla 4.11. Resultados de la modelación dinámica, variables: flujo cuenca aferente; vol. sec. 1, 2 y 3; salida al río Bogotá, THR para todas las secciones, 2004-2010

2004-2010 Meses	Promedio mensual precip.	Flujo cuenca aferente (m ³ / año)	Vol. Sección 1 m ³	Vol. Sec- ción 2 m ³	Vol. Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR Sec- ción 1 Días/año	THR Sección 2 Días/ año	THR Sec- ción 3 Días/año
1	99	1 267 337	67 106	166 148	199 364	1 284 765	10	25	29
2	41	1 922 070	67 499	167 031	200 430	1 943 077	24	59	70
3	198	2 487 550	69 071	170 557	204 688	2 508 418	5	13	15
4	101	4 034 194	70 952	174 777	209 783	4 072 020	10	25	30
5	51	2 060 631	68 933	170 247	204 314	2 097 683	20	48	57
6	51	1 276 699	67 354	166 705	200 037	1 301 602	19	47	56
7	20	983 348	66 348	164 449	197 313	1 001 275	49	120	142
8	59	859 767	66 074	163 834	196 570	871 835	16	40	48
9	170	2 512 204	68 514	169 307	203 179	2 528 206	6	15	17
10	119	3 763 000	70 534	173 841	208 653	3 796 699	9	21	25
11	32	2 149 261	68 813	169 979	203 990	2 185 618	31	76	90
12	11	60 1681	66 310	164 363	197 209	623 881	87	211	248

2004-2010 Meses	Promedio mensual precip.	Flujo cuenca afuerente (m ³ / año)	Vol. Sección 1 m ³	Vol. Sección 2 m ³	Vol. Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR Sección 1 Días/año	THR Sección 2 Días/año	THR Sección 3 Días/año
13	33	48 4028	65 485	162 512	194 974	49 4809	29	71	85
14	34	833 552	65 646	162 873	195 410	84 2714	28	70	84
15	94	1 402 153	66 672	165 176	198 190	1 413 073	10	26	31
16	161	2 970 642	69 210	170 870	205 066	2 991 629	6	15	18
17	37	2 859 543	69 269	171 002	205 225	2 893 937	28	67	79
18	21	771 449	66 708	165 257	198 288	796 057	45	111	132
19	66	951 829	66 333	164 415	197 271	965 620	15	36	43
20	98	1 945 476	67 562	167 172	200 601	1 961 794	10	25	30
21	131	2 755 310	69 087	170 592	204 731	2 779 713	8	19	23
22	48	2 496 288	68 849	170 060	204 087	2 528 031	21	51	61
23	111	1 786 941	68 234	168 679	202 420	1812 313	9	22	26
24	58	2 279 084	68 369	168 983	202 787	2 305 966	17	42	50
25	31	1 198 399	66 984	165 874	199 034	1 221 200	31	77	91
26	215	2 498 316	69 005	170 409	204 509	2 516 639	5	12	14
27	154	4 792 224	72 097	177 345	212 884	4 832 057	7	17	20

2004-2010 Meses	Promedio mensual precip.	Flujo cuenca aférente (m ³ / año)	Vol. Sección 1 m ³	Vol. Sección 2 m ³	Vol. Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR Sección 1 Días/año	THR Sección 2 Días/ año	THR Sección 3 Días/año
28	195	4 222 999	72 594	178 461	214 231	4 271 357	5	13	16
29	115	4 121 575	72 240	177 667	213 273	4 173 766	9	22	27
30	17	1 955 150	69 044	170 498	204 616	1 997 923	60	145	169
31	23	469 985	66 282	164 300	197 133	492 128	43	104	124
32	25	589 198	65 563	162 686	195 184	600 628	38	94	112
33	196	2 222 910	68 130	168 447	202 140	2 234 633	5	13	15
34	91	3 904 994	70 449	173 648	208 420	3 938 646	11	28	33
35	30	1 704 242	68 244	168 701	202 447	1 738 069	33	80	95
36	8	542 386	66 041	163 761	196 481	562 075	126	304	355
37	11	220 637	64 975	161 368	193 592	229 655	87	214	254
38	62	750 540	65 523	162 598	195 078	756 385	15	38	46
39	151	2 377 387	68 083	168 340	202 011	2 391 037	7	16	19
40	125	3 523 951	70 145	172 966	207 597	3 554 499	8	20	24
41	54	2 464 144	69 177	170 795	204 975	2 499 844	19	46	54
42	56	1 370 945	67 568	167 186	200 618	1 397 170	18	43	52
43	59	1 426 807	67 140	166 225	199 458	1 446 686	17	41	49
44	18	1 087 581	66 397	164 559	197 445	1 105 210	54	131	155
45	201	2 158 935	68 342	168 922	202 714	2 173 587	5	12	15
46	117	4 229 240	71 034	174 960	210 005	4 264 613	9	22	26

2004-2010 Meses	Promedio mensual precip.	Flujo cuenca aterente (m ³ / año)	Vol. Sección 1 m ³	Vol. Sec- ción 2 m ³	Vol. Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR Sec- ción 1 Días/año	THR Sección 2 Días/ año	THR Sec- ción 3 Días/año
47	83	2 608 011	69 771	172 128	206 585	2 647 212	12	30	36
48	31	1 579 100	67 881	167 887	201 464	1 609 534	32	79	94
49	85	1 267 961	67 174	166 302	199 550	1 287 565	12	29	34
50	94	2 198 256	68 112	168 406	202 090	2 219 382	11	26	31
51	113	2 520 630	68 889	170 149	204 195	2 546 630	9	22	26
52	226	3 873 787	71 310	175 581	210 754	3 906 447	5	11	14
53	120	4 638 995	72 475	178 193	213 908	4 688 438	9	22	26
54	62	2 440 427	69 921	172 465	206 992	2 485 275	17	40	48
55	95	1 846 236	68 563	169 418	203 313	1 876 748	11	26	31
56	49	1 934 553	68 015	168 187	201 826	1 961 320	20	50	59
57	141	2 078 732	68 464	169 196	203 044	2 101 309	7	18	21
58	134	3 451 862	70 222	173 139	207 806	3 483 343	8	19	22
59	60	2 655 758	69 460	171 429	205 741	2 692 564	17	41	49
60	51	1 417 445	67 691	167 460	200 949	1 445 190	19	47	56
61	91	1 657 742	67 615	167 291	200 744	1 678 329	11	27	32
62	143	2 763 112	69 169	170 777	204 954	2 787 434	7	17	21
63	55	2 745 012	69 210	170 869	205 065	2 778 121	18	45	53
64	16	1 008 314	66 946	165 790	198 931	1 034 034	62	151	177
65	64	84 5099	66 271	164 275	197 103	859 377	15	37	45
66	53	14 982 72	66 787	165 434	198 502	1 513 396	18	45	54

2004-2010 Meses	Promedio mensual precip.	Flujo cuenca aférente (m ³ / año)	Vol. Sección 1 m ³	Vol. Sección 2 m ³	Vol. Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR Sección 1 Días/año	THR Sección 2 Días/ año	THR Sección 3 Días/año
67	28	1 096 007	66 347	164 446	197 308	1 111 939	34	84	100
68	22	644 435	65 632	162 842	195 372	656 511	44	110	131
69	129	1 544 147	67 012	165 938	199 111	1 554 687	8	19	22
70	95	2 904 794	68 915	170 206	204 265	2 928 764	11	26	31
71	58	2 030 672	68 288	168 801	202 567	2 059 071	17	42	50
72	6	97 0241	66 562	164 929	197 893	992 293	152	364	419
73	37	44 0962	65 530	162 613	195 096	452 455	26	65	77
74	23	78 8301	65 554	162 668	195 162	797 725	41	102	121
75	187	2 115 556	67 958	168 061	201 674	2 126 949	5	13	16
76	160	4 423 351	71 355	175 682	210 876	4 456 884	6	16	19
77	108	3 510 532	71 078	175 059	210 124	3 554 841	10	24	28
78	137	2 961 904	70 473	173 703	208 487	3 001 490	8	18	22
79	52	2 617 997	69 454	171 416	205 725	2 655 876	20	48	57
80	76	1 523 550	67 938	168 016	201 620	1 551 075	13	32	38
81	133	2 436 370	68 831	170 019	204 038	24 60 658	8	19	22
82	197	3 914 357	71 199	175 330	210 452	3 947 830	5	13	16
83	72	4 327 856	72 140	177 443	213 002	4 374 844	15	35	42
84	22	1 330 064	65 719	163 038	195 609	1 336 090	44	108	128

Tabla 4.12. Análisis de sensibilidad: precipitación mm/año como variable independiente y THR días/año como variable dependiente, sección 1, 2004-2010

Clases Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004 -2010	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
1	26,57	21,26	17,72	15,18	13,29	11,81	10,63	9,66	8,86	8,18
2	27,73	22,2	18,51	15,87	13,89	12,35	11,12	10,11	9,26	8,55
3	27,55	22,05	18,38	15,76	13,8	12,26	11,04	10,04	9,2	8,49
4	28,43	22,77	18,99	16,29	14,26	12,68	11,41	10,38	9,51	8,78
5	29,64	23,75	19,82	17	14,89	13,24	11,92	10,84	9,94	9,18
6	29,84	23,92	19,96	17,12	14,99	13,33	12	10,92	10,01	9,24
7	29,71	23,81	19,87	17,04	14,92	13,27	11,95	10,87	9,96	9,2
8	28,5	22,82	19,03	16,32	14,29	12,71	11,44	10,4	9,54	8,8
9	27,44	21,97	18,31	15,7	13,74	12,21	10,99	10	9,16	8,46
10	27,17	21,74	18,12	15,54	13,6	12,09	10,88	9,89	9,07	8,37
11	28,15	22,54	18,8	16,12	14,11	12,54	11,29	10,27	9,41	8,69
12	29,03	23,26	19,4	16,64	14,57	12,96	11,66	10,61	9,72	8,98
13	28,19	22,58	18,83	16,14	14,13	12,56	11,31	10,28	9,43	8,7
14	27,35	21,89	18,25	15,64	13,69	12,17	10,96	9,96	9,13	8,43
15	26,94	21,56	17,97	15,4	13,48	11,98	10,78	9,8	8,99	8,3
16	27,15	21,73	18,11	15,53	13,59	12,08	10,87	9,88	9,06	8,36
17	28,13	22,53	18,78	16,11	14,1	12,53	11,28	10,26	9,41	8,68

Clases Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004 -2010	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
18	28,92	23,16	19,32	16,57	14,51	12,9	11,61	10,56	9,68	8,94
19	28,55	22,87	19,07	16,35	14,32	12,73	11,46	10,42	9,55	8,82
20	27,94	22,37	18,65	15,99	14	12,44	11,2	10,18	9,34	8,62
21	27,77	22,23	18,54	15,89	13,91	12,37	11,13	10,12	9,28	8,57
22	27,49	22	18,34	15,73	13,76	12,24	11,01	10,01	9,18	8,47
23	28,23	22,61	18,85	16,17	14,15	12,58	11,33	10,3	9,44	8,72
24	29,25	23,44	19,55	16,77	14,68	13,06	11,76	10,69	9,8	9,05
25	28,77	23,05	19,22	16,49	14,43	12,83	11,55	10,51	9,63	8,89
26	28,05	22,46	18,73	16,06	14,06	12,5	11,25	10,23	9,38	8,66
27	27,78	22,24	18,55	15,9	13,92	12,37	11,14	10,13	9,28	8,57
28	28,14	22,53	18,79	16,11	14,1	12,54	11,29	10,26	9,41	8,69
29	28,44	22,78	18,99	16,29	14,26	12,68	11,41	10,38	9,51	8,78
30	29,36	23,52	19,63	16,84	14,74	13,11	11,8	10,73	9,84	9,08
31	29,8	23,88	19,93	17,1	14,97	13,31	11,99	10,9	10	9,23
32	28,83	23,1	19,26	16,52	14,46	12,86	11,58	10,53	9,65	8,91
33	28,31	22,67	18,91	16,22	14,19	12,62	11,36	10,33	9,47	8,74
34	28,11	22,5	18,77	16,09	14,08	12,52	11,27	10,25	9,4	8,68
35	28,28	22,64	18,88	16,19	14,17	12,6	11,35	10,32	9,46	8,73
36	28,95	23,19	19,34	16,59	14,52	12,91	11,63	10,57	9,69	8,95

Clases Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004 -2010	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
37	28,66	22,95	19,14	16,42	14,37	12,78	11,5	10,46	9,59	8,85
38	27,98	22,4	18,68	16,02	14,02	12,47	11,22	10,2	9,35	8,63
39	27,95	22,38	18,66	16	14,01	12,45	11,21	10,19	9,34	8,63
40	28,55	22,86	19,07	16,35	14,31	12,73	11,46	10,42	9,55	8,82
41	28,56	22,88	19,08	16,36	14,32	12,74	11,46	10,42	9,56	8,82
42	27,7	22,17	18,49	15,85	13,87	12,33	11,1	10,09	9,25	8,54
43	27,44	21,96	18,31	15,7	13,74	12,21	10,99	9,99	9,16	8,46
44	27,64	22,12	18,44	15,81	13,84	12,3	11,08	10,07	9,23	8,52
45	27,47	21,99	18,33	15,71	13,75	12,23	11	10,01	9,17	8,47
46	27,19	21,76	18,14	15,55	13,61	12,1	10,89	9,9	9,08	8,38
47	27,72	22,19	18,5	15,86	13,88	12,34	11,11	10,1	9,26	8,55
48	28,45	22,78	19	16,29	14,26	12,68	11,42	10,38	9,52	8,79
49	28,21	22,59	18,84	16,15	14,14	12,57	11,32	10,29	9,43	8,71
50	27,55	22,05	18,38	15,76	13,8	12,26	11,04	10,04	9,2	8,49
51	27,16	21,73	18,11	15,53	13,59	12,08	10,87	9,89	9,06	8,37
52	27,16	21,74	18,12	15,53	13,59	12,08	10,88	9,89	9,07	8,37
53	28,08	22,49	18,75	16,08	14,07	12,51	11,26	10,24	9,39	8,67
54	29,37	23,54	19,64	16,85	14,75	13,12	11,81	10,74	9,85	9,09
55	29,27	23,45	19,57	16,78	14,69	13,07	11,76	10,7	9,81	9,06

Clases Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
56	29,04	23,27	19,41	16,65	14,57	12,96	11,67	10,61	9,73	8,98
57	28,65	22,95	19,14	16,42	14,37	12,78	11,5	10,46	9,59	8,85
58	28,08	22,48	18,75	16,07	14,07	12,51	11,26	10,24	9,39	8,67
59	28,42	22,76	18,98	16,28	14,25	12,67	11,4	10,37	9,51	8,78
60	29,32	23,49	19,60	16,81	14,72	13,09	11,78	10,72	9,82	9,07

Tabla 4.13. Análisis de sensibilidad: precipitación mm/año como variable independiente y THR días/año como variable dependiente, sección 2, 2004-2010

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
Meses										
1	66,09	52,87	44,06	37,77	33,05	29,37	26,44	24,03	22,03	20,34
2	68,14	54,64	45,6	39,12	34,26	30,47	27,44	24,95	22,88	21,13
3	67,83	54,36	45,36	38,91	34,07	30,3	27,28	24,81	22,75	21
4	69,37	55,69	46,52	39,94	34,99	31,14	28,04	25,51	23,4	21,61
5	71,46	57,5	48,1	41,34	36,25	32,28	29,09	26,47	24,29	22,43
6	71,8	57,79	48,36	41,57	36,46	32,46	29,26	26,63	24,43	22,57
7	71,58	57,6	48,19	41,42	36,32	32,34	29,15	26,52	24,34	22,48

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010 Meses	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
8	69,48	55,79	46,61	40,02	35,06	31,2	28,1	25,56	23,45	21,65
9	67,64	54,2	45,22	38,79	33,96	30,2	27,19	24,73	22,67	20,93
10	67,15	53,78	44,85	38,46	33,67	29,94	26,95	24,51	22,47	20,74
11	68,88	55,27	46,15	39,61	34,7	30,87	27,8	25,29	23,19	21,41
12	70,41	56,59	47,31	40,64	35,62	31,7	28,56	25,99	23,84	22,02
13	68,95	55,33	46,21	39,66	34,74	30,91	27,84	25,32	23,22	21,44
14	67,47	54,06	45,09	38,68	33,86	30,11	27,11	24,65	22,6	20,87
15	66,75	53,44	44,55	38,2	33,43	29,72	26,76	24,33	22,3	20,59
16	67,12	53,76	44,83	38,45	33,65	29,92	26,94	24,49	22,46	20,73
17	68,85	55,24	46,12	39,59	34,68	30,85	27,78	25,27	23,18	21,4
18	70,21	56,42	47,16	40,5	35,5	31,59	28,46	25,9	23,75	21,94
19	69,57	55,87	46,67	40,08	35,11	31,25	28,14	25,6	23,48	21,69
20	68,5	54,94	45,87	39,36	34,47	30,67	27,62	25,12	23,03	21,27
21	68,21	54,7	45,65	39,17	34,3	30,51	27,47	24,99	22,91	21,16
22	67,71	54,27	45,27	38,84	34,01	30,24	27,23	24,76	22,7	20,96
23	69,02	55,39	46,25	39,71	34,78	30,95	27,87	25,35	23,25	21,47
24	70,79	56,92	47,6	40,9	35,85	31,91	28,75	26,16	24	22,17
25	69,97	56,21	46,97	40,34	35,35	31,46	28,34	25,78	23,65	21,84
26	68,71	55,12	46,02	39,5	34,6	30,78	27,72	25,21	23,12	21,35

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010 Meses	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
27	68,24	54,72	45,67	39,19	34,32	30,52	27,49	25	22,92	21,17
28	68,87	55,26	46,14	39,6	34,69	30,86	27,79	25,28	23,19	21,41
29	69,38	55,7	46,53	39,95	35	31,14	28,05	25,52	23,4	21,61
30	70,97	57,08	47,73	41,02	35,96	32,01	28,84	26,25	24,08	22,24
31	71,73	57,73	48,31	41,53	36,42	32,43	29,22	26,6	24,4	22,54
32	70,06	56,29	47,04	40,41	35,41	31,51	28,39	25,83	23,69	21,88
33	69,17	55,52	46,37	39,8	34,87	31,02	27,94	25,42	23,31	21,53
34	68,8	55,2	46,09	39,56	34,65	30,83	27,76	25,25	23,16	21,38
35	69,1	55,46	46,32	39,76	34,83	30,99	27,91	25,39	23,28	21,5
36	70,26	56,46	47,19	40,54	35,53	31,62	28,49	25,92	23,78	21,96
37	69,76	56,03	46,81	40,2	35,23	31,35	28,24	25,69	23,56	21,76
38	68,58	55,01	45,93	39,42	34,52	30,71	27,66	25,15	23,07	21,3
39	68,53	54,97	45,89	39,38	34,49	30,68	27,63	25,13	23,05	21,28
40	69,57	55,86	46,67	40,07	35,11	31,24	28,14	25,6	23,48	21,69
41	69,6	55,89	46,69	40,09	35,13	31,26	28,16	25,61	23,49	21,7
42	68,08	54,58	45,55	39,08	34,23	30,44	27,41	24,93	22,86	21,11
43	67,63	54,19	45,21	38,78	33,95	30,2	27,19	24,72	22,67	20,93
44	67,98	54,49	45,47	39,01	34,16	30,38	27,36	24,88	22,81	21,06
45	67,68	54,24	45,25	38,82	33,99	30,22	27,21	24,75	22,69	20,95

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010 Meses	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
46	67,2	53,82	44,89	38,5	33,7	29,96	26,97	24,53	22,49	20,76
47	68,13	54,62	45,59	39,11	34,25	30,46	27,43	24,95	22,88	21,12
48	69,4	55,72	46,54	39,96	35,01	31,15	28,06	25,52	23,41	21,62
49	68,98	55,36	46,23	39,68	34,76	30,93	27,85	25,33	23,23	21,46
50	67,83	54,36	45,36	38,91	34,07	30,3	27,28	24,81	22,75	21
51	67,13	53,76	44,83	38,45	33,66	29,93	26,94	24,5	22,46	20,73
52	67,14	53,78	44,85	38,46	33,67	29,94	26,95	24,5	22,47	20,74
53	68,76	55,17	46,06	39,54	34,63	30,81	27,74	25,23	23,14	21,37
54	71	57,1	47,76	41,04	35,98	32,03	28,86	26,26	24,09	22,25
55	70,82	56,95	47,62	40,92	35,87	31,93	28,77	26,18	24,01	22,18
56	70,43	56,61	47,32	40,65	35,63	31,71	28,57	25,99	23,85	22,02
57	69,76	56,03	46,81	40,2	35,22	31,35	28,24	25,69	23,56	21,76
58	68,75	55,16	46,05	39,53	34,62	30,8	27,74	25,23	23,14	21,36
59	69,34	55,67	46,5	39,92	34,98	31,12	28,03	25,5	23,39	21,6
60	70,9	57,02	47,68	40,97	35,91	31,97	28,81	26,21	24,05	22,21

Tabla 4.14. Análisis de sensibilidad: precipitación mm/año
como variable independiente y THR días/año como variable dependiente, sección 3, 2004-2010

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
2004-2010 Meses										
1	79,28	63,43	52,86	45,3	39,64	35,24	31,71	28,83	26,43	24,39
2	81,02	65,08	54,38	46,7	40,92	36,41	32,8	29,84	27,37	25,28
3	80,75	64,82	54,14	46,48	40,72	36,23	32,63	29,68	27,23	25,14
4	82,05	66,06	55,28	47,53	41,69	37,12	33,46	30,45	27,94	25,81
5	83,76	67,71	56,82	48,95	42,99	38,33	34,58	31,49	28,92	26,73
6	84,04	67,98	57,07	49,18	43,2	38,52	34,76	31,66	29,08	26,88
7	83,86	67,8	56,91	49,03	43,06	38,4	34,64	31,55	28,97	26,78
8	82,14	66,15	55,37	47,61	41,76	37,19	33,52	30,51	27,99	25,86
9	80,59	64,67	54	46,35	40,6	36,12	32,53	29,59	27,14	25,06
10	80,18	64,28	53,64	46,02	40,3	35,84	32,27	29,35	26,91	24,85
11	81,64	65,66	54,92	47,2	41,38	36,84	33,19	30,21	27,71	25,6
12	82,91	66,88	56,05	48,24	42,34	37,72	34,01	30,97	28,43	26,27
13	81,7	65,72	54,98	47,25	41,43	36,88	33,23	30,24	27,75	25,63
14	80,46	64,54	53,88	46,24	40,5	36,03	32,45	29,51	27,06	24,99
15	79,84	63,96	53,34	45,75	40,05	35,61	32,06	29,15	26,73	24,68
16	80,16	64,26	53,62	46	40,28	35,83	32,26	29,34	26,9	24,84
17	81,61	65,64	54,9	47,18	41,36	36,82	33,18	30,19	27,7	25,59

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010 Meses	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
18	82,74	66,72	55,9	48,1	42,21	37,61	33,91	30,87	28,33	26,18
19	82,21	66,22	55,43	47,67	41,81	37,24	33,57	30,55	28,04	25,9
20	81,32	65,36	54,64	46,94	41,14	36,62	32,99	30,02	27,54	25,44
21	81,08	65,13	54,43	46,75	40,96	36,46	32,84	29,88	27,41	25,31
22	80,66	64,73	54,06	46,41	40,65	36,17	32,57	29,63	27,17	25,09
23	81,75	65,78	55,02	47,29	41,47	36,92	33,27	30,28	27,78	25,66
24	83,22	67,19	56,33	48,5	42,58	37,94	34,22	31,16	28,61	26,44
25	82,54	66,53	55,72	47,94	42,06	37,46	33,78	30,75	28,22	26,07
26	81,5	65,53	54,8	47,08	41,27	36,74	33,11	30,12	27,64	25,53
27	81,1	65,15	54,45	46,76	40,98	36,47	32,85	29,89	27,42	25,32
28	81,63	65,65	54,91	47,19	41,37	36,83	33,19	30,2	27,71	25,59
29	82,06	66,07	55,29	47,54	41,69	37,13	33,46	30,46	27,95	25,82
30	83,37	67,33	56,46	48,62	42,69	38,05	34,32	31,25	28,69	26,52
31	83,99	67,92	57,02	49,13	43,16	38,48	34,72	31,63	29,04	26,85
32	82,62	66,61	55,8	48	42,12	37,52	33,83	30,8	28,26	26,12
33	81,88	65,89	55,13	47,39	41,56	37	33,35	30,35	27,85	25,72
34	81,57	65,6	54,86	47,14	41,33	36,79	33,15	30,17	27,68	25,57
35	81,82	65,84	55,08	47,35	41,52	36,97	33,31	30,32	27,82	25,7
36	82,78	66,77	55,94	48,14	42,24	37,64	33,93	30,9	28,36	26,2

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable 2004-2010 Meses	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
37	82,37	66,37	55,57	47,8	41,93	37,35	33,67	30,65	28,12	25,98
38	81,39	65,43	54,7	47	41,2	36,67	33,04	30,06	27,58	25,47
39	81,35	65,39	54,67	46,96	41,16	36,64	33,01	30,04	27,55	25,45
40	82,21	66,21	55,43	47,67	41,81	37,23	33,56	30,55	28,03	25,9
41	82,23	66,24	55,45	47,68	41,83	37,25	33,58	30,56	28,05	25,91
42	80,97	65,03	54,33	46,66	40,88	36,38	32,77	29,81	27,35	25,25
43	80,59	64,67	54	46,35	40,6	36,12	32,53	29,59	27,13	25,06
44	80,88	64,94	54,25	46,59	40,82	36,32	32,71	29,76	27,3	25,21
45	80,63	64,71	54,03	46,38	40,63	36,15	32,56	29,61	27,16	25,08
46	80,22	64,32	53,68	46,05	40,33	35,87	32,3	29,37	26,94	24,87
47	81,01	65,07	54,37	46,69	40,91	36,41	32,79	29,84	27,37	25,27
48	82,07	66,08	55,3	47,55	41,7	37,14	33,47	30,47	27,95	25,83
49	81,72	65,75	55	47,27	41,44	36,9	33,25	30,26	27,76	25,64
50	80,75	64,82	54,14	46,48	40,72	36,23	32,63	29,69	27,23	25,14
51	80,16	64,26	53,62	46,01	40,29	35,83	32,26	29,34	26,9	24,84
52	80,18	64,27	53,64	46,02	40,3	35,84	32,27	29,35	26,91	24,85
53	81,54	65,57	54,83	47,12	41,31	36,77	33,13	30,15	27,66	25,55
54	83,39	67,35	56,49	48,64	42,71	38,06	34,33	31,27	28,7	26,53
55	83,24	67,21	56,35	48,52	42,59	37,96	34,23	31,18	28,62	26,45

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año	THR Días/año
2004-2010 Meses										
56	82,92	66,9	56,06	48,25	42,35	37,73	34,02	30,98	28,43	26,28
57	82,37	66,36	55,57	47,79	41,93	37,34	33,66	30,64	28,12	25,98
58	81,53	65,56	54,83	47,11	41,3	36,76	33,13	30,14	27,65	25,54
59	82,02	66,04	55,26	47,51	41,67	37,11	33,44	30,44	27,93	25,8
60	83,31	67,27	56,41	48,57	42,64	38,01	34,28	31,22	28,66	26,48

Modelación del estado trófico del humedal Jaboque

Resumen

Se expone un modelo de simulación dinámica para explicar el fósforo total y su relación con el estado trófico del humedal de Jaboque en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo incluye los flujos de entrada y salida de agua en cada sección y los aportes de fósforo total de la cuenca aferente. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales; se utilizó el método Euler de integración que se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1.[®] El modelo representa la relación entre el ciclo hidrológico, el tiempo hidráulico de retención del agua, la dinámica del fósforo y el estado trófico del humedal. En los meses de mayores caudales la carga de fósforo disminuye en todas las secciones, mientras que en los meses con menores caudales la concentración aumenta.

El promedio anual del índice de estado trófico se estimó en 45,09 mg/m³ y THR de 14 días/año para el tercio alto, y 35,89 mg/m³ y THR de 34 días/año para el segundo. Esto significa que las dos primeras secciones se encuentran en condiciones de eutrofia. En la tercera el índice de estado trófico es de 19,5 mg/m³ y el THR de 40 días/año, que indican condiciones de mesotrofia. El análisis de sensibilidad permitió estimar que con una carga de 0,62 mg/m³ de fósforo total se podrían mantener las condiciones de mesotrofia en la tercera sección y que para las dos primeras secciones se debería reducir la carga hasta 0,2 mg/m³, para alcanzar un estado de mesotrofia. Se encontró una buena correspondencia entre los valores observados y modelados de la carga de fósforo en cada sección del humedal de $r^2 = 0,72$, con un error relativo de 0,09 para la primera sección y de $r^2 = 0,81$ y de -0,03 para la segunda y $r^2 = 0,85$ y 0,03 para la tercera, lo que indica que el modelo es robusto y tiene buena capacidad predictiva.

Introducción

El fósforo (P) es un elemento normalmente escaso en el medio natural, aunque es muy importante ya que desempeña un papel fundamental en los procesos metabólicos de los seres vivos. Es un limitante para la vida y para la agricultura, por ello se utilizan fertilizantes con fósforo, y una parte se acumula en los campos de cultivo mientras otra fracción va a los ecosistemas adyacentes como lagos, ríos y humedales influyendo en la eutrofización de estos ecosistemas (Lassaletta 2004).

Proceso ecológico

En los humedales se recibe el agua y los materiales de la escorrentía (Bayley *et al.*, 1985; Johnston, 1993; Mann y Wetzel, 2001). Los mecanismos que influyen en la concentración de materiales en las áreas superficiales de los humedales no están uniformemente distribuidos, el resultado es un alto grado de variabilidad tanto espacial como temporal (Johnston, 1993). Los humedales funcionan como sumideros de nutrientes en grandes concentraciones (Mitsch *et al.*, 1995; Wang y Mitsch, 2000). La composición físicoquímica del sustrato de los humedales hace que su retención de fósforo sea considerable, por esto recientemente se ha optado por crear humedales artificiales o restaurar los naturales para mejorar la calidad del agua y controlar la polución (Mitsch *et al.*, 1995; Zacharías *et al.*, 2005).

Un aporte importante de fósforo a los humedales proviene del drenaje superficial, el cual depende de la concentración de este en los suelos, la topografía, la cobertura vegetal, la intensidad y duración del flujo de agua y el uso de la tierra (Schenone *et al.*, 2008). El fósforo demora semanas para moverse en el sustrato y tornarse realmente disponible para ser tomado por las plantas acuáticas enraizadas (Wang y Mitsch, 2000). El fósforo interactúa fuertemente con el suelo y la biota de los humedales que pueden almacenarlo a corto y a largo plazo (Kadlec, 1997). El sedimento orgánico tiene un papel muy importante en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación, junto con la asimilación por los seres vivos, es su adsorción a las arcillas y su precipitación y formación de complejos con el aluminio, el hierro y calcio presentes en los sedimentos (Lassaletta, 2004).

Eutrofización

La eutrofización es el principal problema de las aguas represadas y el fósforo es el nutriente clave para su control (Fraile *et al.*, 1995; Carpenter *et al.*, 1998). El disponible es muy limitado en los suelos y en los sedimentos de los lagos. Por esta razón se utiliza en la agricultura muchos fertilizantes y cuando llegan a los lagos

causan un aumento en la productividad biológica, crecimiento de las plantas, algas y bacterias que consumen el oxígeno en la columna de agua y causan eutrofización (Lassaletta 2004). La eutrofización es un proceso natural en los humedales que pasan de un estado de bajo contenido en materia orgánica (oligotrófico) hacia uno de alto contenido de materia orgánica (eutrófico), con una sobreproducción de algas y macrófitas, que altera los ciclos naturales de los elementos naturales como el fósforo (Salas y Martino, 2001).

Aunque la eutrofización es un proceso natural, los aportes de materia orgánica, provenientes de las actividades humanas hacen que se acelere y lo conviertan en uno de los problemas ambientales más generalizados (Reinhardt *et al.*, 2005; Gurkan *et al.*, 2006; Ministerio de Agricultura de Chile, 2006). El concepto de limitación de nutrientes debe ser considerado como un hecho central para el estudio de la eutrofización, ya que: (1) un nutriente clave debe ser el factor limitante para el crecimiento de las plantas en un ecosistema dado; (2) el crecimiento de las plantas en un ecosistema debe ser proporcional a la tasa de suministro de dicho nutriente, y (3) el control de la eutrofización puede lograrse si se restringe el suministro del nutriente clave al ecosistema (Smith *et al.*, 1999).

La Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE, 1982) define la eutrofización como “el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos, entre los que está el incremento en la producción de algas y macrófitas, el deterioro de la calidad del agua y otros cambios sintomáticos que resultan indeseables e interfieren con la utilización del agua”.

En Colombia la mayoría de los humedales se encuentran en proceso de colmatación y eutrofización por la influencia de sustancias extrañas, como el fósforo que proviene de las cuencas. La eutrofización, que implica la acumulación de nutrientes, favorece preferentemente a las macrófitas flotantes, que se expanden sobre el espejo de agua e influyen de este modo en el proceso de desecación en los humedales (Donato, 1998). Ramírez *et al.* (2005), hicieron un experimento para determinar la respuesta de la comunidad fitoplanctónica de un embalse tropical (La Fe) frente al enriquecimiento artificial con nitrógeno y fósforo en diferentes concentraciones. Aunque los resultados no fueron concluyentes, observaron que fue el nitrógeno y no el fósforo el nutriente limitante para los puntos muestreados en él. Vásquez *et al.* (2006) llevaron a cabo una descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense (Sochagota, La Copa, La Herrera, Gualí, Gatillo 1, Suesca, Sisga, Meridor, El Hato y La Muralla); los resultados mostraron bajos porcentajes de

saturación de oxígeno y niveles altos en ortofosfatos acompañados de gran cantidad de materia orgánica, los cual indica una clara tendencia a la eutrofia.

Modelos dinámicos de fósforo total (Pt) en humedales

El enfoque propuesto por Vollenweider (1970) para calcular la carga crítica de fósforo ha sido, y probablemente seguirá siendo, el más utilizado por centros de investigación y autoridades mundiales. El diagrama de carga propuesto relaciona la cantidad de fósforo con una masa de agua en un escenario que considera la profundidad media del cuerpo de agua y el tiempo de residencia hidráulico. A mediados de la década de los sesenta, la OCDE inició el trabajo sobre los efectos de la eutrofización y su control. Posteriormente, el Grupo de Administración del Agua del Sector de la OCDE inició un estudio cooperativo dirigido hacia el desarrollo de relaciones cuantitativas de nutrientes en respuesta a la eutrofización por carga en los lagos y embalses. Se propuso la siguiente clasificación de estados tróficos, basada en variables fácilmente medibles: fósforo total; clorofila-a y transparencia según disco de Secchi. Estas variables se utilizan para determinar los diferentes estados tróficos (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Valores límite de clasificación trófica

Variables Categoría trófica	Pt (OCDE) mg/m ³	Pt Vollenwei. mg/m ³	chl _a (OCDE) mg/m ³	chl _a Vollenwei. mg/m ³	(OCED) Media de Secchi m	Vollenwei. Secchi m
Ultraoligotrófico	< 4.0	<2.5	<2.5			>12.0
Oligotrófico	<10.0	2.5-8.0	<8.0	4.2	9.9	>6.0
Mesotrófico	10-35	8.0- 25	8.25	16.1	4.2	6-3
Eutrófico	35-100	25-80	25-75	42.6	2.45	3-1.5
Hipertrófico	>100	>80	>75		0.4-0.5	<1.5

Pt: Fósforo total/media anual de la concentración de fósforo total en el agua (mg/m³).

Chl media: Media anual de la concentración de clorofila en aguas superficiales (mg/m³).

Media de Secchi: Media anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m).

Fuente: OCDE (1982) y Janus y Vollenweider (1981)

La simulación dinámica permite observar los sistemas según modelos, así como sus respuestas a las intervenciones a través del tiempo. Los modelos dinámicos con-

sisten en ecuaciones que describen el cambio a lo largo del tiempo. La simulación incrementa la capacidad de hacer predicciones sobre futuros estados de un sistema determinado. El modelo describe la realidad con una cierta precisión, el proceso de modelación y sus resultados pueden ser usados para comprender mejor los problemas como un paso necesario para lograr un cambio sostenible y eficaz (Winz *et al.*, 2009). La modelación en humedales es relativamente reciente en comparación con otras áreas y modelos para agua dulce (Van der Peijl y Verhoeven, 1999).

Kadlec y Hammer (1988) desarrollaron un modelo matemático simple para simular la dinámica hidrológica y la interacción de nutrientes entre aguas residuales y humedales; describieron la variación espacial del flujo de agua de la superficie, e hicieron cálculos de balances de materia para fósforo, nitrógeno y cloruro. Encontraron que el modelo predijo con exactitud la concentración de solutos en el agua superficial, los patrones de crecimiento de la biomasa, los cambios en la fuente de desperdicios y la tasa de acumulación del suelo.

Mitsch *et al.* (1995) implementaron un modelo para predecir la retención de nutrientes y otras características funcionales en humedales construidos para tratar fuentes de contaminación no puntuales. Para crear el modelo se basaron en los datos experimentales de dos humedales del río Des Plaines (Illinois, Estados Unidos) y en el modelo simple de retención de fósforo en lagos con una estructura consistente en una sola variable de estado “concentración total de fósforo”, de Vollenweider (1970), que representa las entradas, las pérdidas y la sedimentación de este elemento. Cuando calibraron el modelo encontraron que la inclusión de la variación estacional de la temperatura dentro del modelo de los dos humedales no era fundamental, mientras que el factor hidrológico sí mostró serlo. Además hallaron que los dos humedales retienen aproximadamente la misma cantidad de fósforo por unidad de área que otros humedales naturales y artificiales. Van der Peijl y Verhoeven (1999) elaboraron un modelo para describir la dinámica del carbono, el nitrógeno y el fósforo en humedales de Devon, Inglaterra. Para el submodelo de fósforo tomaron en cuenta diferentes variables de estado como el fósforo en organismos vivos sobre el suelo, organismos vivos debajo del suelo, biomasa de las plantas (reservas de P), organismos muertos sobre el suelo, organismos muertos debajo del suelo, material vegetal (P en la materia orgánica del suelo), P disponible para las plantas en el suelo, P no disponible para las plantas en el suelo y P contenido en herbívoros. La verificación del modelo mostró que se comporta de tal forma, que varios procesos y sus interacciones resultan ser dinámicas temporales de las variables de estado, que están de acuerdo con las dinámicas descritas para los humedales, y que presentaba un ajuste razonable con los datos obtenidos en campo.

Wang y Mitsch (2000) desarrollaron un modelo de la dinámica del fósforo para los cuatro humedales artificiales del río Des Plaines (Illinois, Estados Unidos) con el fin de observar la relación de diferentes componentes en la retención de fósforo, para tener una mejor comprensión de los humedales construidos y predecir la retención de este en sedimentos en diferentes condiciones hidráulicas, y hallaron que los cuatro retuvieron el 85 % del fósforo, lo cual muestra su capacidad como sumideros de nutrientes.

Dahl *et al.* (2006) formularon LEEDS (Lake Ecosystem Effect Dose Sensitivity), una combinación de un modelo de fósforo para medir los efectos de la zoocría de peces en la eutrofización y otro de partículas suspendidas en el agua del lago Vänern (Suecia). Para su aplicación utilizaron dos escenarios, uno considerando el efecto del aumento de emisiones en una fábrica de pulpa y papel, y otro cuantificando la importancia de la reducción en la escorrentía de fósforo desde los campos agrícolas al lago. Ambos demostraron la utilidad de recurrir a un modelo dinámico de calidad para este lago, ya que la predicción fue comparable con los datos obtenidos en campo.

Håkanson y Eklund (2007) desarrollaron un modelo dinámico de balance de masa de fósforo total para áreas costeras de tres archipiélagos diferentes en el mar Báltico, basado en ecuaciones diferenciales ordinarias y que permite calcular mensualmente las entradas, salidas y los flujos internos de fósforo. El modelo se dividió en cuatro secciones: agua superficial, agua profunda, áreas de transporte de sedimentos finos y áreas de acumulación de sedimentos finos. Los resultados mostraron que el modelo predijo de manera satisfactoria la concentración de fósforo en aguas costeras. Además es fácil de utilizar porque todas las variables pueden ser tomadas de mapas o programas de monitoreo, y se puede usar para otras similares, costas abiertas o estuarios, así como para sustancias diferentes al fósforo. Håkanson y Eklund (2007) aplicaron el modelo anterior en el fiordo Ringkøbing (Jutland, Dinamarca) que presenta condiciones diferentes a las zonas anteriormente utilizadas. Encontraron que con nuevos cálculos agregados para macrófitas y almejas también describe de manera satisfactoria las condiciones en él, con lo cual demostraron que es una herramienta útil para interpretar cambios en diferentes ecosistemas costeros. Kroeger (2008) desarrolló un modelo de primera generación para simular el ciclo del fósforo dentro de un humedal construido (Waldridge, Canadá) y determinar su capacidad de retención de este elemento. El modelo se evaluó como una herramienta para predecir la concentración de partículas de P y ortofosfato en efluentes. Sin embargo no tuvo un buen desempeño debido a diferentes factores, incluyendo

suposiciones incorrectas, parámetros de calibración pobres y falta de solidez en los métodos de cálculo.

Håkanson (2009) describió un modelo general de balance de masas de fósforo para áreas costeras (CoastMab), que puede ser usado para simular valores más confiables de bioindicadores, midiendo para esto la claridad del agua (discos Secchi), concentración de clorofila_a, biomasa de fitoplancton y concentración de cianobacterias en aguas costeras en condiciones naturales o preindustriales en el Golfo de Riga (mar Báltico). Este modelo permite hacer una aproximación a las condiciones previas a la industrialización en aguas costeras con eutrofización, además de proveer posibles variaciones del ecosistema a cambios en el tiempo siendo posible aplicarlo a otras zonas costeras.

Niño (2003) analizó la variación espacio-temporal del nitrógeno y del fósforo en el embalse del Neusa (Cundinamarca, Colombia), las tasas de sedimentación y su relación con la distribución de *Egeria densa*. Observó que las diferencias espaciales y temporales en los contenidos de nitrógeno y fósforo se debían a las fluctuaciones estacionales de las afluencias de los caudales, a los cambios en el nivel del agua y a la distribución espacial de *Egeria densa*.

Pinilla (2006) hizo una modelación del pulso de inundación en el lago Boa (Cauquetá, Colombia). Al comparar los valores de fósforo simulados con los encontrados en campo se observó que aunque no tienen una relación estadística significativa entre ellos, el comportamiento temporal sí tiende a ser el mismo: aumento durante el pulso de inundación (julio) por mayor descarga del río Meta e incremento en las épocas de aguas bajas (enero) debido a una resuspensión más intensa del sedimento. Restrepo *et al.* (2006) llevaron a cabo una aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la Ciénaga de Ayapel (Colombia). Para ello utilizaron los modelos Elcom y Caedym, el primero simula las condiciones hidrodinámicas del lugar y el segundo utiliza la información del Elcom para simular la cadena trófica de la ciénaga. Los resultados del modelo son bastante similares a los obtenidos en campo, lo cual muestra que se ajusta a la realidad.

Método de simulación

Las simulaciones se hicieron con Stella 9.1.[®] Este *software*, ha sido utilizado para elaborar modelos hidrológicos y ecológicos (Jørgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jørgensen, 2008). Se usó el sistema de interfaz de Stella para simular cambios mensuales y condiciones extremas de mayor inundación y menor precipitación. De igual manera, para analizar la sensibilidad del modelo se relacionó

la precipitación con las variables dependientes como volumen, concentración del fósforo total y estado trófico.

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos; para cada una de las variables (tabla 5.2) se desarrollaron las respectivas ecuaciones con el fin de establecer la relación entre las variables moderadoras independientes y las de estado del modelo (anexo B2). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones del fósforo total y el estado trófico del humedal en sus tres secciones con relación a la carga de entrada, y en especial a la de los canales Los Ángeles y Carmelo, que recogen las aguas provenientes de sus respectivas cuencas aferentes en la sección 1 (figura 5.1).

Estructura del modelo de simulación dinámica

Con el fin de evaluar el estado trófico del humedal en cada una de sus secciones se desarrolló un modelo de balance de masas (Fraile *et al.*, 1995; Håkanson y Peters, 1992; Håkanson, 2009). Este tiene en cuenta la dinámica del almacenamiento del fósforo total para cada sección del humedal, de acuerdo con el patrón de carga de ingreso ($C_{in} \cdot Q$) de fósforo total para todo el humedal. También sirve para simular el comportamiento de dos indicadores de estado trófico de cada sección del humedal, según la concentración de ingreso de fósforo total a cada sección.

Con el fin de determinar el estado trófico de cada sección se relaciona el tiempo hidráulico de retención con la carga de ingreso de fósforo (C_{in}) de acuerdo con los modelos propuestos por la OCDE (1982) y por Vollenweider (1970). Se puede simular la concentración máxima estimada de fósforo total, que se ha denominado como “la concentración del tributario corregida por la renovación hidráulica”. Así, la carga normalizada de fósforo no tiene en cuenta los aportes difusos por vertimientos provenientes de procesos naturales, urbanos o agrícolas.

El modelo de balance de masas para determinación del fósforo total

Los modelos de eutrofización de Vollenweider (1970) y la OCDE (1982) se basan fundamentalmente en la teoría de balance de masas para explicar los flujos de fósforo total (Pt) en lagos y humedales, y se describen de acuerdo con la siguiente ecuación diferencial (Håkanson y Boulion, 2002):

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = Q \cdot (C_{in} - C) - R_{sed} \cdot V \cdot C \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen del humedal (m^3).

dC/dt = El cambio de la concentración (dC) de una sustancia en el cuerpo de agua, para el caso fósforo total (Pt), por unidad de tiempo ($mg/m^3/año$).

C = Concentración de una sustancia en el cuerpo de agua (mg/m^3).

C_{IN} = Concentración de una sustancia en el tributario (mg/m^3).

Q = Descarga del tributario ($m^3/año$).

R_{sed} = Tasa de sedimentación de una sustancia ($l/año$).

El tiempo teórico de retención de un químico o una partícula en suspensión se define como la relación entre el volumen del cuerpo de agua y la descarga, $T_w = V/Q$. Este valor es asumido como valores mensuales. El tiempo de retención de una partícula en suspensión o de una sustancia es definido de la siguiente manera:

$$T = V \cdot C / (Q \cdot C_{in}) \quad (2)$$

En el primer modelo de carga para humedales, presentado por Vollenweider (1970), la ecuación básica de balance de masas fue alterada un poco. Los referentes de datos empíricos indican que una mejor predicción de carga interna de fósforo total puede obtenerse de la siguiente fórmula (Håkanson y Boulion, 2002):

$$C = C_{in} / (1 + \sqrt{T_w}) \quad (3)$$

El modelo empírico de la OCDE (1982) está basado en las mismas variables y parámetros del modelo original de Vollenweider, de la siguiente manera:

$$C = C_{in} * 1.55 \cdot (1 / (1 + \sqrt{T_w}))^{0.82} \quad (4)$$

Variables del modelo

Tabla 5.2. Variables del modelo, unidades y fuentes

Humedal Jaboque	Variables e índices	Valores/unid.	Fuente
	Área cuenca aferente humedal Jaboque.	km^2	Universidad Javeriana (2007).
	Aporte cuenca aferente (canal Los Ángeles más Carmelo. Flujo de entrada.	m^3/mes	Estimación a partir de datos del Ideam.

Humedal Jaboque	Variables e índices	Valores/unid.	Fuente
	Precipitación anual.	mm	Ideam
	Concentración Pt /sec., zona de ingreso a la sec. 1.	mg/m ³	Datos de campo, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional.
	Concentración Pt /sec., zona de ingreso a la sec. 2.	mg/m ³	Datos de campo, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional.
	Concentración Pt /sec., zona de ingreso a la sec. 3.	mg/m ³	Datos de campo, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional.
	Cantidad de Pt estimado.	mg/m ³	Modelado
	Pt Vollenweider/humedal.	mg/m ³	Modelación /modelo Vollenweider.
	Pt OCDE/ humedal.	mg/m ³	Modelación/modelo OCDE.
	Tiempo hidráulico de retención (THR).	Días/año	Modelación submodelo hidrológico.
	Volumen de sección.	m ³ /mes	Modelación submodelo hidrológico.
	Profundidad sección.	M	Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional.
	Área sección.	m ²	Datos de campo, Universidad Nacional.
	Tasa de sedimentación.	mg/m ² /t	Håkanson y Peters (1992). Håkanson y Boulion (2002).

Supuestos del modelo

- La carga interna (C_{in}) de fósforo total se calcula a partir del punto de entrada de cada sección y no se tienen en cuenta los posibles aportes difusos por vertimientos o escorrentías posteriores a la entrada de cada sección.
- Los datos de fósforo total disponibles corresponden a un año de muestreo, llevado a cabo por el Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional (Álvarez, 2005), que representa periodos húmedos y secos (tabla 5.3).

- El modelo no incluye las cargas internas de fósforo generado por la descomposición de macrófitas y los derivados de la excreciones del zooplancton y macroinvertebrados.
- El modelo supone una condición estable de mezcla, toda vez que por la profundidad promedio del humedal de sesenta centímetros, es poco probable la existencia de una condición estratificada de la masa de agua.
- En la modelación del estado trófico del humedal se tuvo en cuenta la concentración de fósforo total proveniente de la cuenca aferente corregida por la renovación hidráulica (Fraile *et al.*, 1995).
- Con el fin de facilitar la modelación se tuvieron en cuenta los promedios mensuales de fósforo total encontrados en las zonas de flujo de entrada a cada sección.
- De acuerdo con la zonificación del humedal Jaboque, se considera cada sección como un subsistema interconectado debido a que cada una tiene características morfométricas, físicas y biológicas propias.

Resultados

Las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación y de la descarga de la cuenca aferente. El resultado indica que en el humedal este proceso biogeoquímico tiene una gran dependencia del ciclo hidrológico (Wetzel, 2001; Håkanson y Boulion, 2002; Mitsch *et al.*, 1995). Se puede observar que en los periodos de altas precipitaciones, en los meses de mayo, junio, octubre y noviembre, las concentraciones de fósforo total disminuyen. La carga de fósforo se diluye en un mayor volumen de agua.

En los meses secos las concentraciones de fósforo aumentan en cada una de las secciones. De igual manera es evidente que las variaciones de concentración de fósforo en la sección 1 son más altas que en la sección 2. En el tercio bajo las concentraciones tienden a disminuir (figura 5.1 y tabla 5.3). El resultado se debe a que esta sección tiene mayor capacidad de almacenamiento de agua y parcialmente se diluye la carga de fósforo.

En la figura 5.1 y en la tabla 5.3 se muestran las estimaciones de la marcha mensual de la carga de fósforo (Cin) para cada sección. Nótese que en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, julio, agosto y septiembre, los de menores precipitaciones, se presentan las concentraciones más altas de fósforo, y en los meses de mayores precipitaciones, es decir, en abril, mayo, junio, octubre y noviembre disminuye la concentración de fósforo en todas las secciones. La tercera sección es la que se muestra más homogénea con variaciones menos drásticas que las secciones 1 y 2.

El tercio alto del humedal presenta tiempos hidráulicos de retención del agua bajos que inciden en el ciclo geoquímico del fósforo (Fraile *et al.*, 1995; Håkanson y Boulion, 2002). Por definición se considera que el THR es igual al tiempo de retención de una sustancia (Tr) no reactiva; cuando el $Tr < THR$ para sustancias y partículas de carácter alóctono, estas son transportadas desde la cuenca aferente y distribuidas en un patrón de bolsas con diferente concentración de fósforo, que disminuye en la medida en que aumenta la distancia a la fuente del vertimiento (Håkanson y Boulion, 2002). Esta situación es ayudada por los efectos de la resuspensión, que se incrementa por el aumento leve de temperatura y los vientos en los meses secos. A diferencia de lo que sucede en el primer y segundo tercio, y en el tercio bajo, las concentraciones de fósforo tienden a disminuir y a equilibrarse. Este resultado se debe a que esta sección todavía mantiene una condición hidráulica, donde la tasa de retención del fósforo es menor a la tasa de retención del agua ($Tr < THR$), con lo cual se permite mantener la acción depuradora en esta parte del humedal.

En la figura 5.2 y en la tabla 5.3 se muestran los resultados de la modelación de la carga de fósforo para cada sección. Se nota al comparar las dos figuras que el modelo reproduce la carga mensual promedio estimada en campo (C_{in}) para cada sección. Las mayores variaciones se dan en el tercio alto entre los meses con menores precipitaciones, esto es entre junio y septiembre, sin embargo este comportamiento no se refleja en el tercio medio donde las mayores variaciones se presentaron entre enero y febrero, y en el último tercio donde sucedieron en febrero. De acuerdo con esto, pareciera que el patrón de variación obedece a factores relacionados con la dinámica interna de cada sección, que podría estar influenciada por características morfométricas de la cubeta de cada una.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

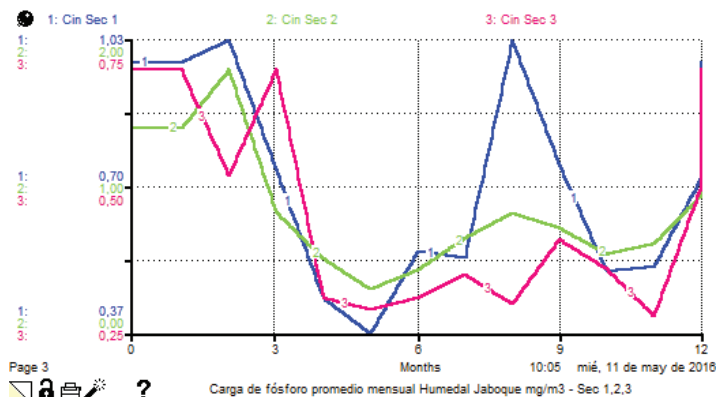
Al comparar los datos estimados con los datos modelados mediante un análisis de regresión, se encontró una buena correspondencia $r^2 = 0,72$; $y = 0,6906x + 0,2368$; (figura 5.2 y tabla 5.3). Existen diferencias entre los valores estimados y los meses modelados. Estas se presentaron entre los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y noviembre, lo que sugiere que las diferencias entre lo observado y lo estimado no se deben al hidropериodo, sino probablemente a las características morfométricas de esta zona, toda vez que la canalización y construcción de “materas interiores” afecta directamente el tiempo hidráulico de retención.

Sección 2, zona de transición (tercio medio)

Cuando se compararon los datos estimados con los modelados de fósforo total se encontró una correlación aceptable, con un nivel de correspondencia de $r^2 = 0,81$; y

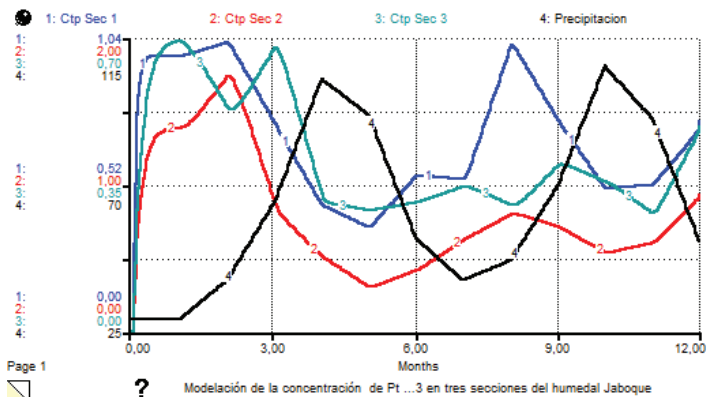
$= 0,4778x + 0,3331$ (figura 5.2 y tabla 5.3). Las diferencias entre las concentraciones encontradas de fósforo total y las modeladas se presentaron en los meses de enero, febrero y marzo, que corresponden a periodos de verano, lo que podría deberse a un aumento del tiempo hidráulico de retención que en estos meses corresponden a los más altos.

Figura 5.1. Promedio de la carga mensual de fósforo que entra a cada sección.



1. Cin sec. 1: Concentración de carga de fósforo entrada al humedal sec. 1 mg/m³.
2. Cin sec. 2: Concentración de carga de fósforo entrada al humedal sec. 2 mg/m³.
3. Cin sec. 3: Concentración de carga de fósforo entrada al humedal sec. 3 mg/m³.

Figura 5.2. Modelación de concentraciones de fósforo para cada sección.



1. Ctp sec. 1: Concentración de fósforo sec. 1 mg/m³.
2. Ctp sec. 2: Concentración de fósforo sec. 2 mg/m³.
3. Ctp sec. 3: Concentración de fósforo sec. 3 mg/m³.

Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

Esta sección, a diferencia de las dos primeras, es la de mayor extensión del sistema (aproximadamente 315 308,4 m²). Al igual que en las secciones anteriores, se encontró una buena reciprocidad entre los valores estimados y modelados, con una correspondencia de $r^2 = 0,85$; $y = 0,8597x + 0,0751$ (figura 5.2 y tabla 5.3). Las diferencias entre los valores encontrados en estimados y simulados se presentan principalmente en los meses diciembre y marzo, cuando aumenta el tiempo hidráulico de retención.

Modelación del índice de estado trófico (IST)

Los resultados de las modelaciones en la sección 1 hechas para determinar el índice de estado trófico, describen que esta sección del humedal se encuentra en condiciones de eutrofia con valores que oscilan entre 27,6 y 60,13 mg/m³ de fósforo total. En el segundo tercio los valores fluctúan entre 14,52 y 53,8 mg/m³ de fósforo total, que corresponden a estados de eutrofia. En los meses con mayores precipitaciones las condiciones tienden a ser mesotróficas, lo cual puede ser ocasionado por un menor tiempo de retención del fósforo debido al aumento de la descarga de la cuenca aferente, que parcialmente lava y transporta a mayor velocidad los nutrientes (Jørgensen, 2003). Pero también es de resaltar que en este sector predominan otros factores que explican la eutrofia, como la abundancia de macrófitas, las altas concentraciones de clorofila_a (Chl_a) y condiciones de hipoxia seguramente debidas a la construcción de varios jarillones (Álvarez, 2005).

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

En el tercio alto del humedal los valores fluctúan entre 27,65 y 60,3 mg/m³, que corresponden a condiciones eutróficas (tabla 5.3 y figura 5.3). Durante todo el año predominan las condiciones eutróficas, que indican deterioro de esta sección. Asimismo, los tiempos de retención aumentan, permitiendo el restablecimiento de los ciclos biogeoquímicos de la sección (tabla 5.3 y figura 5.3).

La figura 5.3 y la tabla 5.3 muestran los resultados de la modelación del índice de estado trófico (IST) del humedal y el tiempo hidráulico de retención. Se comparan los resultados entre la secciones.

En la primera sección en los meses de menores precipitaciones de diciembre, enero y febrero, el índice de estado trófico se estimó en 58,41, 59,84 y 60,13 mg/m³, con un THR de 14, 24 y 17 días/ año. En agosto y septiembre 52,19 y 36,58 mg/m³ con 15 y 11 días/año. En los meses de mayores precipitaciones, abril y mayo, el

índice de estado trófico se estimó en 27,65 y 28,47 mg/m^3 con un THR de 8 y 9 días/año. En octubre y noviembre 32,14 y 31,97 mg/m^3 con 8 y 9 días/año. El promedio del IST fue de 45,9 mg/m^3 y del THR de 14 días/año.

Sección 2, zona de transición (tercio medio)

En la segunda sección en los meses de menores precipitaciones de diciembre, enero y febrero el índice de estado trófico se estimó en 53,84, 55,26 y 67,01 mg/m^3 con un THR de 34, 59 y 43 días/año. En agosto y septiembre fue de 52,19 y 36,58 mg/m^3 con 38 y 28 días/año. En los meses de mayores precipitaciones, abril y mayo, el índice de estado trófico se estimó en 22,18 y 14,52 mg/m^3 con un THR de 20 y 22 días/año. En octubre y noviembre fue de 32,14 y 41,97 mg/m^3 con 20 y 23 días/año. El promedio del IST fue de 35,89 mg/m^3 y del THR de 34 días/año.

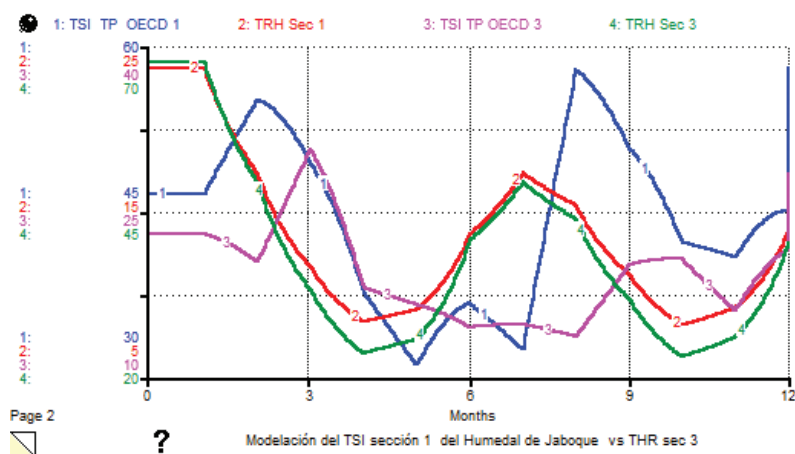
Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

En la tercera sección en los meses de menores precipitaciones, diciembre, enero y febrero, el índice de estado trófico se estimó en 28,71, 29,7 y 22,95 mg/m^3 con un THR de 40, 68 y 50 días/año. En agosto y septiembre fue de 14,52 y 18,17 mg/m^3 con un THR de 44 y 22 días/año. En los meses de mayores precipitaciones, abril y mayo, el índice de estado trófico se estimó en 13,94 y 13,35 mg/m^3 con un THR de 24 y 26 días/año y en octubre y noviembre 15,67 y 12,97 mg/m^3 con 23 y 26 días/año. El promedio del IST fue de 19,9 mg/m^3 y del THR de 40 días/año.

Se aprecia en todas las secciones del humedal que a mayor THR el índice del estado trófico tiende a ser mayor, es decir en diciembre, enero, febrero, julio y agosto, meses de menores precipitaciones, y a menor tiempo de retención se observa un menor valor del índice de estado trófico. Esto significa que el IST se encuentra en función del THR. Los valores bajos del índice de estado trófico ocurren en abril y mayo, que coinciden con los valores bajos de THR. Esta correspondencia se manifiesta en todas las secciones.

De igual manera se hace evidente que el tercio bajo del humedal está en condiciones de mesotrofia, mientras que en los dos primeros tercios son de eutrofia, y las variaciones del índice de estado trófico son fuertes, con una notoria pérdida del papel amortiguador de la contaminación en estas secciones (tabla 5.3). Los resultados anteriores muestran que en las temporadas invernales se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que los tiempos hidráulicos de retención, ello indica que podría existir un fenómeno de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jørgensen (2003), un mejoramiento del estado trófico del humedal.

Figura 5.3. Modelación del índice de estado trófico y tiempo de retención.



- 1: IST (índice de estado trófico), OCDE, sec. 1, mg/m^3 .
- 2: TRH (tiempo hidráulico de retención), sec. 1, días/año.
- 3: IST (índice de estado trófico), OCDE, sec. 3, mg/m^3 .
- 4: TRH (tiempo hidráulico de retención), sec. 3, días/año.

Sin embargo Zhang y Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza una función depuradora en los humedales. En síntesis se podría afirmar que en la tercera sección de humedal se combinan condiciones de carácter físico y biológico que determinan su función depuradora en el sistema del humedal Jaboque.

Error relativo

Los resultados de la estimación del error relativo muestran en la primera sección un promedio de 0,09 con una desviación estándar de 0,24 e indican que el modelo no sobrestima los valores y que su variación es relativamente baja. En la segunda sección el promedio fue de -0,03 y la desviación estándar de 0,16. Cuando el valor es negativo se podría inferir que existe una tendencia a la subestimación de los resultados, pero su variación no es fuerte. En la tercera sección el promedio del error relativo se estimó en 0,03 y la desviación estándar en 0,16, lo cual indica poca variación.

Tabla 5.3. Valores medios mensuales estimados de fósforo total en cada sección, valores medios mensuales de fósforo total modelados. Resultados de la modelación del IST y del THR

Humedal Jaboque	Pt sec. 1 estimado mg/m³	Pt sec. 1 modelado mg/m³	Pt sec. 2 estimado mg/m³	Pt sec. 2 modelado mg/m³	PT sec. 3 estimado mg/m³	Pt sec. 3 modelado mg/m³	IST OCDE Sec 1	IST OCDE Sec 2	IST OCDE Sec 3	THR sec. 1, días/ año	THR sec. 2 días/ año	THR Sec 3-Días/ año
Enero	0,98	0,99	1,4	0,92	0,95	0,97	59,84	55,26	29,7	24	59	68
Febrero	1,03	1,02	1,8	1,1	0,8	0,58	60,13	67,01	22,95	17	43	50
Marzo	0,74	0,7	0,83	0,87	0,7	0,69	42,87	34,64	28,52	12	29	33
Abril	0,45	0,43	0,51	0,55	0,31	0,36	27,65	22,18	13,94	8	20	24
Mayo	0,37	0,43	0,3	0,33	0,35	0,3	28,47	14,52	13,35	9	22	26
Junio	0,36	0,56	0,43	0,45	0,31	0,32	36,11	20,32	14,53	14	34	41
Julio	0,546	0,8	0,65	0,65	0,35	0,36	50,3	29,07	16,59	17	43	50
Agosto	1,03	0,87	0,82	0,82	0,75	0,72	52,19	34,94	14,52	15	38	44
Septiembre	0,75	0,59	0,72	0,74	0,41	0,46	36,58	30,46	18,17	11	28	32
Octubre	0,51	0,52	0,54	0,57	0,36	0,37	32,14	23,12	15,67	8	20	23
Noviembre	0,52	0,7	0,61	0,62	0,28	0,3	41,97	25,98	12,97	9	23	26
Diciembre	0,72	0,76	0,94	0,94	0,5	0,69	58,14	53,84	28,71	14	34	40
Promedio anual	0,67	0,7	0,8	0,71	0,51	0,51	45,09	35,89	19,95	14	34	40
Desviación estándar	0,25	0,2	0,42	0,22	0,23	0,22	12,3	16,5	6,89	5,43	13,34	15,361

Fuente: OCDE (1981) y Volenweider (1982).

En conclusión se puede afirmar que los resultados de la modelación para todas las secciones del humedal indican una buena capacidad descriptiva del modelo, debido a que reproduce la dinámica general de acuerdo con los datos estimados en campo (tabla 5.4).

Análisis de sensibilidad del modelo

En el análisis de sensibilidad del modelo (Håkanson, 2004; Jørgensen y Bendricchio, 2001) se tuvo en cuenta el promedio anual de la carga de fósforo que ingresa a cada sección del humedal como variable independiente, y el índice de estado trófico (IST) para las tres secciones como variables dependientes, para verificar si la relación entre la descarga de la cuenca aferente, el volumen de cada sección y la carga de fósforo total se explica con base en la concentración del tributario corregida por la renovación hidráulica. Se verificó la influencia de la concentración de fósforo en la marcha del indicador de índice de estado trófico, y se probó la solidez del modelo por la relación proporcional entre las cargas de fósforo que ingresan a cada sección (figuras 5.4, 5.5 y 5.6 y tabla 5.5). El análisis de sensibilidad permite hacer inferencias y predicciones relacionadas con la carga máxima de fósforo para mantener un estado mesotrófico en el mejor de los casos, en las secciones del humedal.

Tabla 5.4. Resultado del cálculo del error relativo del modelo aplicado a todas las secciones

Meses	Error relativo sec. 1	Error relativo sec. 2	Error relativo sec. 3
Enero	0,01	-0,34	0,02
Febrero	-0,01	-0,39	-0,28
Marzo	-0,05	0,05	-0,01
Abril	-0,04	0,08	0,16
Mayo	0,16	0,10	-0,14
Junio	0,56	0,05	0,03
Julio	0,47	0,00	0,03
Agosto	-0,16	0,00	-0,04
Septiembre	-0,21	0,03	0,12
Octubre	0,02	0,06	0,03
Noviembre	0,35	0,02	0,07
Diciembre	0,06	0,00	0,38

Meses	Error relativo sec. 1	Error relativo sec. 2	Error relativo sec. 3
Promedio	0,09	-0,03	0,03
Desviación estándar	0,24	0,16	0,16

Las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 muestran los resultados del análisis de sensibilidad aplicado a las tres secciones del humedal. Se representa el índice de estado trófico de acuerdo con las variaciones de la carga de fósforo, desde concentraciones de 0,2 hasta 2,2 mg/m³. En la medida en que aumenta la concentración de la carga aumenta el índice de estado trófico, permitiendo predecir el estado trófico de cada sección (tabla 5.5).

La figura 5.4 y la tabla 5.6 muestran el resultado del análisis de sensibilidad para la primera sección del humedal. Las curvas simuladas del índice de estado trófico presentan una tendencia a seguir el patrón estacional del THR, con incrementos en diciembre, enero, febrero, julio, agosto y septiembre; en las épocas de menores precipitaciones el índice varía entre 15,79 y 112,84 mg/m³.

Tabla 5.5. Análisis de sensibilidad. La serie corresponde a los niveles de Pt como variable independiente y los de IST a las respuestas

Serie	Fósforo total variación mg/m ³	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 1	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 2	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 3
1	0,2	15,79	10,92	10,28
2	0,34	24,57	16,99	15,99
3	0,48	32,7	22,6	21,28
4	0,62	40,39	27,92	26,28
5	0,77	47,78	33,03	31,09
6	0,91	54,92	37,96	35,74
7	1,06	61,87	42,76	40,26
8	1,2	68,64	47,45	44,67
9	1,34	75,28	52,03	48,98
10	1,49	81,78	56,53	53,21
11	1,63	88,18	60,95	57,38
12	1,77	94,47	65,3	61,47
13	1,91	100,67	69,59	65,51
14	2,06	106,79	73,82	69,49
15	2,2	112,84	77,99	73,42

(Continúa)

Serie	Fósforo total variación mg/m ³	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 1	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 2	Índice de es- tado trófico mg/m ³ OCDE Sección 3
Promedio		67,11	46,38	43,67
Desviación estándar		30,6	21,19	19,94

Figura 5.4. Análisis de sensibilidad del IST. Variable independiente Pt,

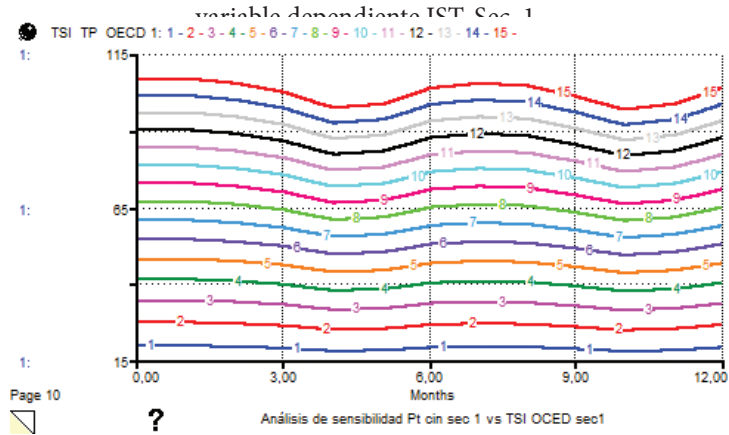


Figura 5.5. Análisis de sensibilidad del IST. Variable independiente

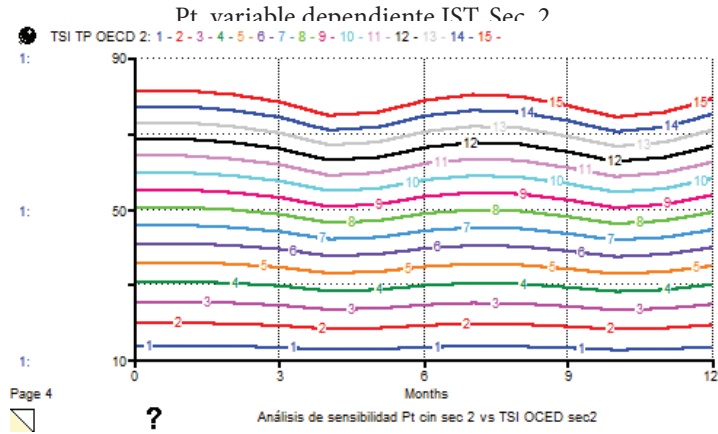
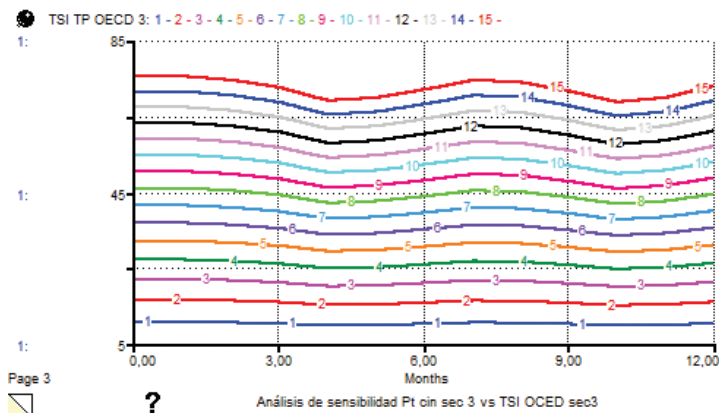


Figura 5.6. Análisis de sensibilidad del IST. Variable independiente Pt, variable dependiente IST. Sec. 3



La figura 5.5 y la tabla 5.6 muestran el resultado del análisis de sensibilidad para la sección 2. Las curvas simuladas del índice de estado trófico evidencian una tendencia a seguir el patrón estacional del THR, con incrementos en los meses de diciembre, enero, febrero, julio, agosto y septiembre. En épocas de menores precipitaciones el índice varía entre 10,79 y 77,99 mg/m^3 .

La figura 5.6 y la tabla 5.6 muestran el resultado del análisis de sensibilidad para la sección 3. Las curvas simuladas del índice de estado trófico evidencian su tendencia a seguir el patrón estacional del THR, con incrementos en los meses de diciembre, enero, febrero, julio, agosto y septiembre. En las épocas de menores precipitaciones el índice varía entre 10,28 y 73,42 mg/m^3 .

En la tabla 5.5 se observan los resultados de la modelación del análisis de sensibilidad. Se aprecia que en la sección 1 los límites de la carga de fósforo oscilan entre 0,2 y 0,35 mg/m^3 , y para el tercio medio del humedal entre 0,62 y 0,77 mg/m^3 , para lograr un estado mesotrófico. La carga de entrada para el tercio bajo debe mantenerse como máximo en 0,77 mg/m^3 . El tercio alto llegaría a un estado de hipertrofia si alcanza concentraciones superiores a 2,06 mg/m^3 . De mantenerse las actuales condiciones de gestión del manejo del humedal, es posible que las descargas aumenten o sean mayores y se llegue a un estado de eutrofia generalizado. Las suposiciones anteriores son apenas aproximaciones de eventos probables en el humedal, si no se disminuyen las cargas de fósforo. El modelo propuesto es una aproximación que se debe complementar con más datos e incorporar otras variables para comprender mejor la dinámica de eutrofización.

En cuanto a gestión y manejo de humedal, es importante plantear logros en términos de recuperación. El análisis de sensibilidad muestra que alcanzar la meta de un estado oligotrófico es casi imposible. Con una carga de $0,2 \text{ mg/m}^3$ de fósforo, se llegaría a niveles de mesotrofia, condición aceptable para la recreación y riego, obviamente si la oferta hídrica del humedal lo permite. Pero dadas las actuales condiciones y los resultados de la modelación, se hace pertinente mejorar las condiciones tróficas de la sección 3 (tercio conservado) e iniciar investigaciones para disminuir la incertidumbre sobre la recuperación de los dos primeras secciones.

Tabla 5.6. Resultado del análisis de sensibilidad. Variable independiente
Cin Pt vs IST, sec. 1, 2 y 3

Humedal Jaboque, sección 1, tercio alto															
Niveles Cin Pt mg/m	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2
Meses															
1	16,26	25,29	33,65	41,57	49,18	56,53	63,67	70,65	77,47	84,17	90,75	97,23	103,61	109,91	116,13
2	16,02	24,92	33,16	40,97	48,46	55,71	62,75	69,62	76,35	82,95	89,43	95,81	102,11	108,31	114,44
3	15,58	24,24	32,25	39,85	47,13	54,18	61,03	67,71	74,25	80,67	86,98	93,19	99,31	105,34	111,31
4	14,81	23,05	30,66	37,88	44,81	51,51	58,02	64,37	70,59	76,7	82,69	88,6	94,41	100,15	105,82
5	14,99	23,32	31,04	38,34	45,35	52,13	58,72	65,16	71,45	77,63	83,7	89,67	95,56	101,37	107,11
6	15,79	24,57	32,7	40,39	47,78	54,92	61,87	68,64	75,28	81,78	88,18	94,47	100,67	106,79	112,84
7	16,02	24,92	33,16	40,97	48,46	55,71	62,75	69,62	76,35	82,95	89,43	95,81	102,11	108,31	114,44
8	15,91	24,75	32,93	40,68	48,12	55,31	62,3	69,13	75,8	82,36	88,8	95,13	101,38	107,54	113,63
9	15,38	23,92	31,83	39,32	46,51	53,47	60,22	66,82	73,28	79,61	85,84	91,96	98	103,96	109,84
10	14,73	22,91	30,48	37,66	44,55	51,21	57,68	64	70,18	76,25	82,21	88,07	93,86	99,56	105,2
11	14,99	23,32	31,04	38,34	45,35	52,13	58,72	65,16	71,45	77,63	83,7	89,67	95,56	101,37	107,11
12	15,79	24,57	32,7	40,39	47,78	54,92	61,87	68,64	75,28	81,78	88,18	94,47	100,67	106,79	112,84

Humedal Jaboque, sección 2, tercio medio															
Niveles Cin Pt mg/m	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2
Meses															
1	11,21	17,43	23,2	28,66	33,9	38,97	43,89	48,7	53,4	58,02	62,56	67,02	71,42	75,76	80,05
2	11,06	17,2	22,89	28,28	33,45	38,45	43,31	48,06	52,7	57,26	61,73	66,14	70,48	74,77	79
3	10,78	16,78	22,32	27,58	32,62	37,49	42,23	46,86	51,39	55,83	60,2	64,49	68,73	72,91	77,03
4	10,3	16,02	21,31	26,33	31,14	35,8	40,33	44,74	49,07	53,31	57,48	61,58	65,62	69,61	73,55
5	10,41	16,2	21,55	26,62	31,49	36,2	40,78	45,24	49,61	53,9	58,12	62,26	66,35	70,39	74,37

Humedal Jaboque, sección 3, zona conservada																
Niveles Cin Pt mg/m	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2	2,2
Meses																
6	10,85	16,88	22,46	27,75	32,82	37,73	42,5	47,15	51,71	56,18	60,57	64,89	69,15	73,36	77,51	77,51
7	11,06	17,2	22,89	28,28	33,45	38,45	43,31	48,06	52,7	57,26	61,73	66,14	70,48	74,77	79	79
8	10,99	17,09	22,74	28,1	33,24	38,21	43,04	47,75	52,36	56,89	61,34	65,72	70,03	74,29	78,49	78,49
9	10,65	16,57	22,05	27,25	32,23	37,05	41,73	46,3	50,77	55,16	59,47	63,72	67,9	72,03	76,11	76,11
10	10,24	15,93	21,2	26,19	30,98	35,61	40,11	44,5	48,8	53,02	57,16	61,24	65,27	69,23	73,15	73,15
11	10,41	16,2	21,55	26,62	31,49	36,2	40,78	45,24	49,61	53,9	58,12	62,26	66,35	70,39	74,37	74,37
12	10,92	16,99	22,6	27,92	33,03	37,96	42,76	47,45	52,03	56,53	60,95	65,3	69,59	73,82	77,99	77,99

Discusión

El modelo desarrollado constituye una aproximación al proceso de eutrofización relacionado con el ciclo del fósforo en el humedal de Jaboque. Obviamente la predicción admite ser discutida; esencialmente es un instrumento que facilita la comprensión de las relaciones entre el ciclo hidrológico y el fósforo total en el sistema.

Los resultados de la modelación mostraron que las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal, siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación y de la descarga de la cuenca aferente. El resultado indica que en el humedal este proceso biogeoquímico tiene gran dependencia del ciclo hidrológico (Wetzel, 2001; Håkanson y Boulion, 2002; Mitsch *et al.*, 1995). Se puede observar, que en los periodos de altas precipitaciones (mayo-junio y octubre-noviembre) las concentraciones disminuyen. La carga de fósforo se diluye en un mayor volumen de agua.

Se encontró una buena correspondencia entre los valores promedio estimados de fósforo y los valores modelados. La determinación del error relativo del modelo muestra que los resultados no están sobrestimados ni subestimados; los análisis de sensibilidad evidencian su capacidad predictiva y sugieren que este es robusto, y para el caso de humedales con condiciones geomorfológicas e hidrológicas similares a Jaboque es posible aplicarlo en proyectos de investigación y de manejo.

El índice de estado trófico en la primera sección fue de 45,9 mg/m³ y del THR de 14 días/año; para la segunda el IST fue de 35,89 mg/m³ del THR de 34 días/año, y para la tercera el IST fue de 19,9 mg/m³ y del THR de 40 días/año. Esto significa que el tercio bajo del humedal se encuentra en mejores condiciones mesotróficas y que en los dos primeros tercios predominan las condiciones de eutrofia, con una pérdida del papel amortiguador de la contaminación en estas secciones. Los resultados anteriores muestran que en las temporadas invernales se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que los tiempos hidráulicos de retención; esto indica que podría existir un fenómeno de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jørgensen (2003), un mejoramiento del estado trófico del humedal. Sin embargo Zhang y Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza una función depuradora en los humedales. En síntesis se podría afirmar que en la tercera sección del humedal Jaboque se combinan condiciones de carácter físico y biológico que determinan su función depuradora y muestran que en él existe una alta dependencia entre el ciclo hidrológico y el estado trófico.

El análisis de sensibilidad mostró que podría existir cierta independencia del ciclo hidrológico en el último tercio del humedal, debido a que esta zona es la que

amortigua la descarga proveniente de las dos primeras secciones, con lo cual probablemente en Jaboque el ciclo del fósforo estaría también en función de variables físicas como la resuspensión y la actividad biológica. Los resultados de la modelación del análisis de sensibilidad indican que en la sección 1 los límites de la carga de fósforo total oscilan entre 0,2 y 0,35 mg/m³, y para la sección 2 entre 0,62 y 0,77 mg/m³ para lograr un estado mesotrófico, y la carga de entrada para la sección 3 debe mantenerse como máximo en 0,77 mg/m³.

El tercio alto llegaría a un estado de hipertrofia si supera concentraciones de 2,06 mg/m³. De mantenerse las actuales condiciones de gestión del humedal, es posible que las descargas aumenten o sean mayores y se llegue a un estado de eutrofia generalizado. El análisis de sensibilidad muestra que lograr la meta de un estado oligotrófico es casi imposible. Con una carga de 0,2 mg/m³ de fósforo se alcanzaría niveles de mesotrofia, condición aceptable para la recreación y riego, obviamente si la oferta hídrica del humedal lo permite.

Las predicciones sobre los mínimos de concentración de carga de entrada a cada sección son preliminares, y constituyen un resultado que en principio debería tenerse en cuenta para profundizar en futuras modelaciones ya que ofrecen una oportunidad para establecer metas viables en torno a los propósitos de restauración de un sistema léntico, en el marco de la sustentabilidad ambiental (Harte, 1996).

La modelación se pudo aplicar para estudiar la concentración de fósforo total en el humedal y su relación con el índice de estado trófico. Esta modelación permitió ajustar las generalizaciones relacionadas con el fenómeno de eutrofización del humedal y el índice de estado trófico posibilitó clasificar de manera más apropiada la condición de salud de cada sección, además de corroborar una alta dependencia entre el tiempo de retención, la carga de fósforo y su estado trófico, variables que deben ser tenidas en cuenta en los programas de restauración y conservación de este.

Se concluye que en las tres secciones evaluadas la modelación fue un instrumento útil para determinar el rol y la influencia de las variables físicas como la precipitación y el hidroperiodo del humedal en el fósforo total, con el fin de determinar estrategias de restauración y manejo ambiental.

Modelación dinámica de sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal Jaboque

Resumen

Se propone un modelo de simulación dinámico para explicar de manera general el comportamiento de los sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal Jaboque, en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones de los SST con relación a la carga de entrada proveniente de la cuenca aferente. Se verificó el carácter determinístico y el error relativo del modelo y el carácter predictivo mediante el análisis de sensibilidad. Los resultados de la modelación permitieron establecer el comportamiento general de los SST en cada tercio del humedal y comprobar la relación de dependencia de este factor con el ciclo hidrológico.

El modelo predijo altas concentraciones de SST en abril, mayo, junio, octubre y noviembre; los valores fluctuaron entre 85 y 101 mg/l, con un promedio de 65,12 mg/l y un tiempo hidráulico de retención de entre ocho y nueve días/año para la primera sección; en la segunda fue entre 57 y 69 mg/l con un promedio de 50 mg/l y un tiempo hidráulico entre 20 y 23 días/año, y en la tercera entre 56 y 67 mg/l con un promedio de 48,8 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 24 y 26 días año.

En diciembre, enero, febrero, agosto y septiembre se presentó una tendencia a la disminución de los valores modelados. En la primera sección fluctuaron entre 34 y 59 mg/l con un promedio de 65,12 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 24 y 15 días año; en la segunda estuvieron entre 18 y 48 mg/l con un promedio de 50 mg/l y un tiempo hidráulico entre 58 y 38 días año, y en la tercera variaron entre 14 y 46 mg/l con un promedio de 48,8 mg/l y un tiempo hidráulico de retención en-

tre 68 y 44 días año. Se compararon los valores estimados de SST con los modelados lo que evidenció una correspondencia aceptable de $r^2 = 0,95; 0,71$ y $0,67$ en todos los casos. El error relativo para cada sección en su orden fue de $0,10, 0,20$ y $0,26$, esto demuestra que el modelo no tiende a la sobreestimación de los resultados. Además, el análisis de sensibilidad ratificó que tiene una buena capacidad descriptiva y predictiva, y permitió corroborar la relación entre el ciclo hidrológico y la concentración de SST. Los resultados de la modelación permiten inferir la existencia del fenómeno “trampa de sedimentos” en el primer y último tercio del humedal, lo que indica una fuerte tendencia a la sedimentación de su área más conservada.

Introducción

Los humedales se asemejan a una esponja que recircula el agua en su interior y la libera lentamente, por ello cumplen funciones esenciales como la regulación de inundaciones y sequías, mantenimiento de la calidad del agua a través de la retención de sedimentos y nutrientes y remoción de tóxicos. Asimismo, los humedales tienen la capacidad de estabilizar microclimas y retener carbono, lo que tiene un efecto importante en el calentamiento global. Por otro lado, prestan servicios culturales, educacionales, recreacionales y de turismo (Roldán, 1992; Pinilla, 1996, Wetzel, 2001). Los humedales han sufrido un proceso de deterioro debido al desarrollo urbano y al mal manejo de las basuras. Como resultado de estas acciones hay un alto grado de contaminación o, en el peor de los casos, la pérdida total de estos ecosistemas.

La acumulación de sólidos suspendidos es uno de los principales problemas de contaminación de los humedales (Prescott y Tsanis, 1997). Este fenómeno se presenta en el humedal Jaboque, debido a que recibe el impacto de la urbanización y las actividades agrícolas; se han encontrado concentraciones de SST de entre 110 y 30 mg/l (Álvarez, 2005), con lo cual se incrementan sus condiciones de eutrofización. Por estas razones se propone elaborar la modelación dinámica de los SST, determinar y explicar su relación con el ciclo hidrológico y predecir de manera general el impacto de este material en el humedal.

Procesos ecológicos de los sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales (SST) incluyen el plancton, minerales de arcilla, arena, limo, coloides agregados, materia orgánica e inorgánica finamente dividida y otros microorganismos. Estos pueden provenir de varias fuentes, se dividen de acuerdo con la composición, ya sea orgánica o inorgánica, y se originan en fuentes alóctonas o autóctonas de levantamiento de tierra o resuspensión (Håkanson,

2004). Los sólidos suspendidos regulan dos de las mayores rutas de transporte, la de materiales disueltos en la zona pelágica y la sedimentación de partículas, y la ruta en la zona bentónica (Håkanson *et al.*, 2005; Håkanson *et al.*, 2000). También son indicadores ambientales para determinar cambios geomorfológicos, contaminación y acciones del cambio climático. Los sedimentos en suspensión transportan cargas de nutrientes, restos de pesticidas, metales pesados y otros elementos. En la cubeta de agua disminuyen la cantidad de luz que penetra y afectan la fotosíntesis y la temperatura del agua, anomalías altamente relacionadas con el cambio climático (Salama y Monbaliu, 2004; Noe y Harvey, 2007).

Entre los factores que más inciden en la producción de sólidos suspendidos totales (SST) en sistemas acuáticos están la producción autóctona del humedal, el plancton y sus desechos metabólicos (heces) (Vollenweider, 1965, 1970; Carlson, 1977; Wetzel, 2001), lo cual se relaciona directamente con la cantidad de SST, los materiales externos, y en especial aquellas sustancias que son capaces de influir en el color del agua y la cantidad de material resuspendido. Estos factores no son independientes: tasas de sedimentación altas corresponden a cantidades altas de material en resuspensión; tasas altas de resuspensión generan una alta carga interna de nutrientes y aumento de la producción; una gran cantidad de sustancias de color significan una zona fótica reducida, y una alta producción está asociada a una alta sedimentación. La producción de SST también se debe a la erosión de los terrenos, ya sea por construcciones, por arado, etc. La concentración de los SST está relacionada con las estaciones climáticas, con los regímenes del caudal y de las precipitaciones. Los cuerpos de agua con altos contenido de SST pueden ser estéticamente desagradables para las actividades recreativas. Los análisis de sólidos son importantes para el control de procesos biológicos y físicos de tratamiento de aguas residuales (Mora y Mata, 2007).

Los SST influyen en el transporte de la mayoría de los contaminantes (Bradley y Gilvear, 2000). Los SST incluyen todos los tipos de material alóctono y autóctono y se reflejan en la concentración de detritus en la columna de agua. La variabilidad es alta y muchos factores afectan su comportamiento, como la intensidad de la descarga de agua de los tributarios, la intensidad de la precipitación, la temperatura y los vertimientos (Håkanson y Boulion, 2002; Håkanson *et al.*, 2005).

Modelos dinámicos de sólidos suspendidos en humedales

La ventaja de los modelos dinámicos es que son sencillos de usar y proveen relaciones generales; han sido utilizados para estudiar la calidad del agua y analizar

la concentración y carga de nutrientes (Mooij *et al.*, 2010). Weyhenmeyer *et al.* (1997) desarrollaron un modelo dinámico a partir de datos obtenidos de nueve lagos en Suecia. Tomaron las muestras de sedimentos de diferentes profundidades y determinaron el flujo, distribución y origen de los sólidos suspendidos en la zona pelágica. El modelo incluyó los mecanismos que controlan el flujo de partículas aloctonas, autóctonas y resuspendidas en lagos durante la rotación y la estratificación. En periodos de rotación, la resuspensión de sedimentos está relacionada con el viento y con las olas, las partículas resuspendidas están distribuidas de manera uniforme en la columna de agua. En periodos de estratificación en lagos más profundos las partículas se enriquecen en el hipolimnion.

El modelo describe cuánto y a qué profundidad la materia es resuspendida y cómo se distribuye en la columna de agua. Además, muestra el tiempo del flujo y distribución de las partículas con relación a la velocidad del viento. Las variables utilizadas en el modelo fueron viento, estratificación y morfometría del lago. Como resultado, el modelo puede explicar las diferencias en el tiempo, en el flujo, el origen y la distribución de los sólidos suspendidos en diferentes lagos. También, puede predecir las consecuencias de un cambio en la entrada de material alóctono o planctónico sobre el flujo y la distribución de sólidos suspendidos en lagos. Esta información es útil para entender la dispersión y bioasimilación de contaminantes y nutrientes en lagos, ya que los sólidos suspendidos actúan como transportadores de contaminantes y nutrientes.

Prescott y Tzanis (1997) desarrollaron un modelo de balance de masas, basado en la teoría de conservación de estas, que provee información sobre ecosistemas con respecto a la entrada de fuentes y la importancia de cada carga. Se examinó el fósforo y las cargas de sólidos suspendidos en un puerto en Canadá, sus concentraciones fueron determinadas en la columna de agua mediante los sedimentos de las ciénagas. Luego del reflujo, la escorrentía es la siguiente en contribuir en la concentración de estos. Esos parámetros pueden ser utilizados para minimizar el impacto de los sedimentos en la calidad del agua.

Lindstrom *et al.* (1999), elaboraron un modelo empírico para predecir concentraciones medias anuales para sólidos suspendidos, cuyo parámetro más importante es la concentración de fósforo total. La producción autóctona es el proceso de mayor relevancia en la concentración de sólidos suspendidos en lagos. Asimismo, el pH y la resuspensión son explicados por el modelo en un 74 %. Håkanson *et al.* (2000) desarrollaron un modelo matemático dinámico de un ciclo mensual de sólidos suspendidos en lagos con diferentes niveles de profundidad. Concluyeron

por medio de un análisis de sensibilidad que la sedimentación y la erosión están relacionadas con un descenso en la base de la onda, mientras que la salida y entrada de nutrientes, la mineralización y la mezcla lo están menos.

Malmaeus y Håkanson (2003) diseñaron un modelo para predecir la concentración de sólidos suspendidos, probado con datos empíricos de lagos europeos, y predijo los valores medios mensuales de concentración de sólidos suspendidos en ellos. Según los análisis de incertidumbre y sensibilidad se demostró que la variable más importante es la producción autóctona y que los procesos internos influyen, pero en menor medida. Dahl *et al.* (2006) elaboraron un modelo dinámico para describir el flujo de los sólidos suspendidos y el fósforo en un lago en Suecia, correspondiente a la adaptación del modelo EEDS (Ecosystem Effect Dose Sensitivity), que se aplica a dos situaciones: aumento de las emisiones de una planta de celulosa y papel a orillas del lago, y disminución de las emisiones de fósforo alcanzado por una combinación de efectos en las tierras agrícolas, bosques y la construcción urbana. Mooij *et al.* (2010), creen que la aplicación de múltiples modelos al mismo tiempo utilizando los ya existentes puede ayudar al desarrollo de una visión científica más integrada sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, y proporcionar así información esencial para la gestión de la calidad del agua.

Estructura del modelo de simulación dinámica

El modelo utilizado para describir la dinámica de los SST se basa en los principios de balance de masas (Håkanson y Boulion, 2002; Håkanson 2004) y permite definir al humedal como un tanque reactor, de tal manera que se toma la mezcla del humedal como completa durante un intervalo de tiempo (dt). Así, el flujo de materia particulada (SST) o de ingreso de partículas al sistema se puede describir a partir de la siguiente ecuación diferencial:

$$Vx \frac{dc}{dt} = QxC_{in} - QxC - Mw + R_{sed} + M_{sx}R_{res} \quad (1)$$

V = Volumen de la cubeta m³.

Q= Caudal m³/mes.

Mw = C*V. Masa de SST mg/l en la columna de agua.

Ms = Mw*Rres. Masa de SST mg/l en los sedimentos.

Rsed = Tasa de sedimentación.

Rres = Tasa de resuspensión.

C = Concentración de SST mg/l.

dc/dt = Cambio de concentración (dc) de una sustancia por unidad de tiempo, en el tributario o ingreso Q caudal del tributario $m^3/año$.

El modelo tiene en cuenta la descarga de agua del tributario y el flujo de salida en cada cubeta en m^3/mes , la concentración de SST en mg/l en cada sección, el área en m^2 , profundidad en m , volumen de las secciones en m^3 , y la tasa de sedimentación, resuspensión y mineralización (tabla 6.1) (Håkanson y Petres, 1995; Håkanson, 2004).

Tabla 6.1. Variables del modelo, unidades y fuentes.

Variables e índices	Valores/unidades	Fuente
Aporte cuenca aferente (canales Los Ángeles y Carmelo), flujo de entrada	m^3/mes	Cálculo a partir de datos del Ideam Cálculo
Profundidad promedio sección	m /mes	Datos de campo U. Nacional, Grupo de Investigación, Biodiversidad y Conservación
Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
Área sección	m^2/mes	Datos de campo U. Nacional, Grupo de Investigación, Biodiversidad y Conservación Simulación
Volumen sección	m^3/mes	Simulación
Carga de entrada de SST	mg/l	Datos de campo U. Nacional
Tasa de sedimentación	mes^{-1}	(Håkanson y Boulion, 2002) (Håkanson y Petres, 1995)
Tasa de resuspensión	mes^{-1}	(Håkanson y Boulion, 2002) (Håkanson y Petres, 1995)
Tasa mineralización	mes^{-1}	(Håkanson y Boulion, 2002) (Håkanson y Petres, 1995)
Masa total SST sección	grs/m^3	Simulación
Concentración de SST	grs/m^3	Simulación
Masa de carga interna de SST	grs/m^3	Simulación
Tiempo hidráulico de retención	Días /año	Simulación
Flujo salida sección	$m^3/año$	Simulación

Método de simulación

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B3). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones de los SST en sus tres secciones, con relación a la carga de entrada, y en especial a la proveniente de los canales Los Ángeles y Carmelo, que recogen las aguas de cuencas aferentes y las vierten en la sección 1. Con el fin de verificar el carácter determinístico y hacer la validación se elaboraron regresiones simples lineales (Legrende y Legrendre, 1998), que permitieron comparar los datos estimados en campo con los resultados modelados. Para evaluar la fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007) y se comprobó su carácter predictivo mediante el análisis de sensibilidad (Håkanson, 2004; Jørgensen y Bendoricchio, 2001).

Supuestos del modelo

El modelo considera los siguientes supuestos con el fin de delimitar su alcance y posterior generalización o aplicación:

- En cada una de las secciones del humedal se toma la profundidad media.
- El caudal de entrada proviene básicamente de la descarga de cuenca aferente.
- La modelación de la dinámica de los SST se toma para cada una de las secciones, toda vez que existen barreras morfométricas que hacen que cada sección se comporte de manera independiente, pero dependiente de la descarga de la cuenca aferente.
- El modelo no tiene en cuenta la fracción de SST que se produce por la actividad biológica en el humedal, que si bien es importante, es difícil de calcular con certidumbre.
- Debido a que en el humedal Jaboque las diferencias entre temperatura del fondo y superficie son mínimas, con tendencia a ser iguales, se considera que no está estratificado.
- La descarga de la cuenca aferente se calculó con base en la relación existente entre precipitación y área en kilómetros cuadrados de la cuenca aferente (Håkanson y Peters, 1995; Håkanson, 2005).
- Los datos que alimentan el modelo corresponden a un año hidrológico.

Resultados

El modelo conceptual de SST se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Se desarrollaron las ecuaciones con el fin de establecer la relación entre el ciclo hidrológico (precipitación) y la carga de sólidos suspendidos (anexo B3). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones de los SST en cada sección y determinar su relación con el comportamiento hidrológico del humedal.

En la figura 6.1 y en la tabla 6.2 se muestra el resultado de la modelación del balance de masas para la sección 1 del humedal. Se observa que las curvas de precipitación, la descarga de la cuenca aferente y la concentración de los SST son coincidentes con el hidropериodo. En enero, febrero, marzo, julio y agosto, que son meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 34,9 mg/l y 64,8 mg/l y el THR varió entre 11 y 24 días/año. En abril, mayo, junio, octubre y noviembre, con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente, cuando aumenta la concentración de SST, los valores oscilaron entre 69,2 mg/l y 101,7 34,9 mg/l y el THR entre 8 y 14 días /año.

La tabla 6.2 muestra los resultados de la modelación de la precipitación promedio mensual, la descarga de la cuenca aferente, la carga de entrada de SST, y modelado el tiempo hidráulico de retención, y se encontró que estas variables son coincidentes con el hidropериodo. En la sección 2 en enero, febrero, marzo, julio y agosto, que son meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 18,5 y 56,6 mg/l y el THR varió entre 28 y 59 días/año. En abril, mayo, junio, octubre y noviembre, meses con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente, cuando aumenta la concentración de SST, los valores oscilaron entre 69,2 l y 57,1 mg/l y el THR entre 20 y 34 días/año. Para la sección 3 del humedal, en enero, febrero, marzo, julio y agosto, meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 1445 y 58,15 mg/l y el THR entre 32 y 68 días/año. En abril, mayo, junio, octubre y noviembre, meses con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente, cuando aumenta la concentración de SST, los valores que fluctuaron entre 60,9 y 47,8 mg/l y el THR estuvo entre 20 y 24 días/año.

La curva cuatro del THR muestra que en la medida en que disminuye el THR aumenta la concentración de SST, esto ocurre en los meses de mayores precipitaciones y mayores descargas de la cuenca aferente, y cuando aumenta el THR en los meses de menores precipitaciones y menor descarga de la cuenca aferente, disminuye la concentración de SST. En estas condiciones el tercio alto recibe la mayor

cantidad de SST que se transportan desde la cuenca aferente. Lo anterior indica que en invierno hay mayor transporte de SST, pero que su permanencia en las secciones es corta debido a que los sólidos son lavados por los mayores flujos de agua (Jørgensen, 2003).

Los resultados de la modelación de los SST están en la figura 6.2 y en la tabla 6.2 para todas las secciones del humedal. Las curvas muestran que los SST se comportan de manera homogénea en las tres secciones, lo que indica la existencia del transporte de sedimentos desde el tercio alto hacia el segundo y tercero.

Sin embargo se hace notorio que los valores de la curva de la sección 1 muestran una menor concentración de SST a lo largo del periodo, evento que se puede asociar con una menor capacidad de almacenamiento de esta parte del humedal y por lo tanto tiende a funcionar como un canal de paso en condiciones de altas precipitaciones.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

Esta zona se caracteriza porque recibe directamente la descarga de SST de origen externo del humedal, que corresponde al material particulado transportado por el alcantarillado pluvial de la cuenca aferente. En esta cubeta se presentan altas concentraciones de SST, con valores que oscilan entre 38 y 91 mg/l. Los menores valores corresponden a épocas de verano y los más altos a estaciones lluviosas (figura 6.2 y tabla 6.2). La comparación entre los valores estimados de SST en campo y los valores modelados arrojó como resultado una buena correspondencia: $r^2 = 0,95$; $y = 1,1982x + 10,862$. Los meses con mayores diferencias entre los valores estimados y los modelados fueron enero, marzo, abril, mayo, junio y octubre (figura 6.3).

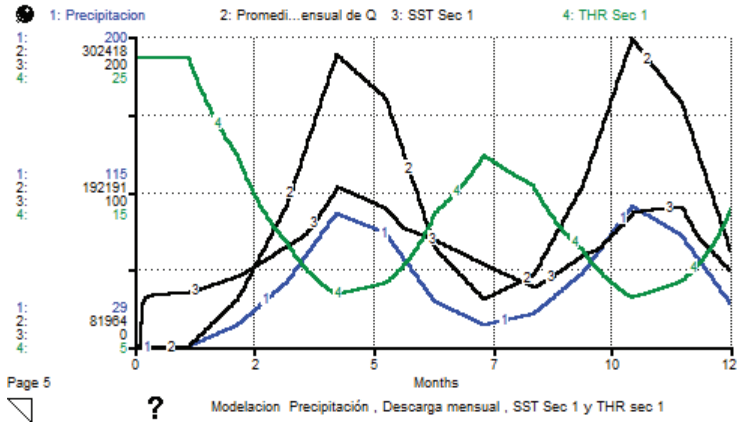
Sección 2, zona de transición (tercio medio)

Esta sección, al igual que la primera, se encuentra fuertemente intervenida por la acción antrópica. La descarga de agua que recibe proviene del tercio alto del humedal, ya que parte importante de esta ha sido desviada hacia los canales perimetrales.

Tabla 6.2. Resultados de la modelación del balance de masas de SST

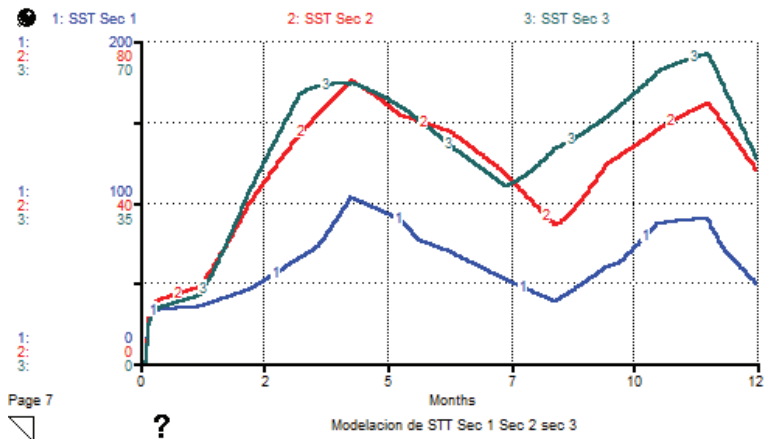
Variables Meses	Precip. Prom. Mm	Descarg. mensual m ³ /mes	Estimado sec. 1 mg/l	Modelado sec. 1 mg/l	Estima- do sec. 2 mg/l	Modela- do sec. 2 mg/l	Estima- do sec. 3 mg/l	Mod- elado sec. 3 mg/l	THR sec. 1 días/ año	THR sec. 2 días/ año	THR sec. 3 días/ año
Enero	29	81 964	40	34,98	36	18,58	30	14,4	24	59	68
Febrero	41	115 880	50	45,3	68	38,78	70	36,44	17	43	50
Marzo	65	183 712	70	64,85	83	56,68	91	58,15	12	29	33
Abril	103	291 113	91	101,76	94	69,91	83	60,97	8	20	24
Mayo	92	260 023	83	89,57	74	61,95	69	56,14	9	22	26
Junio	54	152 622	69	69,23	65	57,68	52	47,48	14	34	41
Julio	41	115 880	52	53,27	50	48,12	38	39,19	17	43	50
Agosto	47	132 838	38	38,88	34	35,06	63	46,48	15	38	44
Sep- tiembre	70	197 844	63	59,03	66	48,86	74	53,45	11	28	32
Octubre	107	302 418	74	85,55	75	57,71	85	62,96	8	20	23
Noviembre	91	257 197	85	89,99	81	64,73	86	67,5	9	23	26
Diciembre	53	149 796	46	49,08	47	48,09	38	44,49	14	34	40
Promedio	66,08	186 773	63,42	65,12	64,42	50,51	64,92	48,97	13,30	32,87	38,05

Figura 6.1. Resultado de la modelación del balance de masas de SST en el humedal Jaboque, sec. 1



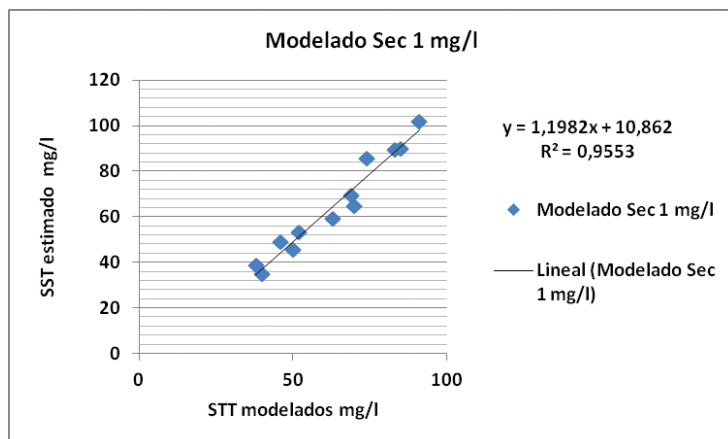
- 1: Precipitación en mm.
- 2: Descarga cuenca aferente m³/mes.
- 3: Concentración SST, sec. 1, mg/l.
- 4: Tiempo hidráulico de THR en días/año.

Figura 6.2. Modelación de los SST en las secciones 1, 2 y 3



- 1: Sólidos suspendidos totales, sec. 1 mg/l.
- 2: Sólidos suspendidos totales, sec. 2 mg/l.
- 3: Sólidos suspendidos totales, sec. 3 mg/l.

Figura 6.3. Resultados de la comparación entre los valores estimados de SST y los modelados en la sección 1. Todos están en mg/l



En los meses de mayor precipitación aumentan los SST y en invierno disminuyen, se registran valores desde 34 hasta 94 mg/l (figura 6.2 y tabla 6.2), lo que indica una fuerte relación con el ciclo hidrológico. La concentración promedio anual fue de 64,2 mg/l, valor que corresponde a condiciones de eutrofia.

La comparación entre los valores observados y los modelados arrojó una buena correspondencia: $r^2 = 0,7115$; $y = 0,6375x + 9,449$ (figura 6.4). En este tercio se presentan las mayores concentraciones de SST. Sin ser estas diferencias marcadas, es probable que se deban en parte a la escorrentía proveniente de actividades agrícolas (Alvarez, 2005), a la remoción de macrófitas por parte de lugareños, y a las complejas condiciones morfométricas.

Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

La principal fuente de SST proviene de la descarga del tercio medio. Se presentan concentraciones de entre 30 y 91 mg/l y promedio anual de 64,92 mg/l. Como en la primera y segunda secciones, los SST están supeditados al ciclo hidrológico. La correspondencia entre los datos observados y los modelados fue: $r^2 = 0,6775$; $y = 0,5705x + 11,935$ (figura 6.5 y tabla 6.2), que se considera aceptable, pero las diferencias, al igual que en las anteriores secciones, obedecen a factores biológicos y morfométricos de la cubeta, principalmente. Las diferencias encontradas pueden deberse a que no se han tenido en cuenta los aportes de SST provenientes de actividad biológica del humedal y la descomposición de biomasa, procesos que aportan una cantidad importante de SST según Vorosmarty *et al.* (2003).

Figura 6.4. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y valores modelados en la sección 2. Todos están en mg/l

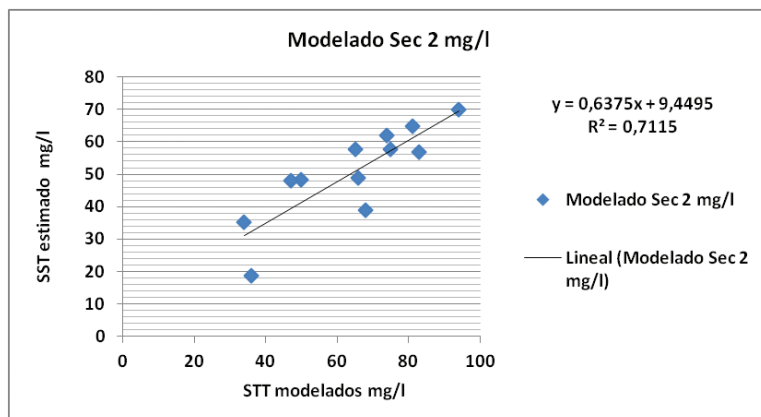
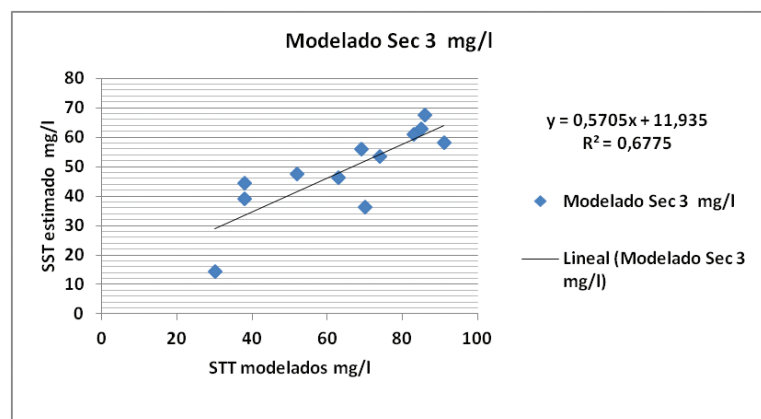


Figura 6.5. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y valores modelados de la sección 3. Todos están en mg/l



Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007) para cada una de las secciones, con ese fin se compararon los promedios de los valores de campo con los modelados.

La tabla 6.3 muestra los resultados de la estimación del error relativo de la modelación para todas las secciones del humedal. Para la primera es de 0,01 y la desviación estándar es de 0,09, esto indica que los resultados no se encuentran sobrestimados. Para la segunda y la tercera son de -0,02 y -0,23 y con una desviación

estándar de 0,16 y 0,20 respectivamente. Para ambas los resultados se encuentran entre valores muy cercanos a cero, lo que señala la fortaleza del modelo.

Tabla 6.3. Resultado de la estimación del error relativo del modelo aplicado a todas las secciones

Meses	Error relativo sec. 1	Error relativo sec. 2	Error relativo sec. 3
Enero	-0,13	-0,48	-0,52
Febrero	-0,09	-0,43	-0,48
Marzo	-0,07	-0,32	-0,36
Abril	0,12	-0,26	-0,27
Mayo	0,08	-0,16	-0,19
Junio	0,00	-0,11	-0,09
Julio	0,02	-0,04	0,03
Agosto	0,02	0,03	-0,26
Septiembre	-0,06	-0,26	-0,28
Octubre	0,16	-0,23	-0,26
Noviembre	0,06	-0,20	-0,22
Diciembre	0,07	0,02	0,17
Promedio	0,01	-0,20	-0,23
Desviación estándar	0,09	0,16	0,20

Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de precipitación en la zona (p), en la cuenca aferente, como variable independiente y la concentración SST en cada sección como variable dependiente. Los valores de la precipitación se establecieron según clases entre 400 y 1300 mm/año, a partir del histórico en la cuenca aferente (véase capítulo 3, Clima) en los últimos 39 años. El análisis de sensibilidad permitió verificar la influencia del ciclo hidrológico en las concentraciones de SST en las secciones del humedal, y confirmar la solidez del modelo en tanto que este refleja la relación existente entre la precipitación, el ciclo hidrológico, la descarga de agua al humedal y la concentración de SST. Se evidencia que al aumentar la descarga de la cuenca afrente aumenta la concentración SST en todas las secciones del humedal, pero este fenómeno se manifiesta con una intensidad diferente en cada una.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

En la figura 6.6 y en la tabla 6.4 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST; el menor valor de concentración se encuentra en la clase de 400 mm de precipitación y oscila entre 42,2 y 53,4 mg/l, que corresponde al promedio de un año seco. Entre las clases de 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 48,7 y 56,2 mg/l, y en condiciones de altas precipitaciones, entre 1100 y 1300 mm, varía entre 58,3 y 59 mg/l. Las curvas de concentración muestran un patrón coincidente con el ciclo hidrológico.

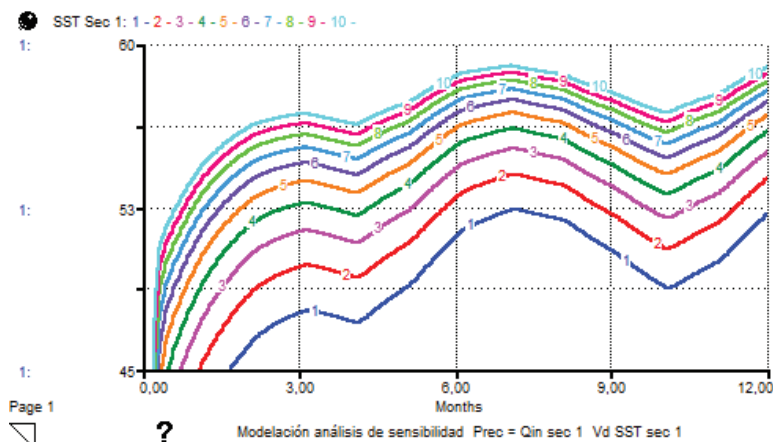
Sección 2, zona de transición (tercio medio)

En la figura 6.7 y en la tabla 6.5 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST. El menor valor de concentración se encuentra en el nivel 400 mm de precipitación y oscila entre 31,7 y 44 mg/l, que corresponde al promedio de un año seco. Entre las clases de 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 39,7 y 56,2 mg/l, y en condiciones de altas precipitaciones, entre 1100 y 1300, varía entre 56,4 y 46,1 mg/l. Al igual que la anterior sección, la concentración de los SST mantiene un patrón coincidente con el ciclo hidrológico.

Tabla 6.4. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 1

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm - niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Enero	42,35	44,98	47,05	48,7	50,06	51,19	52,14	52,96	53,67	54,28
Febrero	46,22	48,54	50,31	51,72	52,85	53,78	54,56	55,22	55,79	56,29
Marzo	47,67	49,8	51,43	52,7	53,73	54,58	55,29	55,89	56,41	56,86
Abril	47,18	49,28	50,89	52,16	53,2	54,05	54,77	55,39	55,92	56,38
Mayo	48,77	50,77	52,29	53,48	54,44	55,23	55,88	56,44	56,92	57,34
Junio	51,23	53,04	54,38	55,42	56,24	56,91	57,46	57,93	58,33	58,67
Julio	52,37	54,01	55,23	56,16	56,9	57,5	58	58,42	58,78	59,08
Agosto	51,96	53,57	54,78	55,71	56,46	57,07	57,58	58,01	58,38	58,7
Septiembre	50,5	52,19	53,48	54,5	55,32	55,99	56,56	57,05	57,47	57,83
Octubre	48,83	50,65	52,06	53,17	54,09	54,84	55,48	56,03	56,51	56,92
Noviembre	49,93	51,73	53,11	54,19	55,06	55,79	56,39	56,9	57,35	57,73
Diciembre	52,21	53,86	55,09	56,04	56,8	57,41	57,92	58,35	58,71	59,03

Figura 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 1



Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

En la figura 6.8 y la tabla 6.6 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST. El menor valor de concentración se encuentra en la clase de 400 mm de precipitación y oscila entre 29,6 y 42,2 mg/l, que corresponde al promedio de un año seco. Entre las clases 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 37,5 y 50,4 mg/l, y en condiciones de altas precipitaciones entre las clases 1100 y 1300 varía entre 45 y 55,3 mg/l. Al igual que la anterior sección, la concentración de los SST mantiene un patrón coincidente con el ciclo hidrológico.

Se infiere que para todas las secciones y aun en condiciones de bajas precipitaciones, las concentraciones de SST se encontrarían entre 44 y 53 mg/l, esto indica la permanencia de las condiciones de eutrofia, que tienden a incrementarse en la medida en que aumenta la descarga de la cuenca aferente. El análisis de sensibilidad del modelo reproduce en parte la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST para cada una de las secciones, de allí su importancia en términos predictivos.

Figura 6.7. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 2

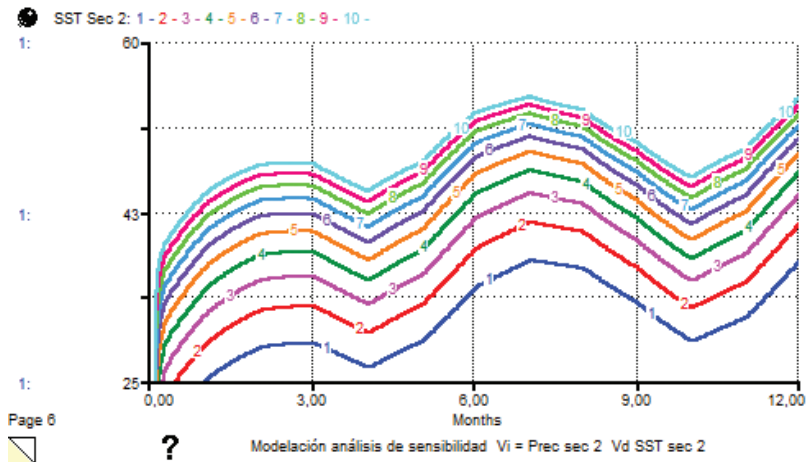


Tabla 6.5. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 2

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm- niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Enero	31,75	34,78	37,32	39,47	41,31	42,91	44,31	45,54	46,63	47,61
Febrero	35,21	38,20	40,66	42,71	44,44	45,93	47,21	48,33	49,32	50,19
Marzo	35,59	38,52	40,91	42,90	44,59	46,03	47,28	48,37	49,33	50,18
Abril	32,78	35,62	37,98	39,97	41,68	43,16	44,45	45,59	46,61	47,52
Mayo	35,76	38,69	41,09	43,08	44,78	46,22	47,48	48,57	49,54	50,40
Junio	41,67	44,59	46,90	48,78	50,32	51,61	52,69	53,62	54,43	55,13
Julio	44,30	47,04	49,18	50,88	52,26	53,40	54,36	55,17	55,86	56,47
Agosto	43,21	45,83	47,89	49,54	50,89	52,02	52,98	53,79	54,50	55,12
Septiembre	39,41	42,02	44,12	45,84	47,29	48,51	49,57	50,49	51,30	52,02
Octubre	35,24	37,87	40,04	41,86	43,41	44,76	45,93	46,97	47,89	48,72
Noviembre	37,93	40,69	42,92	44,78	46,34	47,68	48,84	49,84	50,73	51,52
Diciembre	44,08	46,81	48,95	50,67	52,08	53,24	54,23	55,06	55,78	56,41

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm- niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Promedio	38,08	40,89	43,16	45,04	46,62	47,96	49,11	50,11	50,99	51,77

Figura 6.8. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 3

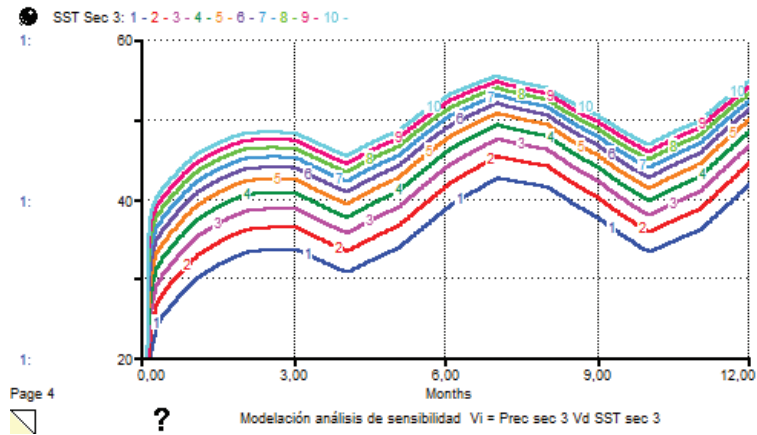


Tabla 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo. Variable independiente precipitación, variable dependiente concentración SST en sec. 3

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm-niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Enero	29,67	32,71	35,30	37,51	39,43	41,11	42,58	43,89	45,06	46,11
Febrero	33,11	36,16	38,71	40,85	42,68	44,26	45,64	46,85	47,92	48,87
Marzo	33,48	36,47	38,95	41,04	42,82	44,36	45,70	46,88	47,92	48,85
Abril	30,64	33,51	35,93	37,99	39,77	41,32	42,69	43,91	44,99	45,97
Mayo	33,58	36,58	39,07	41,17	42,96	44,50	45,85	47,04	48,08	49,02
Junio	38,77	41,83	44,31	46,35	48,05	49,49	50,71	51,77	52,69	53,50
Julio	42,55	45,50	47,82	49,70	51,23	52,51	53,59	54,50	55,29	55,97
Agosto	41,44	44,24	46,46	48,26	49,74	50,99	52,04	52,95	53,74	54,43

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm-niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Septiembre	37,54	40,27	42,49	44,32	45,87	47,19	48,33	49,33	50,21	51,00
Octubre	33,26	35,96	38,20	40,10	41,72	43,14	44,39	45,49	46,47	47,36
Noviembre	35,91	38,76	41,09	43,05	44,72	46,15	47,39	48,48	49,45	50,31
Diciembre	41,74	44,65	46,97	48,85	50,41	51,71	52,82	53,77	54,59	55,31
Promedio	35,97	38,89	41,28	43,27	44,95	46,39	47,64	48,74	49,70	50,56

Discusión

En condiciones de altas precipitaciones, cuando disminuye el tiempo hidráulico de retención, aumenta la concentración de SST, que se transportan a través del humedal y se depositan en el tercio bajo, ocasionando procesos de sedimentación importantes en la zona más conservada. En la primera sección los valores modelados fluctuaron entre 85 y 101 mg/l, con un promedio de 65,12 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 8 y 9 días/año. En la segunda varían entre 57 y 69 con un promedio de 50 mg/l y un tiempo hidráulico entre 20 y 23 días/año, y en la tercera sección van entre 56 y 67 mg/l con un promedio de 48,8 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 24 y 26 días/año.

En condiciones de verano, cuando disminuye la descarga de la cuenca aferente y aumenta el tiempo hidráulico de retención, disminuye la concentración de SST y el transporte entre las secciones del humedal. En la primera sección los valores modelados fluctuaron entre 34 y 59 mg/l con un promedio de 65,12 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 24 y 15 días año. En la segunda sección oscilaron entre 18 y 48 mg/l con un promedio de 50 mg/l y un tiempo hidráulico entre 58 y 38 días año, y en la tercera sección variaron entre 14 y 46 mg/l con un promedio de 48,8 mg/l y un tiempo hidráulico de retención entre 68 y 44 días año. Rivera (2011) y Mejía (2011) reportan que los sólidos suspendidos en el humedal Jaboque disminuyen en las épocas secas y aumentan en la temporada invernal, confirmando la influencia del ciclo hidrológico en este fenómeno.

Los resultados de la modelación dinámica corroboraron que en el humedal Jaboque existe una dependencia entre las concentraciones de SST y el ciclo hidrológico, insinuando que la concentración de los SST depende más de la descarga del tributario, que de la producción autóctona. Este fenómeno se encuentra influenciado por el tiempo hidráulico de retención, que cuando disminuye aumenta la

descarga y se incrementa la velocidad de transporte de partículas a través de cada sección. Ello da como resultado que la última sección del sistema, la más conservada, recibe una mayor cantidad de SST y se afecta con mayor intensidad este tercio, lo que ocurre en épocas de mayores precipitaciones.

En épocas secas la tendencia es inversa, el tiempo hidráulico de retención aumenta y las concentraciones de SST disminuyen en todas las secciones del humedal, porque disminuye la descarga de la cuenca aferente. Se corrobora así la influencia del ciclo hidrológico en los SST, es decir, en los meses de mayor precipitación se aumentan los SST y en verano disminuyen. Hernández *et al.* (2008) reportan que en épocas de estiaje o verano hay más altas concentraciones de sólidos suspendidos, situación contraria a otros estudios, y relacionan el fenómeno con las condiciones hidrológicas. Velázquez *et al.* (2007) y Montoya y Aguirre (2010), quienes han estudiado las ciénagas colombianas de Colombia, en Caucasia (Antioquia) y Escobillitas (Córdoba), respectivamente, expresan que los sólidos suspendidos disminuyen en épocas de verano y aumentan en invierno. Jørgensen (2003) sugiere que a mayores descargas de la cuenca aferente se transporta mayor cantidad de material, pero a su vez los tiempos hidráulicos de retención disminuyen, generando un fenómeno de lavado en la cubeta.

El análisis de sensibilidad del modelo reproduce en parte la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST, para cada una de las secciones, de allí su importancia en términos predictivos.

Es de anotar que para todas las secciones y aun en condiciones de bajas precipitaciones (<500 mm año) la concentraciones de SST se encontrarían entre 44 y 53 mg/l, lo que indicaría un estado eutrófico para todo el humedal, condición que tiende a incrementarse en la medida en que aumenta la descarga desde la cuenca aferente.

La pruebas para verificar la capacidad de predicción del modelo, su fortaleza y los análisis de sensibilidad permiten afirmar que la estructura y las variables de este reproducen de manera general el comportamiento de los SST del humedal Jaboque, ello significa que este se podría generalizar con los debidos ajustes para conocer sobre este material en otros humedales del Distrito Capital y del área de influencia del río Bogotá, especialmente.

Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque

Resumen

Se presenta un modelo de simulación dinámico para explicar en general la producción primaria fitoplanctónica (Ppf) en el humedal de Jaboque, en tres secciones con características físicas y químicas diferentes. El modelo tiene en cuenta las variables fisicoquímicas, área de la cubeta, profundidad, precipitación media anual, temperatura del agua, pH y concentración de clorofila_a. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales y se utilizó el método Euler de integración, la modelación se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1. El modelo permite cuantificar la producción primaria fitoplanctónica del humedal de Jaboque a partir de la concentración promedio mensual de clorofila_a, para cada sección. Los resultados de la modelación mostraron en la primera sección un valor máximo de la Ppf de $70,29 \text{ mgCm}^{-3}$ en enero y mínimo de $16,02 \text{ mgCm}^{-3}$ en junio, con un promedio de $35,1 \text{ mgCm}^{-3}$. Para la segunda sección el valor máximo fue de $77,8 \text{ mgCm}^{-3}$ en enero y $24,85 \text{ mgCm}^{-3}$ en mayo, con un promedio de $39,17 \text{ mgCm}^{-3}$. En la tercera sección el valor máximo fue $15,96 \text{ mgCm}^{-3}$ en febrero, el mínimo $4,15 \text{ mgCm}^{-3}$ en mayo y el promedio $7,79 \text{ mgCm}^{-3}$.

Esto pone de manifiesto que las variaciones de la concentración de la Ppf en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación. Se encontró un alto grado de correspondencia entre los valores de clorofila_a de campo y la Ppf modelada de la siguiente manera: $r^2 = 0,86$ para la primera sección y $r^2 = 0,86$ y $r^2 = 0,79$ para las secciones restantes. La determinación del error relativo fue de 0,57 para la primera sección y 0,35 y 0,46 para la segunda y la tercera. Ello indica que los resultados no están sobrestimados. El modelo muestra en líneas generales los aspectos funcionales de la Ppf y su relación con el proceso de eutrofización y permite hacer recomendaciones para el manejo y restauración del humedal.

Introducción

En los lagos la producción primaria puede considerarse de dos modos, la que se produce dentro del mismo lago (producción primaria autóctona) y la que llega al sistema luego de haber sido sintetizada en áreas diferentes (producción primaria alóctona). En los ecosistemas acuáticos las microalgas y las cianobacterias constituyen el primer eslabón de la cadena trófica (Grimshaw *et al.*, 1997). En su condición de productor primario, el fitoplancton permite la entrada de energía al sistema (Gómez *et al.*, 2001). La producción primaria está determinada por la cantidad de luz, CO₂ y la variación de formas nitrogenadas y fosfatadas.

Según la cantidad de nutrientes disueltos los ecosistemas acuáticos pueden ser calificados como oligotróficos, con pocos nutrientes y por lo tanto con baja producción primaria, o en el otro extremo, hipereutrófico, en donde la generación continua de biomasa, principalmente de fitoplancton, genera problemas en los flujos energéticos (Contreras *et al.*, 1997). En los humedales gran parte de la materia orgánica proviene de la fotosíntesis de las plantas superiores, tanto flotantes como sumergidas, y de las algas.

Las altas tasas de productividad primaria en algas y cianobacterias son posibles debido al continuo reciclaje interno de gases y de nutrientes (carbón, nitrógeno, fósforo y otros), producido por la relación mutualista con bacterias, hongos y protistas heterotróficos, que se encargan de los detritos. En los humedales, donde el flujo de agua es mínimo, la mayoría de la materia orgánica en partículas permanece cerca o en los sitios de producción y los nutrientes son reciclados y retenidos por la microbiota allí presente a medida que la materia orgánica se descompone (Grimshaw *et al.*, 1997).

La productividad y la absorción de nutrientes están influenciadas por parámetros hidrológicos como el nivel del agua y el pulso de la inundación. Las fluctuaciones en el nivel del agua influyen en la productividad y en la absorción de nutrientes. La entrada de agua al humedal por periodos puede traer consigo un aumento en la concentración de nutrientes y materia orgánica, que actúan como fertilizantes. La profundidad del agua, los patrones de su flujo y la duración y la frecuencia de las inundaciones, resultado de todas las entradas y salidas de agua, influyen en la bioquímica de los sustratos y el ciclo de los nutrientes y son el mayor factor de selección de la biota de los humedales. La hidrología es probablemente el determinante más importante en el establecimiento y mantenimiento de los diferentes tipos de humedales y sus procesos (Mitsch y Gosselink, 2007).

La cantidad de clorofila es proporcional a la cantidad de fitoplancton y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua. Como tal, la concentra-

ción de clorofila_a (Ryding y Rast, 1989), y la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson y Boulion, 2003) pueden ser usadas como indicadores apropiados para determinar el grado de eutrofización en lagos y humedales (tabla 7.1).

Tabla 7.1. Estado trófico basado en la concentración de clorofila_a y la producción primaria

Estado trófico	Chl_a/mg/m ³	Producción primaria fitoplancton mgC m ³ *año
Oligotrófico	<2.5	<30
Mesotrófico	2-8	25-60
Eutrófico	6-35	40-200
Hipertrófico	30-400	130-600

Fuente: Håkanson y Boulion, 2003.

Castillo (2000) estudió la productividad y la biomasa fitoperifítica en los lagos Yahuaraca y Tarapoto en el Amazonas, mediante el sistema de sustratos artificiales. Los factores que inciden en la producción y biomasa fitoperifítica de los sustratos artificiales son principalmente el periodo hidrológico, el tiempo de colonización y la profundidad, factores que en conjunto determinan la mayor o menor productividad primaria de la comunidad. Roldán *et al.* (2000) encontraron en el embalse del Guavio valores muy bajos de clorofila_a, los cuales son propios de aguas oligotróficas. Dichos valores reflejan la influencia negativa de los elementos en suspensión dentro del embalse. Aunque estos resultados son negativos desde el punto de vista de la productividad biológica, se consideran positivos para la vida útil del embalse, ya que mientras sean pocas las posibilidades de eutrofización mayor será la calidad del agua que utilizan las turbinas.

Según Neiff (2001), la disponibilidad, fluctuación y circulación del agua determinan la concentración de nutrientes, que son vitales para la producción primaria. Además de energía solar, agua y dióxido de carbono, las plantas requieren una serie de elementos minerales para el proceso de fotosíntesis. Entre estos nutrientes, que suelen encontrarse en proporciones limitadas en el agua, están el nitrógeno y el fósforo. Duarte (2004) caracterizó la productividad primaria y la biomasa del fitoplancton en la laguna de Guatavita (Cundinamarca, Colombia), y encontró que la productividad primaria y la biomasa estaban influenciadas por la distribución vertical de cationes minoritarios, la temperatura del agua, la transparencia, la luz y la velocidad del viento, aunque no encontró una relación clara. Por otra parte, la producción primaria no varió de manera significativa temporal ni verticalmente en la columna de agua.

Zapata (2001) estudió las variaciones diarias y mensuales de la producción primaria del lago andino de Guatavita (Cundinamarca, Colombia), y encontró que se presentan periodos de estratificación entre enero y junio y de mezcla entre julio y septiembre. La producción primaria se relaciona con estos periodos de estratificación y mezcla, el comienzo del periodo de mezcla origina un aumento en la concentración de nutrientes que se relaciona con los valores más altos de producción primaria. Jiménez (2006) registró las variaciones diarias de la producción primaria y la concentración de la clorofila en el lago Guatavita y encontró que la producción primaria no presentó diferencias significativas a lo largo del estudio, sin embargo observó que responde sensiblemente a las variaciones durante el día, debido a que manifiesta una fuerte dependencia de la luz solar, la cual tiene cambios importantes, pero no en periodos largos.

Zubiría y Rivera (2005) evaluaron la producción primaria neta y la descomposición de *Eichhornia crassipes*, *Pennisetum clandestinum*, *Polygonum punctatum*, *Schoenoplectus californicus* y *Typha latifolia* en el humedal Juan Amarillo. Encontraron que todas las especies presentaron un incremento en la altura, cobertura y número de individuos a lo largo del tiempo de muestreo. La biomasa también varió según la forma de crecimiento de cada especie, además, se encontraron diferencias en la descomposición de cada una debido a las variaciones en la constitución de sus tejidos.

Ramírez y Alcaráz (2002) estudiaron la dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en la laguna del Parque Norte en Medellín, y encontraron que la eficiencia fotosintética de la comunidad en la conversión de luz en biomasa mostró una variación medianamente alta y los cocientes P/R (producción/respiración) y R/B (respiración/biomasa) presentaron importantes diferencias en el ciclo anual.

Pinilla (2006) evaluó y comparó la eficiencia fotosintética en un lago amazónico (Boa) y en un lago andino (Guatavita). Los resultados mostraron que las eficiencias varían entre ecosistemas y entre épocas de muestreo. La eficiencia fotosintética fue menor en el lago Guatavita seguramente por las condiciones climáticas, de altura sobre el nivel del mar y de estratificación. Rodríguez-Chila *et al.* (2009) estimaron la producción primaria fitoplanctónica en el Complejo Pajarales (CP) con el fin de evaluar los posibles efectos de la recomunicación del río Magdalena con su antiguo delta. Los resultados mostraron un aumento significativo de la producción primaria neta con relación a los años anteriores, impulsada principalmente por el amonio, sin encontrar relación significativa con la transparencia del agua y la clorofila_a.

Montoya y Aguirre (2010) estudiaron la dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (Ciénaga Escobillitas, Antioquia) a lo largo del

pulso de inundación. Los resultados mostraron una relación entre la variación en la producción primaria y el pulso de inundación, y que el sistema acuático oscila entre euproductivo y oligoproductivo, lo cual es indicador de una alta dinámica trófica.

Contreras-Espinosa *et al.* (2005) estudiaron el hecho de que la Laguna de la Mancha, ubicada en el Golfo de México, sea intermitente, ya que está a veces abierta al mar a través del cierre de la boca regulada por la marea. Concluyeron que cuando está cerrada la eficiencia fotosintética es mayor y a su vez genera elevados valores de producción primaria.

Modelos dinámicos de producción primaria

Tangirala *et al.* (2003) desarrollaron un modelo de simulación dinámica para determinar la biomasa fitoplanctónica y el estado trófico en el tiempo, con el fin de proponer estrategias de manejo y control de la eutrofización, utilizando el *software* Stella. Boulion y Håkanson (2003) presentan un modelo dinámico para predecir la producción de bacterias, plancton y biomasa en humedales en San Petersburgo, Rusia, que desarrollaron con base en submodelos de fragmentación de un modelo en un ecosistema de lago más complejo. La red trófica del lago está basada en nueve grupos funcionales: bacterias (bacterioplancton), fitoplancton, dos tipos de zooplancton (herbívoros y depredadores), dos tipos de peces (presa y predador) como también los zoobentónicos, macrófitos, y algas bentónicas. El modelo usa ecuaciones diferenciales ordinarias, proporciona semanalmente variaciones y muestra de manera general interacciones bióticas y abióticas. El modelo dinámico no ha sido calibrado de forma tradicional, sino que se han usado regresiones empíricas basadas en datos provenientes de distintos lagos. La principal función de este modelo es capturar funciones típicas y patrones estructurales.

Håkanson y Boulion (2003) desarrollaron un modelo dinámico para predecir la biomasa y la producción de fitoplancton en lagos como parte integral del modelo general LakeWeb, que pretende registrar todas las interacciones bióticas y abióticas para calcular la biomasa del fitoplancton, la producción inicial y el consumo de este por el zooplancton en kilogramos por semana. Al igual que el modelo anterior, no lo probaron de manera tradicional usando datos de campo de investigaciones previas, sino que utilizaron regresiones basadas en datos de varios lagos. El objetivo era tener la estructura general y las características funcionales relevantes para esta parte de la cadena trófica. El modelo hace predicciones que concuerdan con los valores obtenidos en las regresiones.

Rivera (2006) desarrolló modelos sobre la base de la correlación entre condiciones físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita. Los resultados mostraron

que la producción primaria a escala mensual está determinada por la compleja interacción entre la radiación incidente, el aumento de nutrientes y la reducción de la transparencia. A continuación se muestra la tabla 7.2 que resume los modelos dinámicos sobre producción primaria en humedales.

Tabla 7.2. Resumen de los modelos dinámicos de fósforo en humedales

Modelo	Objetivo	Resultado
Boulion y Håkanson (2003)	Predecir la producción de las bacterias, de plancton y de biomasa en humedales en San Petersburgo, Rusia	La red trófica del lago está basada en nueve grupos funcionales: bacterias (bacterioplancton), fitoplancton, dos tipos de zooplancton (herbívoros y depredadores), dos tipos de peces (presa y predador) como también los zoobentónicos, macrófitos, y algas bentónicas. El modelo usa ecuaciones diferenciales ordinarias, proporciona semanalmente variaciones y muestra de manera general interacciones bióticas y abióticas. Este no ha sido calibrado ni testado de forma tradicional, sino que se ha hecho usando regresiones empíricas basadas en datos provenientes de distintos lagos. La principal función de este modelo es capturar funciones típicas y patrones estructurales en varios lagos.
Håkanson y Boulion (2002)	Tener la estructura general y las características funcionales relevantes para biomasa y producción de fitoplancton en lagos.	Al igual que el modelo anterior, no fue probado de manera tradicional usando datos de campo de investigaciones previas, sino con regresiones basadas en datos de varios lagos. El modelo da predicciones que concuerdan con los valores obtenidos en las regresiones.
Tangirala <i>et al.</i> (2003)	Predecir la producción primaria fitoplanctónica en un lago y determinar el estado de eutrofización a partir de las concentraciones de clorofila y la cantidad de biomasa de fitoplancton.	La producción primaria fitoplanctónica se simuló a partir de las concentraciones de clorofila _a . Los análisis de sensibilidad se utilizaron para predecir estados tróficos.
Rivera (2006)	Correlacionó la producción primaria y la biomasa fitoplanctónica con las variables físicas y químicas de la columna de agua.	La producción primaria a escala mensual está determinada por la compleja interacción entre la radiación incidente, el aumento de nutrientes y la reducción de la transparencia. Las variaciones diarias en la radiación y los nutrientes tienen efectos significativos distintos sobre la producción primaria, la clorofila _a y la eficiencia de la comunidad según las condiciones de cada periodo.

Estructura del modelo de simulación dinámica

La producción primaria fitoplanctónica se considera como la cantidad de materia orgánica sintetizada por organismos autotróficos en una unidad de tiempo determinada. Los valores de la producción primaria fitoplanctónica son medidos en unidades de energía o masa de carbón orgánico (C) y se utiliza frecuentemente para estimar la productividad biológica o el estado trófico de los cuerpos de agua (Håkanson y Boulion, 2002).

La cantidad de clorofila_a en el agua es correspondiente con la cantidad de fitoplancton (Håkanson y Peters, 1995; Wetzel, 2001; Gocke *et al.*, 2003; Mitsch y Gosselink, 2007). La cantidad de fitoplancton es proporcional al estado trófico de los cuerpos de agua. Se puede utilizar la concentración de clorofila_a y su equivalente en mgC/m³ para establecer la producción primaria fitoplanctónica. Para estimar la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque se elaboró un modelo de simulación dinámico basado en el principio de balance de masas, que permite relacionar la concentración de clorofila_a con la producción primaria fitoplanctónica expresada en unidades de C mg/m³ (Håkanson y Boulion, 2003; Rivera, 2006).

Método de simulación

La modelación se llevó a cabo con el *software* Stella 9.1®, utilizado en modelaciones hidrológicas y ecológicas (Duever *et al.*, 1988; Jørgensen y Bendricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jørgensen, 2008) entre otros. Se utilizó el sistema de interfaz para predecir la productividad primaria a partir de las concentraciones promedio de clorofila_a para cada sección; de igual manera se usó para hacer los análisis de sensibilidad del modelo relacionando la precipitación con la productividad primaria fitoplanctónica y así poder determinar el estado trófico del humedal (tabla 7.3).

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos. Para cada una de las variables se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B4). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones de la Ppf y el estado trófico del humedal en sus tres secciones. Con el fin de verificar el carácter determinístico del modelo y validarlo se hicieron regresiones simples lineales (Legendre y Legendre, 1998; Rivera, 2006) entre los valores de clorofila_a y la Ppf, que permitieron comparar los valores estimados según análisis de laboratorio con los resultados modelados. Con el fin de evaluar la fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007; Jørgensen y Bendricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Håkanson, 2004) y para evidenciar el carácter predictivo se analizó su sensibilidad (Håkanson, 2004; Jørgensen, 2008).

Variables del modelo

Tabla 7.3. Variables utilizadas en el modelo

Variables e índices	Valores/ unidades	Fuente
Profundidad de la sección	M	Instituto de Ciencias Naturales, Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación, Universidad Nacional de Colombia.
Precipitación	mm/año	Ideam
Área sección	m ²	Instituto de Ciencias Naturales, Grupo de Investigación, Biodiversidad y Conservación, Universidad Nacional de Colombia.
Volumen	Mm	Datos de campo, U. Nacional, simulación.
Temperatura	Grados Celsius	Instituto de Ciencias Naturales, Grupo de Investigación, Biodiversidad y Conservación, Universidad Nacional de Colombia.
Concentración de clorofila _a	mg/m ³	Instituto de Ciencias Naturales, Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación, Universidad Nacional de Colombia.
Tasa renovación fitoplancton	kg wwC/ m ³ /t	Håkanson y Boulion (2003).
Tasa de producción de fitoplancton	mgC/m ³ /t	Håkanson y Boulion (2003).
Concentración de fitoplancton	mgC/m ³ ,año	Simulado
Producción primaria inicial	kg ww C/ m ³ ,año	Simulado
Producción primaria fitoplanctónica biomasa	kg ww C/m ³ ,año	Simulado

Supuestos del modelo

El modelo toma los siguientes supuestos, con el fin de delimitar su alcance y posterior generalización o aplicación:

- La carga (Ci) de clorofila_a se calcula a partir del punto de entrada de cada sección.

- Los datos de la concentración de clorofila_a (Chl_a) disponibles corresponden a un año de muestreo, que representa los periodos hídricos invierno-verano (Álvarez, 2005).
- En la modelación del estado trófico del humedal se tuvo en cuenta la concentración de Chl_a.
- La modelación tuvo en cuenta los promedios mensuales de Chl_a encontrados en las zonas de flujo de entrada a cada sección.
- De acuerdo con la zonificación del humedal Jaboque, se tienen tres secciones con características morfométricas, físicas y biológicas propias.
- El modelo hace referencia a la producción primaria fitoplanctónica.

El modelo de simulación

A partir de la relación existente entre la concentración de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica (calculada como mgC/m³/año), se calculó la producción primaria fitoplanctónica, y de acuerdo con Håkanson y Boulion (2002) se utilizaron los siguientes algoritmos:

$$Ppf = (2.13 * Chl_a^{0.25} + 0.25)^4 \quad (1)$$

Ppf = Producción primaria fitoplanctónica calculada como mg/m³/mes.

Chl_a = Concentración de clorofila_a en mg/m³.

Haciendo la transformación logarítmica (Håkanson y Boulion, 2002):

$$\log(Ppf) = 0.97 \cdot \log * \log (Chl_a + 2.49) \quad (2)$$

$$Ppf = 30.6 * Chl^{0.927} \approx 30 * Chl_a \quad (3)$$

$$Bm(t) = Bm_u(t - dt) + (IPR - El) * dt \quad (4)$$

Bm = Biomasa de producción primaria por unidad en kg w.

IPR = Producción primaria inicial en kg ww * semana.

El = Tasa de renovación de organismos consumidores kg ww*semana (Håkanson y Boulion, 2003).

$$Ppf = (30.6 * Chl_a^{0.927}) * 0.45 * 30 * Area * Z * 0.01 * \left(\frac{RWT+0.1}{17} \right) * BMp/BMf \quad (5)$$

Ppf =	Producción primaria inicial (kg ww/semana).
Chl =	Promedio mensual de concentración de clorofila_a (mg/m ³).
Chl_a =	0,927*30,6 = Patrón de conversión de Chl en producción primaria fitoplanctónica en (Cmg/m ³ /d).
0,45 =	Factor de conversión estándar para transformar Cg semana a g dw/mes
Área =	Área de la cubeta.
Z =	Profundidad promedio.
RWT =	Temperatura media de referencia.
BMp/BMf =	Relación entre la biomasa de las entradas de plancton y la biomasa calculada de fitoplancton. El rango de esta relación es aproximado a 0,25 (Håkanson y Boulion, 2003).

Resultados

La clorofila_a en el humedal de Jaboque

Las variaciones de la concentración de la clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan en cada una de las secciones, y en los lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que en la tercera tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y segunda secciones reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente (Fraile, 1995; Håkanson y Boulion, 2002).

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 18,9 y 25,5 mg/m³; en agosto y septiembre estuvo entre 19,5 y 15,3 mg/m³, y en diciembre fue de 15,3 mg/m³. En meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 6,6 y 11,4 mg/m³ y en octubre y noviembre oscilaron entre 9,3 y 14,4 mg/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 14,8 mg/m³ y la desviación estándar fue de 5,89, que denotan una variación alta, la cual podría deberse a las variaciones del hidroperiodo.

Sección 2, zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 34,2 y 22,5 mg/m³, en agosto y septiembre estuvo entre 18,6 y 15,9 mg/m³ y en diciembre fue de 22,87 mg/m³. En los meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 12,6 y 11,1 mg/m³ y en octubre y noviembre oscilaron entre 11,7 y 10,5 mg/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 17,9 mg/m³ y la desviación estándar fue de 7,3, lo que muestra una variación alta, el mismo patrón de la primera sección del humedal.

Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 7,8 y 5,3 mg/m³, en agosto y septiembre estuvo entre 3,6 y 2,7 mg/m³ y en diciembre fue de 2,8 mg/m³. En los meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 1,95 y 1,7 mg/m³ y en octubre y noviembre estuvieron entre 2,2 y 1,65 mg/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 3,21 mg/m³ y la desviación estándar de 1,87, lo que muestra que existe variación.

En la figura 7.1 se aprecian la curvas 1, 2 y 3 que corresponden a las concentraciones de clorofila_a para cada una de las secciones en su orden, y la curva 4 a la marcha de la precipitación. Nótese el patrón inverso de las curvas de clorofila_a con respecto a la precipitación. Esto indica que la actividad biológica en el humedal se incrementa en las épocas de verano y en invierno disminuye. También se puede apreciar que la curva tres, correspondiente al tercio bajo, no presenta cambios bruscos en comparación con las curvas de las primeras secciones. La desviación estándar es de 1,8, es decir, poca variabilidad para esta sección (tabla 7.4) y las concentraciones son bajas respecto a los primeros tercios, pudiéndose inferir una menor productividad primaria. Estos resultados sugieren que las condiciones climáticas y el hidropериodo influyen en la clorofila_a como lo sugieren Håkanson (1999) y Ryding y Rast (1989). Jiménez (2006) halló para el lago de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) variaciones de clorofila_a debidas a la radiación solar, pero no encontró que estas fueran ocasionadas por el hidropериodo. Montoya y Aguirre (2010) en la Ciénaga Escobillitas (Antioquia), encontraron una relación entre la variación de clorofila_a, la producción primaria y el pulso de inundación.

En la segunda sección del humedal se encontró que los valores de clorofila_a son más altos y tienen una gran variación frente a las secciones 1 y 3, pero de igual manera el patrón corresponde al hidropериodo. Esta variaciones podrían deberse en

principio a las diferencias ocasionadas por las fluctuaciones del agua en la sección, debidas a la construcción de jarillones y la distribución de bolsas de nutrientes.

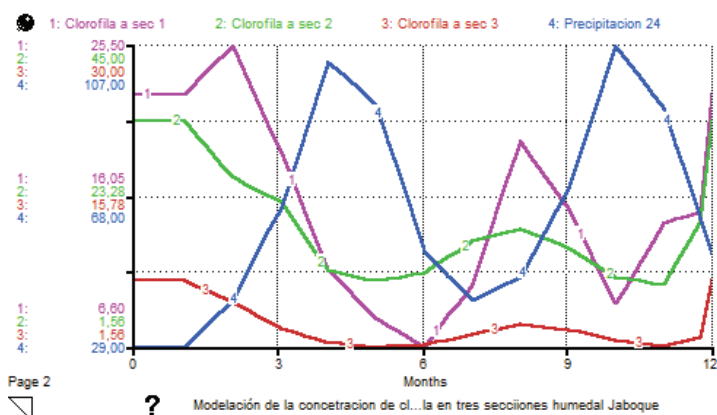
Producción primaria fitoplanctónica

Los resultados de la modelación de la producción primaria del fitoplancton en el humedal Jaboque (mgCm^{-3}), para todas las secciones se presentan en la figura 7.2 y en la tabla 7.4. Se observa que la producción primaria aumenta en los periodos de menores precipitaciones (diciembre a febrero y julio a septiembre) y en los periodos de altas precipitaciones disminuye (abril, mayo, junio y octubre y noviembre). Es innegable una fuerte relación de la actividad biológica con el ciclo hidrológico.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

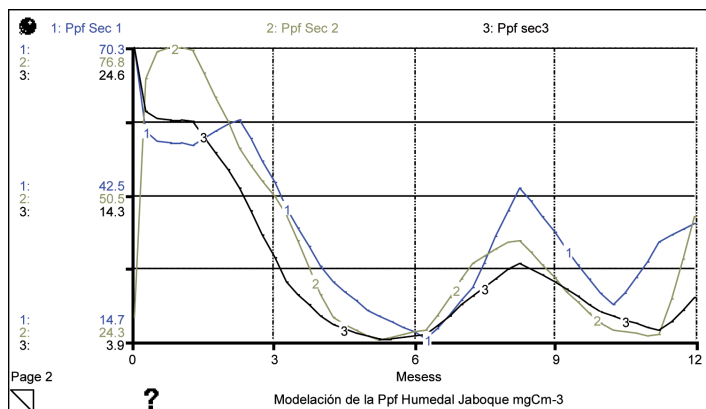
En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la producción primaria fluctuó entre 70,29 y 44,5 mgC/m^3 , en agosto y septiembre entre 21,9 y 39,21 mgC/m^3 y en diciembre fue de 36,8 mgC/m^3 . En los meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 28,5 y 16,7 mgC/m^3 y en octubre y noviembre estuvieron entre 23,3 y 29,53 mgC/m^3 . El promedio para toda la sección fue de 35,10 mgCm^{-3} y la desviación estándar fue de 15,77, es decir, muestra variación.

Figura 7.1. Resultado de la modelación de clorofila_a para el humedal de Jaboque, en las tres secciones



- 1: Clorofila_a a sec. 1 mg/m^3 .
- 2: Clorofila_a a sec. 2 mg/m^3 .
- 3: Clorofila_a a sec. 3 mg/m^3 .
- 4: Precipitación mm año

Figura 7.2. Modelación de la productividad primaria fitoplanctónica para todas la secciones



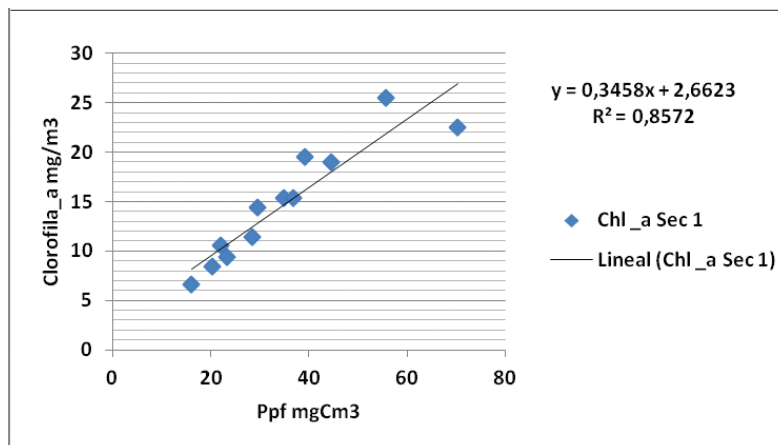
1: Producción primaria fitoplanctónica, sec. 1 $\text{mgCm}^{-3}\cdot\text{año}$.

2: Producción primaria fitoplanctónica, sec. 1 $\text{mgCm}^{-3}\cdot\text{año}$.

3: Producción primaria fitoplanctónica, sec. 1 $\text{mgCm}^{-3}\cdot\text{año}$.

La relación entre los valores de clorofila_a estimados con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson y Boulion, 2003; Kuo *et al.*, 2007) permitieron hacer un análisis de regresión y sus resultados mostraron una buena correspondencia entre los dos grupos: $r^2 = 0,85$; $y = 0,3458x + 2,6623$ (tabla 7.4 y figura 7.3).

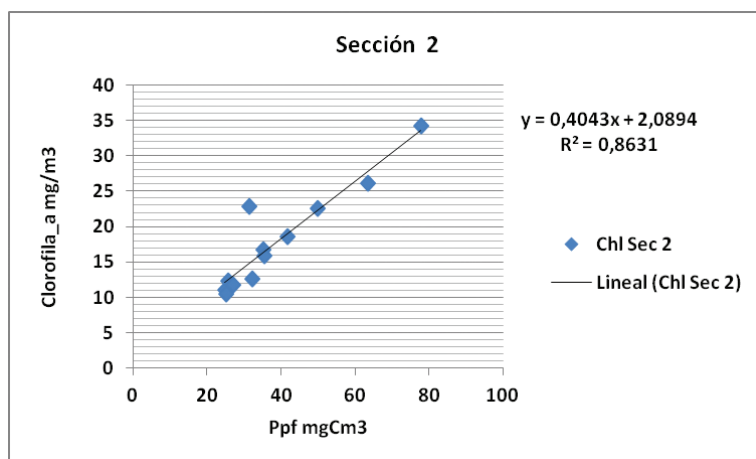
Figura 7.3. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sec. 1



Sección 2, zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la producción primaria fluctuó entre 77,8 y 50,02 mgC/m³, en agosto y septiembre varió entre 41,6 y 35,4 mgC/m³ y en diciembre fue de 31,5 mgC/m³. En los meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 32,2 y 24,8 mgC/m³ y en los meses de octubre y noviembre estuvo entre 27,1 y 25 mgC/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 39,17 mgC/m³ y la desviación estándar fue de 16,73, es decir, muestra variación. La relación entre los valores estimados de clorofila con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (tabla 7.4 y figura 7.4) mostraron que entre los dos grupos existe una buena correspondencia: $r^2 = 0,8631$; $y = 0,4043x + 0,8631$.

Figura 7.4. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sec. 2



Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4) en los meses secos de enero, febrero y marzo la producción primaria fluctuó entre 15,9 y 12,5 mgC/ m³, en agosto y septiembre estuvo entre 8,87 y 7,98 mgC/m³ y en diciembre fue de 7,5 mgC/m³. En los meses de mayores precipitaciones: abril, mayo y junio los valores fluctuaron entre 5,61 y 4,16 mgC/m³, y en octubre y noviembre varió entre 5,92 y 4,76 mgC/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 7,79 mgC/m³ y la desviación estándar de 15,77, es decir, muestra variación. La relación entre los valores de clorofila_a estimados con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson y Boulion, 2003; Kuo *et al.*, 2007) se hizo mediante análisis de regresión y sus resul-

tados mostraron que entre los dos grupos existe una buena correspondencia: $r^2 = 0,792$; $y = 1,6947x + 2,358$ (tabla 7.4 y figura 7.5).

Los resultados anteriores indican que la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica se relacionan con el hidroperiodo y el transporte de nutrientes como lo sugieren Ryding y Rast (1989). Pinilla (2006) encontró un patrón similar en la laguna de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) y en un lago amazónico. Hernández *et al.* (2011) encontraron que en la Ciénaga de Ayapel en Córdoba (Colombia), los nutrientes y la clorofila_a están regulados por el hidroperiodo y el pulso de la inundación.

Tabla 7.4. Resultados de la modelación de Chl_a y la Ppf

Meses	Precipitación	Chl_a sec. 1 mg/m ³	Ppf sec. 1 mgCm ⁻³	Chl_a sec. 2 mg/m ³	Ppf sec. 2 mgCm ⁻³	Chl_a sec. 3 mg/m ³	Ppf sec. 3 mgCm ⁻³
Enero	29	22,5	70,29	34,2	77,8	7,8	12,5
Febrero	41	25,5	55,67	26,1	63,51	5,85	15,96
Marzo	65	18,9	44,5	22,5	50,02	3,3	9,72
Abril	103	11,4	28,55	12,6	32,29	1,95	5,61
Mayo	92	8,4	20,28	11,1	24,85	1,56	4,15
Junio	54	6,6	16,02	12,3	25,73	1,74	4,16
Julio	41	10,5	21,99	16,8	35,15	2,7	6,36
Agosto	47	19,5	39,21	18,6	41,67	3,69	8,87
Septiembre	70	15,3	34,98	15,9	35,39	3,21	7,98
Octubre	107	9,3	23,35	11,7	27,12	2,22	5,92
Noviembre	91	14,4	29,53	10,5	25	1,65	4,76
Diciembre	53	15,3	36,85	22,8	31,5	2,8	7,5
Promedio	66,08	14,80	35,10	17,93	39,17	3,21	7,79
Desviación estándar	26,39	5,89	15,77	7,28	16,73	1,87	3,57

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Håkanson, 2007, Jørgensen y Bendoricchio, 2001) para cada una de las secciones. Con ese fin se compararon los valores medidos de clorofila_a con los valores resultantes de la modelación de la Ppf (tabla 7.5).

El valor promedio del error relativo para el tercio alto es de 1,36, para el segundo tercio de 1,21 y para el tercero de 1,56. Las desviación estándar es de 0,30 para el

primer tercio, 0,29 para el segundo y el tercero de 0,36, cifras que indican que el modelo no tiende a sobreestimar los valores es su predicción.

Figura 7.5. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sec. 3

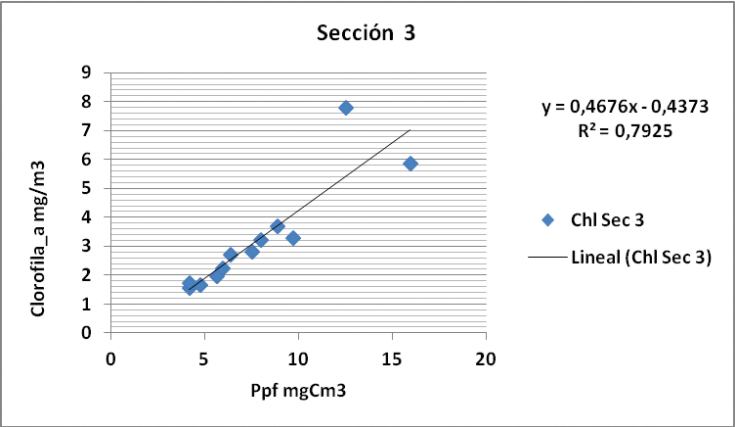


Tabla 7.5. Error relativo entre las secciones del humedal de Jaboque

Meses	Error relativo Sección 1	Error relativo Sección 2	Error relativo Sección 3
Enero	2,12	1,27	0,60
Febrero	1,18	1,43	1,73
Marzo	1,35	1,22	1,95
Abril	1,50	1,56	1,88
Mayo	1,41	1,24	1,66
Junio	1,43	1,09	1,39
Julio	1,09	1,09	1,36
Agosto	1,01	1,24	1,40
Septiembre	1,29	1,23	1,49
Octubre	1,51	1,32	1,67
Noviembre	1,05	1,38	1,88
Diciembre	1,41	0,38	1,68
Promedio	1,36	1,21	1,56
Desviación estándar	0,30	0,29	0,36

Estado trófico (IST) basado en la producción primaria

Los resultados de la modelación permitieron establecer las cantidades de clorofila_a, y debido a que estas son proporcionales a la cantidad de fitoplancton, y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua de acuerdo con Håkanson y Boulion (2003) y Ryding y Rast (1989), se utilizaron para determinar el estado trófico de cada una de las secciones del humedal.

Sección 1, zona intervenida (tercio alto)

Para el tercio alto los resultados de la modelación mostraron un valor promedio anual de clorofila_a de 14,8 mg/m y 35,10 mgCm⁻³*año. De acuerdo con el índice de estado trófico de producción primaria, esta sección se encontraría en condiciones de eutrofia, acentuada en los meses de menores precipitaciones, cuando llegaría a 70,29 mgCm⁻³. En los meses lluviosos tiende a ser levemente mesotrófico, con 16,02 mgCm⁻³.

Sección 2, zona de transición (tercio medio)

En la sección 2 el promedio de la Ppf es de 39,17 mgCm⁻³; esto indica prevalencia de condiciones de eutrofia. A lo largo de todo el año, la atenuación de la condición eutrófica por mayores precipitaciones es apenas perceptible: 25 mgCm⁻³, y para el periodo seco se infirió en 77,8 mgCm⁻³, lo que reafirma la tendencia a condiciones eutróficas.

Sección 3, zona conservada (tercio bajo)

En esta sección el promedio mensual de la producción primaria fue 7,79 mgCm⁻³. En los meses de menores precipitaciones hubo concentraciones hasta de 15,96 mgCm⁻³, y en los de menor producción y mayores precipitaciones fueron de 4,16 mgCm⁻³, manteniendo un estado mesotrófico durante todo el año (tabla 7.4 y figura 7.2).

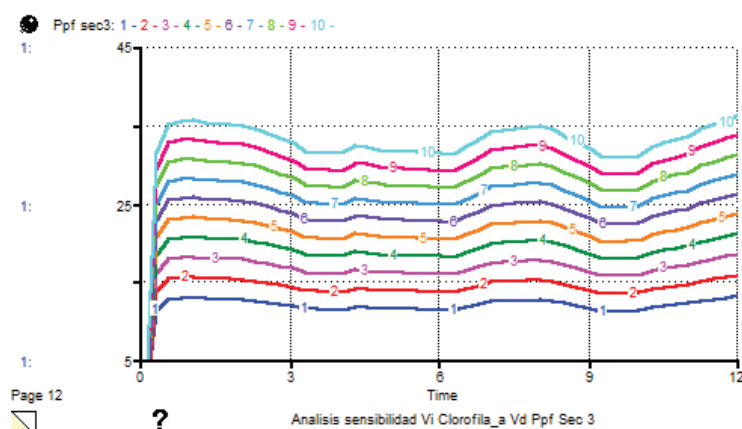
Los resultados anteriores permiten inferir que a mayores descargas de agua de la cuenca aferente es posible disminuir las condiciones de eutrofia en las dos primeras secciones y en la tercera mejorar o disminuir la tendencia a la mesotrofia, como lo sugiere Jørgensen (2003), porque un aumento en la descarga de agua permite el lavado de nutrientes, y mejora las condiciones tróficas, fenómeno similar al observado con el fósforo total en el humedal (capítulo 6).

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad del modelo tuvo en cuenta el promedio anual de la clorofila_a en mg/m³ como variable independiente, expresada en clases entre 4,0 y 18 mg/m³, y como variable dependiente la Ppf expresada en mgCm⁻³.

En la tabla 7.6 y la figura 7.6 se aprecian los resultados de análisis de sensibilidad para la tercera sección. Las curvas de la figura corresponden a los cambios en la Ppf de acuerdo con cada nivel de variación de los valores de clorofila_a entre clases, desde 4 a 18 mg/m³. Las coordenadas señalan el tiempo en meses y la abscisa los valores de Ppf en mgCm⁻³. Se observa que el rango de mesotrofia se encuentra entre la curva 1 a una concentración de clorofila_a de 4 mg/m³ y una Ppf de 9,16 mgCm⁻³, correspondiente a un mes lluvioso, y la curva 6 a una concentración de 11,8 mg/m³ de clorofila_a y una Ppf de 29,1 mgCm⁻³ en la época de verano, lo que indica condiciones mesotróficas. Desde la curva 7 hasta la curva 10 predominan las condiciones eutróficas entre valores de Ppf de 28 mgCm⁻³ en época lluviosa hasta 43 mgCm⁻³ en la curva 10 en verano.

Figura 7.6. Análisis de sensibilidad tercio bajo.
Variable independiente clorofila_a, variable dependiente Ppf



Ppf sec. 1: Productividad primaria fitoplanctónica mgCm⁻³*año.

1, 2, 3...: Niveles de variación de clorofila_a entre 4 mg/m³ y 18 mg/m³.

Los resultados permitieron corroborar la correspondencia entre los valores de clorofila_a y la Ppf. A medida que aumentan las cantidades de clorofila_a aumenta la Ppf, como lo sugieren Wetzel (2001), Gocke *et al.* (2003) y Mitchs y Goselink (2007). Se percibe una fuerte influencia del ciclo hidrológico en la marcha de las dos variables: en las épocas más lluviosas de abril, mayo, junio, octubre y noviembre la Ppf disminuye y aumenta en los periodos secos, como ocurre en el humedal Jaboque (Álvarez, 2005), esto en parte porque la oferta de nutrientes se concentra en las épocas de verano cuando disminuye el volumen de agua, y se diluye cuan-

do aumenta. Los resultados anteriores siguieron que para mantener una condición mesotrófica en el humedal el máximo permisible correspondería 11,8 mg/m³ de clorofila_a con una Ppf de 29,1 mgCm⁻³.

Tabla 7.6. Resultados del análisis de sensibilidad: clorofila_a como variable independiente, Ppf como variable dependiente

Niveles Chl _a mg/m ⁻³	4	5.56	7.11	8.67	10.2	11.8	13.3	14.9	16.4	18.00
Variable Meses	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³	Ppf mgCm ⁻³
Enero	10,51	14,25	17,91	21,52	25,08	28,6	32,08	35,53	38,96	42,37
Febrero	10,32	13,99	17,59	21,13	24,63	28,09	31,51	34,9	38,27	41,61
Marzo	9,67	13,12	16,49	19,81	23,09	26,33	29,53	32,72	35,87	39,01
Abril	9,25	12,54	15,77	18,94	22,07	25,17	28,23	31,27	34,29	37,29
Mayo	9,32	12,64	15,89	19,09	22,24	25,36	28,46	31,52	34,56	37,58
Junio	9,25	12,54	15,77	18,94	22,07	25,17	28,23	31,28	34,29	37,29
Julio	10,09	13,69	17,21	20,67	24,09	27,47	30,82	34,14	37,43	40,7
Agosto	10,28	13,94	17,53	21,06	24,54	27,98	31,39	34,78	38,13	41,46
Septiem- bre	9,42	12,77	16,06	19,29	22,48	25,63	28,76	31,85	34,93	37,98
Octubre	9,16	12,42	15,62	18,76	21,86	24,93	27,97	30,98	33,97	36,94
Noviem- bre	9,93	13,46	16,92	20,33	23,69	27,01	30,3	33,57	36,81	40,03
Diciem- bre	10,72	14,54	18,28	21,95	25,58	29,17	32,73	36,25	39,75	43,23
Prome- dio	9,83	13,33	16,75	20,12	23,45	26,74	30,00	33,23	36,44	39,62
Des- viación estándar	0,55	0,75	0,94	1,13	1,32	1,50	1,69	1,87	2,05	2,23

Análisis de resultados

En la primera sección el valor máximo de clorofila_a es de 25,5 mg/m³ en febrero y el mínimo de 6,6 mg/m³ en junio con un promedio de 14,8 mg/m³. Para la segunda el valor máximo es de 34,2 mg/m³ en enero y 10,5 mg/m³ en noviembre con un promedio de 17,9 mg/m³, y en la tercera sección el valor máximo fue de 7,8 mg/m³ en enero, el mínimo 1,56 mg/m³ en mayo y el promedio 3,21 mg/m³. Ello evidencia que variaciones de la concentración de la clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación. En los meses secos las

concentraciones aumentan en cada una de las secciones y en los lluviosos tienden a descender.

Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que en la tercera las concentraciones de clorofila_a tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y la segunda reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente, sin embargo la segunda es la que presenta los mayores valores de clorofila_a. En la tercera las concentraciones disminuyen de manera significativa, indicio de mejor condición trófica, como lo señala Álvarez (2005).

Los resultados de la modelación de la Ppf mostraron en la primera sección un valor máximo de $70,29 \text{ mgCm}^{-3}$ en enero, y el mínimo, $16,02 \text{ mgCm}^{-3}$, en junio, con un promedio de $35,1 \text{ mgCm}^{-3}$. Para la segunda sección el valor máximo fue $77,8 \text{ mgCm}^{-3}$ en enero y $24,85 \text{ mgCm}^{-3}$ en mayo con un promedio de $39,17 \text{ mgCm}^{-3}$. En la tercera sección el valor máximo fue $15,96 \text{ mgCm}^{-3}$ en febrero, el mínimo $4,15 \text{ mgCm}^{-3}$ en mayo y el promedio $7,79 \text{ mgCm}^{-3}$. Esto pone de manifiesto que variaciones de la concentración de la clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan en cada una de las secciones y en los lluviosos tienden a descender.

Los resultados de la modelación permitieron corroborar que las cantidades de clorofila_a son proporcionales a la Ppf y esta a su vez es proporcional al estado trófico del humedal. Se encontró que existe dependencia entre el ciclo hidrológico y la producción primaria fitoplanctónica como lo señala Álvarez (2005). Este fenómeno es más acentuado en el tercio alto y disminuye gradualmente hacia el tercio bajo. Estos resultados corroboran la relación entre la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica como lo sugieren Ryding y Rast (1989) y como los reportados para la Ciénaga de Ayapel en Córdoba (Colombia) por Hernández *et al.* (2011)

La bondad de predicción del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo con los siguientes valores: 1,36 y 0,3 de desviación estándar en el primer tercio; 1,21 y 0,29 de desviación estándar para el segundo tercio, y para el tercero 1,56 y 0,36, valores cercanos a cero. La correspondencia entre las variables del modelo entre los valores de clorofila_a y los valores simulados de Ppf calculados, mostraron una alta reciprocidad, para el tercio alto de $r^2 = 0,86$; el tercio medio $r^2 = 0,86$, y el tercio bajo $r^2 = 0,78$. Si bien existen diferencias, es posible que se deban al complejo patrón de distribución de nutrientes y a los procesos biogeoquímicos en el humedal (Álvarez, 2005).

El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física como la precipitación, una variable química, la clorofila_a, y una de

tipo biótico, la producción primaria, mostrando el carácter holístico e integrador del modelo (Carpenter y Cottingham, 1997; Boumans *et al.* 2002). También se logró evidenciar la correspondencia entre las variables de entrada y salida del modelo y el carácter predictivo de este. Se demostró que la estructura y las variables del modelo reproducen de manera general la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque.

Se modeló el comportamiento de la Ppf con el fin de relacionarla con el estado trófico del humedal, y se encontró que en la primera sección el índice de estado trófico mostró un promedio anual de 14,8 mg/m³ de clorofila_a, con un valor correspondiente de Ppf de 43,75 mgCm⁻³. Ello indica condiciones de eutrofia, que se acentúan en enero, febrero, marzo, julio, agosto y septiembre, con una leve tendencia a la mesotrofia en los meses de mayores precipitaciones. En la segunda sección y debido a los actuales niveles de concentración de clorofila_a, el índice de estado trófico mostró un promedio anual 18,86 mg/m³ de clorofila_a con un valor promedio de la Ppf de 45,65 mgCm⁻³. En ambos casos se dan las condiciones permanentes de eutrofia para esta sección, la cual tiende a la hipertrofia en los meses más secos. En el tercio bajo el índice de estado trófico mostró un promedio anual de 3,62 mg/m³ de clorofila_a con un valor correspondiente de Ppf de 10,36 mgCm⁻³, que significan condiciones de mesotrofia, con una leve tendencia de la condición oligotrófica de carácter temporal en los meses de mayor precipitación.

De acuerdo con los resultados de la modelación se puede concluir que en el humedal Jaboque la producción primaria es alta en las dos primeras secciones y especial en los meses de menores precipitaciones, y en la tercera la productividad primaria disminuye de manera significativa marcando una diferencia clara entre un estado mesotrófico y el estado eutrófico de las dos primeras secciones. La modelación permitió comprobar la bondad de utilizar indicadores de estado trófico, mostrando el potencial que tienen este tipo de indicadores en la vigilancia y control de la eutrofización.

Aproximación a la modelación dinámica de la producción de biomasa de macrófitas flotantes en el humedal jaboque

Resumen

Se presenta un modelo de simulación dinámica para explicar la producción de biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque, basada en ecuaciones diferenciales. Se utilizó el método Euler de integración y se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1®. El modelo incluye variables fisicoquímicas como la profundidad, el área de la cubeta, la concentración del fósforo total y el pH, que fueron utilizadas para estimar la producción de biomasa de macrófitas y la cobertura sobre el espejo de agua. Los datos fisicoquímicos del agua fueron tomados por el Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, la Empresa de Acueducto de Bogotá y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Se encontró una correspondencia equivalente a $r^2 = 0,57$ entre las dos variables. El análisis de sensibilidad permitió comprobar que existe una relación funcional entre los parámetros físicos, químicos y de biomasa en el humedal. Los valores simulados de producción de biomasa de macrófitas oscilaron entre 881 gr/m² para época de lluvias y 923 gr/m² en los periodos secos. La biomasa de macrófitas tiende a comportarse de acuerdo con la carga de fósforo, que varía según el ciclo hidrológico. El modelo representa una aproximación a la relación entre la carga de fósforo total y la producción de biomasa de macrófitas.

Procesos ecológicos

Las macrófitas son plantas adaptadas para crecer en medios acuáticos o sitios inundados. El término incluye plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos), musgos, hepáticas y algunas algas que tienen un rol muy importante en los ecosis-

temas. Las macrófitas sirven de refugio y alimento a muchas especies de aves, peces, mamíferos y anfibios (Roldán, 1992), ayudan a la depuración de las aguas residuales al tomar nutrientes (nitrógeno y fósforo), a filtrar partículas inorgánicas y orgánicas y a crear una rizófora oxidada (Hunter *et al.* 2000), y también, aumentan la transparencia del agua (Han *et al.*, 2009). En los humedales las macrófitas pueden estar sumergidas, ser emergentes o flotantes y estar en cualquier área que reciba luz solar (Hernández y Rangel, 2009). Las emergentes tienen la capacidad de ventilar la rizófora a través de los tallos lo cual contribuye también a una mayor eficiencia (Asaeda *et al.*, 2008). Las acuáticas son comúnmente utilizadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Las sumergidas se pueden utilizar para la limpieza de las aguas residuales tratadas secundariamente, mientras las emergentes o flotantes pueden utilizarse en el tratamiento de aguas contaminadas (Ennabili *et al.* 1998). Las macrófitas en humedales artificiales proveen una gran superficie para el crecimiento microbiano y suplen de carbono y oxígeno a la rizósfera, disminuyen la velocidad de la corriente y estabilizan la superficie de la cama (Brisson y Chazarenc, 2009).

Las tasas de producción primaria de las macrófitas son altas (Koch *et al.*, 1990). La producción primaria neta anual en humedales de agua dulce a menudo excede los 2000 g/m²/año (Janse *et al.*, 1998). La concentración de los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno determinan de manera significativa la presencia o ausencia de determinadas especies vegetales en un humedal. Se ha demostrado la relación existente entre los parámetros ambientales y la presencia de macrófitas lo cual permite evaluar el estado trófico de un humedal utilizando las plantas acuáticas como bioindicadores (Kiersch *et al.*, 2004).

Modelos dinámicos

En los humedales la dinámica de la vegetación se modela utilizando la historia de vida que fija el establecimiento y persistencia de los individuos de una especie determinada en un ambiente específico (tabla 8.1). Janse *et al.* (1998) utilizaron el modelo PCLake para evaluar el impacto de la herbivoría en la transición de un estado limpio a turbio en el agua de un humedal. El modelo se aplicó a un lago dominado por macrófitas que mostraba signos de eutrofización y reprodujo el proceso. Los resultados mostraron que la transición hacia la dominancia del fitoplancton está fuertemente influenciada por la herbivoría por aves. Shukla (1998) investigó el efecto del crecimiento excesivo de pastos como *Paspalum distichum* sobre el crecimiento de otras macrófitas en un humedal en el Parque Nacional Keoladeo, en Bharatpur, India. Los resultados del modelo muestran que *Paspalum distichum* se extendió

rápidamente por el humedal mientras otras macrófitas quedaron limitadas a pequeños espacios.

Muhammetoğlu y Soyupak (2000) propusieron un modelo para simular la interacción entre macrófitas y calidad del agua. Se observó que la tasa de crecimiento de las macrófitas es el parámetro que más afecta a las otras variables. Aseada *et al.* (2001) desarrollaron un modelo para simular las interacciones entre macrófitas, nutrientes y fitoplancton en lagos con eutrofización y evaluar los impactos ambientales. Cuando se presentaron altas temperaturas el fitoplancton disminuyó y aumentó el crecimiento de las macrófitas, sin embargo cuando aumentó la carga de nutrientes aumentó el fitoplancton y disminuyó la cobertura de las macrófitas (Aseada *et al.*, 2001).

Håkanson y Boulion (2002) desarrollaron un modelo para predecir los cambios en cobertura, biomasa y producción de macrófitas en lagos de Rusia. Los resultados mostraron que aproximadamente el 40 % de la variación en la cobertura de macrófitas en los diferentes lagos se debe a la diferencia en profundidad. La producción de macrófitas depende en gran medida de la temperatura, de las características morfológicas y del sedimento, de la claridad del agua, y en menor medida, de la concentración de nutrientes. Wade *et al.* (2002) desarrollaron un modelo para medir el impacto de la extracción de fósforo durante el tratamiento de aguas residuales sobre el fósforo presente en la corriente y la dinámica macrófitas/algas epífitas en un río.

Baart *et al.* (2010), desarrollaron un modelo para estudiar la diversidad y abundancia de especies de macrófitas con respecto a diferentes parámetros hidrológicos en humedales del río Danubio (Austria). Los resultados mostraron que la diversidad y abundancia de las macrófitas aumentan con la reducción de la velocidad del agua y el aumento del área del humedal.

Tabla 8.1. Resumen de los modelos dinámicos de macrófitas en humedales

Modelo	Objetivo	Resultado
Lung y Light (1996)	Cuantificar el porcentaje de cobre de los efluentes removido por sedimentos y macrófitas.	A medida que aumenta la biomasa de las macrófitas se remueve el cobre del agua. En la descomposición de macrófitas el cobre vuelve al agua.
Aseada y Van Bon (1997)	Describir el desarrollo de macrófitas sumergidas en sitios dominados por fitoplancton.	Cuando la concentración de fósforo aumenta se provoca la pérdida de biomasa del fitoplancton en el agua, y beneficia el desarrollo de las macrófitas sumergidas al tener mejores condiciones de luz.

Modelo	Objetivo	Resultado
Modelo PCLake Janse <i>et al.</i> (1998)	Evaluar el impacto de la herbivoría en la transición de un estado limpio a turbio en el agua de un humedal.	La transición hacia la dominancia del fitoplancton está fuertemente influenciada por la herbivoría por aves.
Shukla (1998)	Estudiar el efecto del crecimiento excesivo de pastos <i>Paspalum distichum</i> sobre el crecimiento de macrófitas en un humedal en el Parque Nacional Keoladeo, Bharatpur, India.	<i>Paspalum distichum</i> se extendió rápidamente por el humedal.
Asaeda <i>et al.</i> (2000)	Evaluar los efectos de la descomposición de las macrófitas en el balance de nutrientes.	El fósforo liberado durante el proceso de descomposición de las macrófitas puede reducirse al menos 75 %.
Muhammetoğlu y Soyupak (2000)	Simular la interacción entre macrófitas y calidad del agua.	La tasa de crecimiento de las macrófitas es el parámetro que más afecta a las otras variables. El modelo puede ser una herramienta de manejo importante para predecir la reducción esperada de las consecuencias indeseadas de la eutrofización.
Aseada <i>et al.</i> (2001)	Simular las interacciones entre macrófitas, nutrientes y fitoplancton en lagos con eutrofización y evaluar los impactos ambientales.	Cuando se presentan altas temperaturas el fitoplancton disminuye y aumenta el crecimiento de las macrófitas, sin embargo cuando aumenta la carga de nutrientes aumenta el fitoplancton y disminuye la cobertura de las macrófitas.
Håkanson y Boulion (2002)	Predecir los cambios en cobertura, biomasa y producción de macrófitas en lagos.	La producción de macrófitas depende en gran medida de las características morfométricas y del sedimento, de la claridad del agua, y en menor medida de la concentración de nutrientes.
Baart <i>et al.</i> (2010)	Estudiar la diversidad y abundancia de especies de macrófitas con respecto a diferentes parámetros hidrológicos en humedales del río Danubio (Austria).	La diversidad y abundancia de las macrófitas se incrementa con la reducción de la velocidad del agua y el aumento del área del humedal.

Estructura del modelo de simulación dinámica

Con el fin de estimar de manera general la biomasa de macrófitas flotantes se elaboró un modelo de simulación dinámico conformado por variables morfométricas

cas: profundidad promedio, área total del humedal, relación profundidad/longitud transversal de la cubeta y variables fisicoquímicas como fósforo total y pH (tabla 8.2) (Håkanson y Boulion, 2002).

Se tuvo en cuenta la estimación del área de macrófitas del estudio de la vegetación del humedal de Jaboque hecho por Hernández y Rangel (2009), quienes estimaron la cobertura de *Echhornia crassipes* en 3,5 hectáreas, que se encuentran distribuidas entre los tercios medio y bajo del humedal y que corresponden al 2 %.

El modelo para la estimación de biomasa de macrófitas

El modelo se basa en la estimación de la producción de biomasa de macrófitas flotantes a partir de la concentración del fósforo total, y se desarrolló a partir de la estimación de la producción inicial de macrófitas (g/m^2 - semana) y biomasa de macrófitas en g/m^2 , de acuerdo con la siguiente ecuación (Håkanson y Boulion, 2002):

$$\text{Prod}_{\text{ini.mac}} = R_{\text{prod}} * \text{Del}_{\text{pH}} * \text{Del}_{\text{TP}} * Y_{\text{temp}} * (\text{Mac}_{\text{cov}} * 0.01) \quad (1)$$

$$\text{BM}_{\text{mac}} = \text{BM}_{\text{mac}}(t - dt) + (\text{Prod}_{\text{ini.mac}} - \text{Des}_{\text{mac}} - \text{Ren}_{\text{mac}}) * dt \quad (2)$$

Variables y tasas de la ecuación según Håkanson y Boulion (2002):

BM_{mac} = Biomasa de macrófitas en g/m^2 .

$\text{Prod}_{\text{ini.mac}}$ = Producción inicial de macrófitas.

Ren_{mac} = Tasa renovación de macrófitas.

R_{prod} = Tasa de producción inicial de macrófitas g/m^2 .

Del_{pH} = Factor de cambio del pH.

Del_{TP} = Factor de cambio de fósforo total Pt.

Y_{temp} = Relación entre T° superficial y T° de referencia.

Mac_{cov} = Cubrimiento de macrófitas en m^2 .

Des_{mac} = Tasa de descomposición de macrófitas g/m^2 .

Variables del modelo

Tabla 8.2. Variables del modelo, unidades y fuentes

Variables e índices	Valores/ unidades	Fuente
Área estimada de macrófitas.	m ²	Hernández y Rangel (2009).
Temperatura superficial.	°C	Grupo de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Instituto de Ciencias, U. Nacional.
pH promedio del humedal.	Unidades	Grupo de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Instituto de Ciencias, U. Nacional.
Fósforo total.	mg/m ⁻²	Grupo de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Instituto de Ciencias, U. Nacional.
Tasa de producción de macrófitas.	g m ⁻² /ww/año	Håkanson y Boulion (2002)
Tasa de renovación de macrófitas.	g m ⁻² /ww/año	Håkanson y Boulion (2002).
Tasa de descomposición de macrófitas.	g m ⁻² /ww/año	Håkanson y Boulion (2002).
Biomasa de macrófitas.	g m ⁻² /año	Modelado
Producción inicial macrófitas.	g m ⁻² /ww	Modelado
Factor de formación de volumen.	g m ⁻² /ww/año	Calculado
Profundidad media.	m	Grupo de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Instituto de Ciencias, U. Nacional.
Tasa de producción de macrófitas.	g m ⁻² /ww	Håkanson y Boulion (2002).

Supuestos del modelo

- Se modela la biomasa de macrófitas flotantes dada la importancia que tienen en los procesos de retención de nutrientes y purificación del agua.
- La modelación de biomasa de macrófitas flotantes es general.
- El área utilizada para modelar la biomasa corresponde a 3,5 hectáreas de *Eichhornia crossipes* según Hernández y Rangel (2009).
- Se tomaron en cuenta los promedios anuales de las variables físicas y químicas para las modelaciones.

- El modelo y sus resultados son una aproximación, se trata en principio de verificar la existencia entre la descarga de agua de la cuenca aferente, la concentración de fósforo y la biomasa de macrófitas flotantes.

Resultados

El modelo conceptual de estimación de biomasa se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables; se desarrollaron las ecuaciones para identificar la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B5). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir las fluctuaciones de biomasa de macrófitas.

Al establecer la correspondencia entre los valores de fósforo total y los valores de la biomasa simulada se encontró un valor de $r^2 = 0,57$; $y = 540,72x + 2182,4$, evidenciando que existe relación entre la concentración del fósforo y la producción de macrófitas. La tabla 8.3 muestra los resultados de la modelación entre la marcha anual del fósforo total y la producción de biomasa de macrófitas. Se aprecia que las fluctuaciones de la producción de biomasa están entre $923 \text{ g}^* \text{ m}^{-2}$ y $911 \text{ g}^* \text{ m}^{-2}$ en los meses secos y en los de mayores precipitaciones entre $898 \text{ g}^* \text{ m}^{-2}$ y $881 \text{ g}^* \text{ m}^{-2}$.

Rivera-Usme (2011) encontró en el humedal Jaboque que los valores de biomasa fluctúan entre $501,6 \text{ g/m}^2$ en los meses secos y 1138 g/m^2 en periodos de lluvias, contrario a los resultados de la modelación. Håkanson y Boulion (2002) registraron valores de producción de biomasa entre 1220 g/m^2 y 1848 g/m^2 en humedales de Europa Oriental con profundidades entre 1,5 m y 0,8 m.

Los resultados de la modelación permiten inferir que existe una relación entre la producción de biomasa y la marcha del fósforo, en concordancia con lo afirmado por Duever (1988) y Mann y Wetzel (2000); cuando aumentan las concentraciones de fósforo se incrementa la producción de macrófitas. Durán *et al.* (2011) en la represa de Berlín en Santander (Colombia), en la zona alto andina, relaciona la oferta de nutrientes con la biomasa de macrófitas flotantes. En la figura 8.1 se aprecia que en diciembre, enero, febrero, marzo y agosto los resultados de la modelación mostraron altos valores de biomasa, que coinciden con los valores del fósforo total; cuando disminuye la concentración del fósforo y aumenta el caudal se reduce la biomasa de macrófitas, esto es en abril, mayo, junio, octubre y noviembre, meses que coinciden con épocas de altas descargas de la cuenca aferente. Montoya *et al.* (2011) concluyeron que en la ciénaga Hoyo Los Bagres (Colombia), las variaciones de las macrófitas acuáticas flotantes se encuentran asociadas al pulso de la inundación y la oferta de nutrientes, lo cual podría estar ocurriendo en Jaboque.

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad se hizo para comprobar cómo una variable química como la concentración de fósforo total incide en la biomasa de macrófitas por unidad de área (m^2). Los valores de la concentración del fósforo total se establecieron según clases o niveles entre 0,5 mg/l y 2,5 mg/l.

Tabla 8.3. Resultados de la modelación caudal promedio mensual, fósforo total y biomasa estimada de macrófitas en el humedal Jaboque

Meses	Caudal promedio anual m^3/mes	Fósforo total mg/l	Biomasa simulada g/m^2
Enero	23 030	0,98	911,56
Febrero	68 881	1,03	923,9
Marzo	69 919	0,74	910
Abril	194 195	0,45	891
Mayo	334 655	0,37	884
Junio	75 935	0,55	877,55
Julio	44 399	0,54	879
Agosto	136 933	1,03	891,75
Septiembre	202 909	0,75	898,46
Octubre	272 413	0,51	881,4
Noviembre	99 172	0,52	882,31
Diciembre	230 711	0,72	893,93
Promedio	146 096,00	0,68	893,74
Desviación estándar	99 394,72	0,23	14,72

Los resultados permitieron confirmar que el modelo refleja una relación entre la concentración de fósforo y la biomasa de macrófitas. Se infiere que a medida que aumenta la concentración de fósforo aumenta la biomasa de macrófitas en el humedal.

La figura 8.2 y la tabla 8.4 muestran los probables cambios de la biomasa en el humedal ocasionados por el incremento de fósforo. Las líneas numeradas de 1 a 10 señalan los niveles de biomasa en g/m^2 por cada nivel de fósforo. En la tabla 8.4 se presentan los resultados de la modelación con los valores correspondiente a cada

nivel de concentración de fósforo. Se aprecia que cada curva tiende a seguir el comportamiento estacional de la concentración de fósforo total; cuando se incrementa la concentración de fósforo proporcionalmente aumenta la biomasa de macrófitas. Se evidencia que la variable de control del modelo modifica la variable dependiente, en este caso la biomasa.

Tabla 8.4. Resultados de análisis de sensibilidad
concentración de Pt y biomasa de macrófitas (g/m^2)

Variación de Pt mg/m^3	0,5	0,7	0,9	1,17	1,39	1,61	1,83	2,06	2,28	2,5
Meses										
Enero	207,2	299,2	391,3	483,4	575,5	667,6	759,6	851,7	943,8	1035,9
Febrero	210	303,3	396,6	490	583,3	676,6	769,9	863,2	956,6	1049,9
Marzo	209,9	303,2	396,5	489,8	583,1	676,4	769,7	863	956,3	1049,6
Abril	207	298,9	390,9	482,9	574,9	666,9	758,8	850,8	942,8	1034,8
Mayo	203,4	293,8	384,2	474,6	565	655,4	745,8	836,1	926,5	1016,9
Junio	199,4	288,1	376,7	465,4	554	642,6	731,3	819,9	908,6	997,2
Julio	198,9	287,2	375,6	464	552,4	640,7	729,1	817,5	905,9	994,3
Agosto	202,7	292,7	382,8	472,9	563	653,1	743,1	833,2	923,3	1013,4
Septiembre	203,7	294,3	384,8	475,4	565,9	656,5	747	837,6	928,2	1018,7
Octubre	201,2	290,6	380	469,4	558,8	648,2	737,6	827	916,4	1005,8
Noviembre	200,5	289,6	378,8	467,9	557	646,1	735,3	824,4	913,5	1002,6
Diciembre	203,2	293,5	383,8	474,1	564,4	654,6	744,9	835,2	925,5	1015,8
Promedio	203,93	294,53	385,17	475,82	566,44	657,06	747,68	838,30	928,95	1019,58
Desviación estándar	3,81	5,50	7,19	8,89	10,59	12,30	13,97	15,66	17,36	19,06

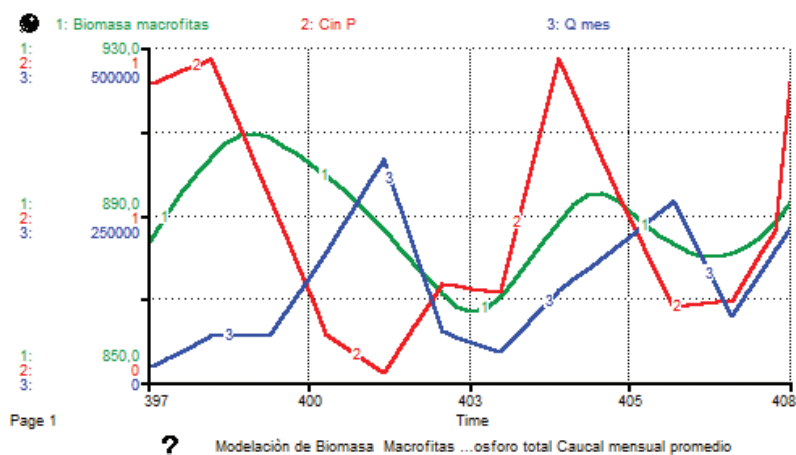
1: Producción inicial de macrófitas en g/m^2 .

2: Cin Pt. Carga promedio mensual de Pt que ingresa al humedal en mg/l .

3: Caudal promedio mensual estimado, sec. 2, m^3/m .

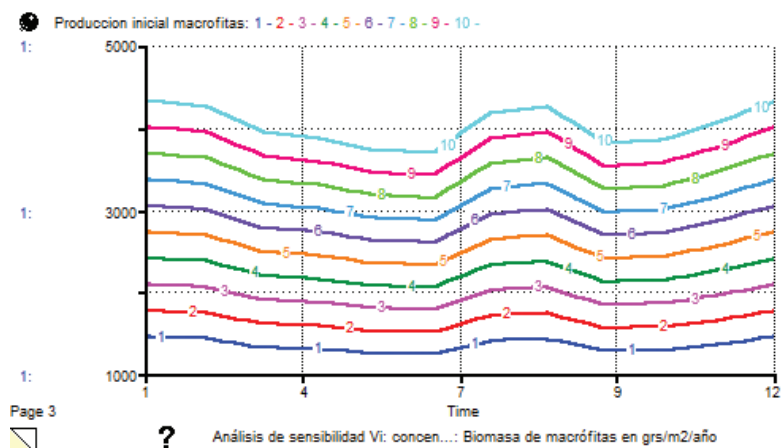
También se aprecia que a medida que aumenta la concentración de fósforo los cambios estacionales de las curvas se hacen más fuertes, con un incremento de la desviación estándar para cada nivel.

Figura 8.1. Modelación de la biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque.



- 1: Producción inicial de macrófitas en g/m².
- 2: Cin Pt. Carga promedio mensual de Pt que ingresa al humedal en mg/l.
- 3: Caudal promedio mensual estimado, sec. 2, m³/m.

Figura 8.2. Análisis de sensibilidad concentración de Pt y biomasa de macrófitas.



Se puede inferir que a concentraciones superiores de 4 mg/m³ de fósforo los valores de biomasa estarían entre 390 y 400 g/m², lo que sugiere que este sería el límite de la relación fósforo-macrófitas para mantener una condición tendiente a la mesotrofia. Según Poi de Neiff y Neiff (2006), valores de biomasa superiores a 451 g/m² corresponden a condiciones eutróficas.

Como conclusión del análisis de sensibilidad se puede afirmar que el modelo representa la relación existente entre oferta de nutrientes, en este caso fósforo, y producción de biomasa.

Discusión

Los resultados de la modelación son una aproximación general de un proceso funcional del humedal. En principio tiene por objetivo conocer de manera cualitativa las relaciones entre variables físicas y químicas y un proceso biológico como la producción de biomasa de macrófitas; por lo tanto son aproximaciones que admiten discusiones y esencialmente se trata de un instrumento para facilitar la comprensión entre los fenómenos fisicoquímicos y la producción de biomasa en el humedal.

El modelo indica la posible existencia entre las variaciones de la biomasa de macrófitas de acuerdo con el comportamiento estacional de la oferta de nutrientes y en especial del fósforo; a medida que aumenta la concentración de este hay un leve aumento estacional de biomasa.

Los resultados de los análisis de sensibilidad del modelo permiten afirmar que tanto su estructura como sus variables reproducen de manera general la producción de biomasa de macrófitas.

Del análisis de sensibilidad se infiere que a concentraciones de 0,5 mg/l de fósforo los valores de biomasa estarían entre 203 g/m² y 207 g/m², sin embargo el promedio de fósforo para los dos últimos tercios de humedal se encuentra por encima de 0,7 mg/l, lo que indica que podría existir una tendencia al aumento de la cobertura de *E. crassipes* y un incremento de la mesotrofia en el tercio bajo.

Consideraciones finales

Los resultados de la modelación son un referente importante para aproximarse a la comprensión de un sistema ambiental. Se integraron variables físicas, químicas y biológicas para entender sus relaciones y su influencia sobre al estado trófico del humedal Jaboque, y lograr una aproximación predictiva del sistema que permita hacer recomendaciones para su conservación y restauración.

En la tabla 9.1 se muestra la correspondencia entre las preguntas formuladas al inicio de la investigación y los resultados de la modelación.

Tabla 9.1. Correspondencia entre las preguntas planteadas al comenzar la investigación y los resultados de la modelación

Variable	Pregunta	Diagnóstico	Resultados de la modelación	Observaciones
Hidroperiodo	¿El hidrope- riodo refleja el comportamien- to bimodal- tetraestacional en función de la precipitación?	Se establece la variación del hidroperiodo en función de la precipita- ción.	La modelación con- firmó que los cambios del hidroperiodo, la descarga de la cuenca afereente al río Bogotá y el volumen de cada sección están asocia- dos con la precipita- ción.	Se presenta una alta variabilidad del hidroperiodo en los últimos 39 años, especialmente por la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña.
THR	¿El hidroperio- do y la morfo- metría de cada sección afectan el THR?	Se infiere que los cambios en la morfo- metría afectan el THR.	Se confirmó que la precipitación, la descarga de agua de la cuenca afereente y la capacidad de almace- naje regulan el THR de retención en todas las secciones.	>precipitación> descarga cuenca afereente <THR

Continúa

Variable	Pregunta	Diagnóstico	Resultados de la modelación	Observaciones
Fósforo total	¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el fósforo?	Relaciones del Pt con la variación de la precipitación.	Se verificaron cambios en la concentración del fósforo asociados a la precipitación y la descarga de la cuenca aferente.	>precipitación < THR< fósforo total
Estado trófico	¿Varía el estado trófico en función del hidroperiodo?	Se verifica variación en función al hidroperiodo	Los resultados de la modelación corroboran cambios del estado trófico asociados a la precipitación y al hidroperiodo.	>precipitación <thr<fósforo total<trofia
Sólidos suspendidos totales (SST)	¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en los SST?	La precipitación y descarga de la cuenca aferente del humedal influyen en los SST.	La modelación ratificó la influencia de la precipitación y el hidroperiodo en los SST.	>precipitación<thr> sst>precipitación> sst>trofia
Clorofila_a y producción primaria	¿En la clorofila_a y en la producción primaria incide la variación climática?	Se relaciona con la variación climática.	Se confirmó la relación entre la variación del clima y la clorofila_a y la producción primaria con el estado trófico. Se encontraron coincidencias temporales entre las marchas de la clorofila_a, el fósforo total y la producción primaria fitoplanctónica.	<Precipitación> fósforo total> clorofila_a>ppf> trofia
Biomasa de macrófitas flotantes	¿Es posible relacionar la biomasa de macrófitas con el hidroperiodo y la carga de Pt?	No lo establece	Se relaciona parcialmente con nutrientes.	Los resultados no son concluyentes.

La caracterización del clima se presentó en el capítulo 3. En la tabla 9.2 se resume la marcha anual y las épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo en la estación meteorológica Aeropuerto Eldorado. Los valores de precipitación más altos se presentan en abril y mayo, con 107 mm y 100,7 mm, y en octubre y noviembre con 111,3 mm y 93,1 mm. Hay un tipo de distribución bimodal-tetraestacional; las épocas secas van de enero a febrero y de julio a agosto. En la variación interanual de la precipitación en series largas (40 años aproximadamente) se detectó cierto patrón asociado a los fenómenos de El Niño y La Niña. En 1977,

1978 y 1980, 1991, 1992, 1996 y 1997 se observó una reducción de las precipitaciones por debajo del valor promedio anual, que se asocia con las sequías generadas por El Niño. Dicho fenómeno se presentó con menor intensidad en 1982, 1985, 1987 y 1989.

Respecto a La Niña y su influencia en el aumento de las precipitaciones, los datos registrados en 1979 muestran un pico de 991,7 mm anuales y aparece levemente en 1984, 1986, 1988, 1990 y 1995. Los años 1999, 2006, 2008 y 2010 fueron excepcionalmente húmedos, calificándose como típicos de La Niña, los dos últimos pasaron los 1200 mm de lluvia anual.

La temperatura registra valores promedio máximos iguales a 21,5 °C, de temperatura media de 13,6 °C y temperatura mínima de 2,5 °C. Las altas temperaturas se asocian con el fenómeno de El Niño. En 2009 y 2010 se presentó una anomalía de los datos debido a que en un periodo típico de La Niña se registraron temperaturas superiores a los 14 °C.

La humedad relativa registró un valor de 80 %, siendo 83 % el más alto en noviembre y 77 % el más bajo en julio y agosto. Según la variación interanual el año con mayor humedad relativa fue 2008, con una humedad promedio de 85,8 %, asociado con un fenómeno de La Niña intenso. El año con menor valor de humedad relativa fue 1992, con una humedad promedio de 75,8 %, y relacionado con un año típico de El Niño.

Thornthwaite clasifica esta estación como de clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco. El brillo solar obtuvo un monto anual de 133,2 h. m., con su mayor expresión en enero (184,9 h. m.). El año de mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas; el de menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348 horas.

La descarga de agua al humedal se presentó en el capítulo 4 y la tabla 9.3. Las variaciones del caudal de la cuenca aferente responden a la precipitación. Los valores extremos de precipitación corresponden también a montos extremos en los caudales como lo han señalado Bradley y Gilvear (2000); Hupp (2000); Quinn y Hanna (2003); Spieles y Mitsch (2003) entre otros. Giraldo *et al.* (2007) encontraron que el régimen hidrológico de la ciénaga de Cachimbero en Cimitarra (Colombia) correspondía al patrón de la precipitación.

Los últimos 39 años se han caracterizado por una alta variabilidad climática, así, el menor valor de precipitación anual, 432,7 mm/año, se presentó en 1992 y corresponde a una descarga calculada de la cuenca aferente de 905 225 m³/mes, que se

Tabla 9.2. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo, estación meteorológica Aeropuerto Eldorado

Periodos	Meses												Pro- me- dio
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1972-1980													
P media (mm)			⋮⋮	⋮⋮	⋮⋮				⋮⋮	¥	⋮⋮		790,5
T °C media			Σ	Σ	Σ								13,1
h. r. (%)				=	=					=	=	=	80,4
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐				☐					☐	134,5
1981-1990													
P media (mm)				¥	⋮⋮				⋮⋮	⋮⋮	⋮⋮		842,9
T °C media					Σ								13,5
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	80,6
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐				☐	☐				☐	139,3
1991-2000													
P media (mm)			⋮⋮	⋮⋮	¥				⋮⋮	⋮⋮	⋮⋮		757,1
T °C media				Σ		Σ							13,8
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	79,0
Brillo solar (h/m)	☐	☐	☐					☐				☐	131,4
2001-2010													
P media (mm)			⋮⋮	⋮⋮	⋮⋮					¥	⋮⋮		924,6
T °C media					Σ								13,8
h. r. (%)			=	=	=					=	=	=	80,9
Brillo solar (h/m)	☐	☐					☐	☐	☐			☐	127,5

⋮⋮: Meses de mayor precipitación.

¥: Mes con la más alta precipitación.

Σ: Mes con temperatura máxima.

=: Meses de mayor humedad relativa.

☐: Meses de mayor exposición al brillo solar.

asocia con los valores más bajos en ese periodo, y el más alto, de 1250,5 mm/año, en 2010, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/mes. La dinámica hidrológica del humedal se ve afectada de manera significativa por la descarga, que incide en sus procesos geoquímicos y biológicos (Håkanson *et al.* 2003; Carpenter *et al.* 2008).

Al comparar las curvas de descarga al humedal en años con situaciones críticas, se puede apreciar que con un fenómeno de La Niña extremo, la descarga se aumenta aproximadamente en 25 % con relación al promedio histórico, y de 150 % con relación al fenómeno de El Niño. Es decir, el hidropериodo se caracteriza por una alta variabilidad dependiendo de las condiciones climatológicas. Esta situación confirma que los fenómenos del clima, como El Niño y La Niña influye directamente en el hidropериodo en el humedal y afectan los procesos biogeoquímicos y biológicos.

La relación entre la descarga de agua de la cuenca aferente y el volumen de cada una de la secciones del humedal osciló así (tabla 9.3): en la primera el menor volumen estimado fue de 61 500 m³ en verano y el mayor en invierno con 70 643 m³; en la segunda fue de 210 747 m³ en invierno y en verano 161 556 m³, y en la tercera fue de 193 820 m³ en verano y 245 155 m³ en invierno. Estos valores se relacionan con el patrón de distribución de la lluvia.

El tiempo hidráulico de retención del agua en las secciones del humedal (tabla 9.3) varía de acuerdo con la precipitación y con la descarga de la cuenca aferente. En la primera sección se estimó en 24 días/año en verano y 8 días/año en invierno; en la segunda de 59 días/año en verano y 20 días/año en invierno, y para la tercera entre 68 días/año en verano y 23 días/año en invierno. En el embalse del Muña en Cundinamarca, Díaz y Camacho (2005) estimaron el tiempo hidráulico de retención en periodos lluviosos en 2 días/año y para periodos secos de 2,7 días/año, e indicaron que el tiempo hidráulico de retención es mayor en épocas secas y que disminuye en invierno, situaciones que concuerdan con lo modelado en Jaboque.

La modelación del tiempo hidráulico de retención permitió establecer que la segunda y tercera secciones del humedal reciben el impacto de las crecientes de la cuenca aferente, y que la tercera cumple una función reguladora y estabilizadora físicoquímica y biológica. Según Zang y Mitsch (2005) se necesitan más de 15 días de retención hidráulica del agua para que un humedal pueda desarrollar una función depuradora.

El modelo reveló que el tiempo hidráulico de retención de agua se encuentra en función de las condiciones hidrológicas y morfométricas del humedal, y los resultados dan relevancia al modelo como instrumento práctico para predecir el impacto

generado por variabilidad climática extrema como los fenómenos de El Niño y La Niña o los cambios derivados de las alteraciones físicas del humedal, que afectan el flujo de agua y la capacidad de almacenamiento de cada sección, dándole validez a la primera hipótesis planteada en esta investigación.

El modelo de fósforo total muestra que las variaciones de la concentración en cada sección del humedal de Jaboque siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación. Los valores modelados (capítulo 5 y tabla 9.3) en la primera sección para los periodos secos fue de $1,02 \text{ mg/m}^3$ y en invierno el menor valor fue de $0,43 \text{ mg/m}^3$; para el tercio medio fue de $1,1 \text{ mg/m}^3$ en verano y $0,62 \text{ mg/m}^3$ en invierno y para el tercio bajo $0,97 \text{ mg/m}^3$ en invierno y $0,3 \text{ mg/m}^3$ en verano. Estos valores indican que el fósforo se diluye en las épocas de mayores precipitaciones cuando hay mayor volumen de agua, y se concentra en los meses de verano. Rivera (2011) y Mejía (2011) corroboran esto en el humedal de Jaboque. Niño (2003) observó una rutina similar para el embalse del Neusa (Cundinamarca, Colombia); Restrepo *et al.* (2006) y Montoya y Aguirre (2010) encontraron patrones similares en las ciénagas del complejo de Ayapel (Córdoba, Colombia). Pinilla (2006) halló variaciones de la concentración del fósforo debidas a la fluctuación hidrológica en el lago Boa (Caquetá, Colombia) e igualmente Gallo *et al.* (2009) en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) mencionan un comportamiento similar.

De acuerdo con los resultados, las dos primeras secciones están muy influenciadas por el ciclo hidrológico; en condiciones de altas precipitaciones se disminuye el tiempo hidráulico de retención por lo cual ejercen como canales de paso sin ninguna función depuradora. Mientras tanto, el tercio bajo dadas sus condiciones morfológicas, amortigua y depura la descarga de fósforo proveniente de los dos primeros tercios. La modelación del índice de estado trófico (tabla 9.3) mostró que las dos primeras secciones del humedal se encuentran en condiciones eutróficas que se incrementan en las épocas de verano. El tercio bajo mantiene condiciones de mesotrofia durante todo el año, con unas pequeñas variaciones en las épocas de verano. Es probable que la escasa variación del estado trófico de esta sección se deba a la redistribución de nutrientes por mezcla continua y a los altos tiempos hidráulicos de retención, fenómeno también observado por Ramírez y Alcaráz (2002) en un sistema eutrófico en Medellín, Colombia.

Los resultados anteriores muestran que en la temporadas de lluvia se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que el THR, lo cual podría relacionarse con una acción de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jørgensen (2003), en un mejoramiento del estado trófico del humedal, aun-

que Zhang y Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza una función depuradora. En la tercera sección se combinan condiciones de carácter físico y biológico que permiten considerar una función depuradora en el sistema del humedal Jaboque.

El análisis de sensibilidad del modelo permitió predecir el estado trófico de cada sección, determinar la carga mínima de fósforo total para mantener las condiciones de mesotrofia y corroborar la relación entre el tiempo hidráulico de retención, la carga de fósforo y el estado trófico de humedal. Estas variables deben ser tenidas en cuenta en los programas de restauración y conservación. Los resultados y los análisis permiten confirmar la posibilidad de utilizar la modelación como instrumento robusto para predecir el estado trófico del humedal.

Los resultados de la modelación de los sólidos suspendidos totales (capítulo 6 y tabla 9.3) mostraron que en la primera sección los valores fluctuaron entre 101 mg/l en la temporada de invierno y 34,98 mg/l en verano, en la segunda variaron entre 69,91 mg/l en invierno y 18,5 mg/l en verano, y en la tercera entre 60,97 mg/l en invierno y 14,4 mg/l en verano. Cuando disminuye la descarga de la cuenca aferente y aumenta el tiempo hidráulico de retención, disminuye la concentración de SST, reduciendo el transporte entre las secciones del humedal. Rivera (2011) y Mejía (2011) mencionan un comportamiento de los sólidos suspendidos similar en el humedal Jaboque. En la Ciénaga de Ayapel Gallo *et al.* (2009) encontraron que durante la aguas altas disminuyeron las concentraciones de sólidos suspendidos. Para la misma ciénaga Hernández *et al.* (2008) observaron que en épocas de estiaje o verano están las más altas concentraciones de sólidos suspendidos, lo que relaciona el fenómeno con las condiciones hidrológicas. Velázquez *et al.* (2007) reportan para la ciénaga Colombia (Caucasia, Colombia) y Montoya y Aguirre (2010) para la Ciénaga de Escobillitas, que los sólidos suspendidos disminuían en verano y aumentaban en invierno. Malmaeus y Håkanson (2003) y Jørgensen (2003) sugieren que los SST son los responsables del transporte de la mayoría de los nutrientes al cuerpo de agua y que este fenómeno puede presentarse porque el tiempo hidráulico de retención disminuye, lo cual implica un mayor transporte de agua y mayor lavado de sólidos suspendidos en épocas de invierno.

Tabla 9.3. Resumen de los resultados de modelación por parámetros en el humedal de Iaboque

Parámetro Sección	Temporada	Volumen		THR Días/ año	PO4 mg/m³	IST (OCED) mg/m³	SST mg/m³	Chl_a mg/m3	Ppf		Estado trófico	Observa- ciones
		m³							mgCm ⁻³			
Sección -1 Tercio alto	Verano	61 500		24	1,02	60,13	34,98	22,5	77,8		Eutrófico	
	Invierno	70 643		8	0,43	27,65	101,76	6,6	16,02		Eutrófico	Leve mesotrofia en meses de mayor precipita- ción.
Sección -2 Tercio medio	Verano	161 556		59	1,1	67,01	18,58	34,2	77,8		Eutrófico	
	Invierno	210 747		20	0,33	14,52	69,95	11,1	24,85		Eutrófico	
Sección -3 Tercio bajo	Verano	193 820		68	0,97	29,7	14,4	7,8	15,96		Mesotró- fico	Leve a eutrofia en meses más secos.
	Invierno	245 155		23	0,3	12,97	67,5	1,56	4,16		Mesotró- fico	

El análisis de sensibilidad del modelo reproduce parcialmente la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST para cada una de las secciones, de allí su importancia en términos predictivos. Es de anotar que para todas las secciones y aun en condiciones de bajas precipitaciones (<500 mm/año) la concentraciones de STT se encontrarían entre 44 y 53 mg/l, lo que indica un estado eutrófico para todo el humedal, condición que tiende a incrementarse en la medida en que aumenta la descarga desde la cuenca aferente.

La concentración de la clorofila_a (capítulo 7 y tabla 9.3) en cada sección del humedal sigue un patrón inverso al bimodal-tetraestacional de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan en cada una de las secciones, y en los lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, indicando que se encuentran en estado eutrófico, mientras que en la tercera esas concentraciones tienden a disminuir manteniendo condiciones de mesotrofia. Ello permite inferir una menor productividad primaria e influencia del ciclo hidrológico. En Colombia han documentado situaciones similares Pinilla (2006), quien al evaluar y comparar la eficiencia fotosintética entre un lago amazónico (Boa) y uno andino (Guatavita), encontró que las eficiencias varían entre ecosistemas y entre épocas de muestreo, seguramente por las condiciones climáticas. Montoya y Aguirre (2010) hallaron en la ciénaga Escobillitas relación entre la variación en la producción primaria y el pulso de inundación, entre otros.

Los resultados de la modelación de la relación entre la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica mostraron una correspondencia de $r^2 = 0,71$ para la primera sección, $r^2 = 0,81$ en la segunda y $r^2 = 0,78$ para la tercera. Con ello se pudo establecer que a medida que aumentan las cantidades de clorofila_a aumenta la Ppf. Igualmente se percibe una fuerte influencia del ciclo hidrológico en la marcha de las dos variables: en las épocas más lluviosas (abril, mayo, junio, octubre y noviembre) la Ppf disminuye y aumenta en los meses secos. Hernández *et al.* (2011), encontraron en la Ciénaga de Ayapel una correspondencia entre estas variables de $r^2 = 0,72$, mientras que Montoya y Aguirre (2009) hallaron una relación entre el hidroperiodo y la producción primaria en la ciénaga Patícos (Córdoba, Colombia).

En la primera sección de Jaboque el promedio anual de clorofila_a es de 14,8 mg/m³ con un valor correspondiente de Ppf de 35,10 mgCm⁻³, que indican condiciones de eutrofia; en la segunda y debido a los actuales niveles de concentración de clorofila_a, el promedio anual es 17,93 mg/m³ de clorofila_a con un valor promedio de la Ppf de 39,17 mgCm⁻³, es decir, condiciones permanentes de eutrofia. En el tercio bajo el promedio anual de clorofila_a es de 3,1 mg/m³ con un valor correspon-

diente de Ppf de $7,79 \text{ mgCm}^{-3}$, un indicativo de condiciones de mesotrofia. Estos resultados confirman que es permisible hacer una interpretación del estado trófico del humedal a partir de las concentraciones de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica con base en la clasificación propuesta por Håkanson y Boulion (2003), y en consecuencia es posible utilizarlas como indicadores apropiados para determinar el grado de eutrofización en humedales.

El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física como la precipitación, una química como la clorofila_a, y una de tipo biótico como la producción primaria fitoplanctónica. De acuerdo con estos resultados de la modelación, se puede concluir que en el humedal Jaboque la producción primaria fitoplanctónica es alta en las dos primeras secciones y especial en los meses de menores precipitaciones, y en la tercera la productividad primaria disminuye de manera significativa. Esto marca una diferencia clara entre un estado mesotrófico y el estado eutrófico de las dos primeras secciones. Se comprobó la bondad de utilizar indicadores de estado trófico, mostrando el potencial que tienen este tipo de indicadores en la vigilancia y control de la eutrofización.

Los resultados del modelo preliminar para estimar la producción de biomasa de macrófitas (capítulo 8) flotantes, mostraron que existe relación entre la concentración de fósforo en la columna de agua y la biomasa. La correspondencia entre los valores promedio estimados de fósforo y los valores modelados de biomasa de macrófitas igual a $r^2 = 0,57$ indican que existe relación entre un fenómeno químico y uno biológico. Durán *et al.* (2011) en la represa de Berlín (Santander, Colombia) en la zona alto andina, relaciona la oferta de nutrientes con la biomasa de macrófitas flotantes. Montoya *et al.* (2011) concluyeron que en la ciénaga Hoyo Los Bagres, las variaciones de las macrófitas acuáticas flotantes se encuentran asociadas al pulso de la inundación y con la oferta de nutrientes. El análisis de sensibilidad permite afirmar que la estructura y las variables del modelo reproducen de manera general la producción de biomasa de macrófitas. Es de aclarar que estos resultados son apenas una aproximación cualitativa a un fenómeno complejo en el que intervienen variables físicoquímicas y biológicas, sin embargo la simplificación permite un acercamiento racional para tratar de comprender la producción de biomasa de macrófitas en el humedal y sus posibles implicaciones.

En síntesis, los resultados de la modelación de los procesos en el humedal Jaboque muestran que es posible utilizar las técnicas de simulación dinámica como instrumento válido para comprender un problema ecológico y fortalecer la capacidad de hacer predicciones oportunas para la gestión adecuada del recurso. Sin

embargo se debe tener presente que la modelación tiene limitaciones relacionadas con la complejidad de los sistemas abiertos, y que sus resultados son aproximaciones racionales a la realidad. Los análisis de sensibilidad elaborados mediante la simulación dinámica permitieron validar indicadores físicoquímicos y biológicos que pueden ser utilizados en sistemas de monitoreo de planes de preservación y restauración.

El modelo de simulación dinámica desarrollado permitió una mayor comprensión de la relación entre los fenómenos hidrológicos, geoquímicos y biológicos en el humedal Jaboque. Se corroboraron las hipótesis planteadas en torno a la incidencia del hidroperiodo en las variables físicoquímicas y biológicas estudiadas. Los análisis de sensibilidad y las pruebas estadísticas hechas a los modelos revelaron que son estables, que tienen una capacidad predictiva aceptable y muestran independencia entre las variables de control y las predictivas.

El modelo resultado de este estudio puede considerarse como instrumento útil para predecir las variables físicoquímicas y biológicas que permiten explicar las tendencias del estado trófico del humedal Jaboque y de cuerpos de agua en similares condiciones hidrológicas y morfométricas.

Recomendaciones

- En los resultados de la modelación se identifican acciones tendientes a la restauración y la conservación del humedal como patrimonio de la ciudad. De acuerdo con ellos y con los análisis de sensibilidad, estas acciones tendrán un efecto positivo sobre sus condiciones tróficas.
- El tiempo hidráulico de retención es una variable clave que depende de las variaciones climáticas y de las condiciones morfométricas del humedal. Por este motivo se deben priorizar todas aquellas acciones que lo optimicen, en especial en el tercio bajo. Esto significa evitar o prohibir al máximo la desecación del humedal, la acumulación intensiva de sedimentos y los rellenos ilegales, acciones que disminuyen el tiempo de retención del agua.
- En lo posible se deben evitar todos los procesos de potrerización del humedal y erradicar la colonización por especies altamente agresivas e invasoras como el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).
- Se debe evitar la construcción de obras de infraestructura que alteren el hidroperiodo. Este tipo de acciones llevan a aumentar el volumen de agua

transportada sin modificar la capacidad de almacenamiento de las cubetas, disminuyendo la capacidad hidráulica de retención del humedal.

- Es necesario el control y disminución de las cargas externas o alóctonas de fósforo provenientes de la cuenca aferente, de los vertimientos ilegales y de los cultivos. Una disminución sensible de la carga de fósforo permitiría mejorar el tercio bajo y generar condiciones de mesotrofia en el tercio medio.
- Es conveniente controlar el aporte de sedimentos desde la cuenca aferente hacia el humedal. Los resultados mostraron que en la medida en que se incrementa la descarga, aumentan las concentración de sólidos suspendidos totales, estrechamente relacionadas con el estado trófico.
- La remoción de macrófitas acuáticas debe ser selectiva, se deben remover principalmente las que por su tipo enraizamiento dependen de la carga de nutrientes que se encuentran en los sedimentos. En las etapas iniciales de la restauración se debe evitar no remover totalmente las macrófitas acuáticas flotantes que atrapan en sus sistemas radiculares cantidades apreciables de sedimentos y que funcionan como filtros naturales.
- Es necesario evitar el taponamiento por macrófitas de los desagües del humedal en épocas de altas precipitaciones, debido a que el tercio bajo recibe la mayor descarga de nutrientes en invierno. Es imprescindible minimizar el efecto nocivo sobre el estado trófico de esta sección.
- Se debe poner en funcionamiento un sistema de monitoreo regular, basado en indicadores sencillos y poco costosos de verificar, que permitan hacer seguimiento al estado trófico del humedal y que eventualmente pueda ser extendido a los demás humedales de la ciudad.

Referencias

- Acreman, M. C., Fisher, J. Stratford, C. J., Mould, D. J. y Mountford, J. O. (2007). Hydrological science and wetland restoration: some case studies from Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 158-169.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2009). Diagnóstico de los aspectos físicos, demográficos y socioeconómicos. Secretaría de Planeación.
- Almendinger, J. (1999). A method to prioritize and monitor wetland restoration for water-quality improvement. *Wetlands Ecology and Management*, 6(4), 241-252.
- Álvarez, J. P. (2005). *Evaluación del estado trófico del humedal de Jaboque: análisis espacial y temporal de las características físico-químicas del agua y de la comunidad planctónica*. Informe final convenio cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Anderson, C. J. y Mitsch, W. J. (2005). Effect of pulsing on macrophyte productivity and nutrient uptake: a wetland mesocosm experiment. *American Midland Naturalist*, 154, 305-319.
- Asaeda, T. y Van Bon, T. (1997). Modelling the effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes. *Ecological Modelling*, 104(2-3), 261-287.
- Asaeda, T., Trung, V. K. y Manatunge, J. (2000). Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes. *Aquatic Botany*, 68(3): 217-237.
- Asaeda, T., Trung, V. K., Manatunge, J. y Van Bon, T. (2001). Modelling macrophyte – nutrient – phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. *Ecological Engineering*, 16(3), 341-357.
- Asaeda, T., Rajapakse, L. y Fujino T. (2008). Applications of organ-specific growth models; modelling of resource translocation and the role of emergent aquatic plants in element cycles. *Ecological Modelling*, 215(1-3), 170-179.

- Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental [Adessa] (2004). Plan de manejo integral y comunitario para la recuperación y protección del humedal El Jaboque ubicado en la localidad de Engativá. Bogotá D. C.: autor.
- Baart, I., Gschöpf, C., Blaschke, A. P., Preiner, S. y Hein, T. (2010). Prediction of potential macrophyte development in response to restoration measures in an urban riverine wetland. *Aquatic Botany*, 93(3), 153-162.
- Bayley, S., Zoltek, J., Hermann, A. J., Dolan, T. J. y Tortora, L. (1985). Experimental manipulation of nutrients and water in a freshwater marsh: effects of biomass, decomposition, and nutrient accumulation. *Limnology and Oceanography*, 30(3), 500-512.
- Boulion, V. y Håkanson, L. (2003). A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lakes. *Ecological Modelling*, 160, 91-114.
- Boumans, R., Costanza, R., Farley, J., Wilson, M. *et al.* (2002). Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the gumbo model. *Ecological Economics*, 41, 529-560.
- Bradley, C. y Gilvear, D. (2000). Saturated and unsaturated flow dynamics in a floodplain wetland. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2945-2958.
- Brinson, M. M. (2004). Niveles extremos de variación de patrones y procesos en humedales. Documentos del curso taller “Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina”. Buenos Aires.
- Brisson, J. y Chazarenc, F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of the Total Environment*, 407(13), 3923-3930.
- Bryhn, A. y Håkanson, L. (2007). A Comparison of Predictive Phosphorus Load-Concentration Models for Lakes. *Ecosystems*, 10(7), 1084-1099.
- Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22, 361-369.
- Carpenter, S. y Cottingham, K. L. (1997). Resilience and restoration of lakes. *Conservation Ecology* 1(1), 1-12.
- Carpenter, S., Caraco, N., Correll, D., Howarth, R. *et al.* (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8(3), 559-568.
- Carpenter, S., Caraco, N., Correll, D., Howarth, R. *et al.* (2008). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3): 559-568.
- Castillo, C. T. (2000). Productividad y la biomasa fitoperifítica en los lagos Yahuarca y Tarapoto (Amazonas-Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 5(1), 59-68.

- Chaparro-R., B. (2003). Reseña de la vegetación en los humedales de la sabana de Bogotá. En *Los humedales de Bogotá y la Sabana*, vol. I: 71-90. Acueducto de Bogotá, Conservación Internacional, Colombia.
- Contreras, F., Castañeda, O. y Torres, R. (1997). Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica*. 7, 9-17.
- Contreras-Espinosa, F., Rivera-Guzmán, N. y Segura-Aguilar, R. (2005). Nutrientes y productividad primaria en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica*. 15(3), 299-310.
- Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 10(40), 221-268.
- Dahl, M., Wilson, D. I. y Håkanson, L. (2006). A combined suspended particle and phosphorus water quality model: application to Lake Vanern. *Ecological Modelling*, 190, 55-71.
- Díaz, H. y Camacho, L. (2005). Modelación hidrodinámica y de calidad para el embalse del Muña. Informe técnico. Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería.
- Donato, J. (1998). Los sistemas acuáticos de Colombia: Síntesis y revisión. En E. Guerrero (ed.). *Una aproximación a los humedales de Colombia* (pp. 31-47). Bogotá: Fondo Financiera Eléctrica Nacional [FEN] Colombia.
- Duarte, P. (2004). *Productividad primaria y biomasa del fitoplancton en una laguna tropical de alta montaña (laguna de Guatavita)* (Tesis de pregrado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Duever, M., Mitsch, W., Straškraba, M. y Jørgensen, S. (comps.) (1988). *Wetland Modelling*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing.
- Duever, M. (1988). Hydrologic processes for models of freshwater wetlands. En W. J. Mitsch, M. Straškraba y S. E. Jørgensen (eds.). *Wetland Modelling* (pp. 9-39). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing.
- Durán, L., Terneus, H., Gavilán, R. y Posada J. (2011). Composición y estructura de un ensamble de plantas acuáticas vasculares de una represa alto andina (Santander), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(94), 51-68.
- Ennabili, A., Ater, M. y Radoux, M. (1998). Biomass production and NPK retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula. *Aquatic Botany*, 62 (1), 45-56.
- Fisher, J. y Acreman, M. (2004). Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(4), 673-685.

- Fraile, H., Orive, E., y Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora). *Limnetica* 11(2), 29-37.
- Gallo-Sánchez, L., Aguirre-Ramírez, N., Palacio, J. y Ramírez, J. (2009). Zooplankton (Rotifera y Microcrustacea) y su relación con los cambios del nivel del agua en la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 31(2), 339-353.
- Giraldo, M., Piza, C. y Wills, A. (2007). Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (039), 56-68.
- Gocke, K., Mancera, E. Vidal, A. y Fonseca D. (2003). Planktonic primary production and community respiration in several coastal lagoons of the outer delta of the Río Magdalena, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 32, 125-144.
- Gómez, M., Larduet, Y. y Abrahantes, N. (2001). Contaminación y biodiversidad en ecosistemas acuáticos. El fitoplancton de la bahía de Santiago de Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 22(3), 191-197.
- González, M. N., Rangel-CH, J. O. y Berrío, J. C. (2005). *Reconstrucción paleoecológica del Holoceno (10.000 años A. P.) en el humedal Jaboque*. Convenio cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Informe final.
- Grimshaw, H. J., Wetzel, R. G. Brandenburg, M. Segerblom, K. *et al.* (1997). Shading of periphyton communities by wetland emergent macrophytes: decoupling of algal photosynthesis from microbial nutrient retention. *Archiv für Hydrobiologie*, 139(1): 17-27.
- Gurkan, Z., Zhang, J. y Jørgensen, S. 2006. Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark. *Ecological Modelling*, 197(1-2), 89-102.
- Håkanson, L. y Peters, R. (1995). *Predictive Limnology: Methods for Predictive Modelling*. Amsterdam: SPB Academic Publishing.
- Håkanson, L. (1999). On the principles and factors determining the predictive success of ecosystem models, with a focus on lake eutrophication models. *Ecological Modelling*, 121(2-3), 139-160.
- Håkanson, L., Parparov, A. y Hambright, K. D. (2000). Modelling the impact of water level fluctuations on water quality (suspended particulate matter) in lake Kineret, Israel. *Ecological Modelling*, 128, 101-125.
- Håkanson, L. y Boulion, V. (2002). *The lake foodweb: modelling predation and abiotic/biotic interactions*. Amsterdam: Backhuys Publishers.

- Håkanson, L. y Boulion, V. (2002). Empirical and dynamical models to predict the cover, biomass and production of macrophytes in lakes. *Ecological Modelling*, 151, 213-243.
- Håkanson, L. y Boulion, V. (2003). A general dynamic model to predict biomass and production of phytoplankton in lakes. *Ecological Modelling*, 165, 285-301.
- Håkanson, L., Ostapenia, A. Parparov, A. Hambright, K. y Boulion, V. (2003). Management criteria for lake ecosystems applied to case studies of changes in nutrient loading and climate change. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 8(2), 141-155.
- Håkanson, L. (2004). Internal loading: A new solution to an old problem in aquatic sciences. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 9(1), 3-23.
- Håkanson, L. (2004). Break-through in predictive modelling opens new possibilities for aquatic ecology and management—a review. *Hydrobiologia*, 518(1), 135-157.
- Håkanson, L. (2005). The Importance of Lake Morphometry for the Structure and function of Lakes. *International Review of Hydrobiology*, 90(4), 433-461.
- Håkanson, L., Mikrenska, M. Petrov, K. y Foster, I. (2005). Suspended particulate matter (SPM) in rivers: empirical data and models. *Ecological Modelling*, 183, 251-267.
- Håkanson, L. y Eklund, J. M. (2007). A dynamic mass balance model for phosphorus fluxes and concentrations in coastal areas. *Ecological Research*, (22), 296-320.
- Håkanson, L. (2009). A general process-based mass-balance model for phosphorus/eutrophication as a tool to estimate historical reference values for key indicators, as exemplified using data for the gulf of Riga. *Ecological Modelling*, 220, 226-244.
- Han, H., Chen, Y., Jørgensen, S. E., Nielsen, N. S. y Hu, W. (2009). A system-dynamic model on the competitive growth between *Potamogeton malaianus* Miq. and *Spirogyra* sp. *Ecological Modelling*, 220(18), 2206-2217.
- Harte, J. (1996). Confronting visions of a sustainable future. *Ecological Applications*, 6(1), 27-29.
- Hernández-Atilano, E., N., J. Aguirre, N. J. Palacio, J. y Ramírez-Restrepo, J. (2008). Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 30(88), 67-81.
- Hernández-R, J., y Rangel-CH, J. O. (2009). La vegetación del humedal de Jaboque, Bogotá, D. C. *Caldasia*, (31), 355-379.
- Hernández, E., Aguirre, N. J., Palacio J. A. (2011). Relación entre la determinación del pigmento Clorofila a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie

- de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (60), 159-169.
- Hooghiemstra, H. (1984). Vegetational and Climatic History of the High Plain of Bogotá, Colombia: A Continuous Record of the Last 3.5 Million Years. *Disser-taciones Botanicae*, 79. Vaduz: J. Cramer.
- Hunter, R. G., Combs, D. L. y George, D. B. (2000). Growth of softstem bulrush (*Scirpus validus*) in microcosms with different hydrologic regimes and media depths. *Wetlands*, 20(1), 15-22.
- Hupp, C. (2000). Hydrology, geomorphology and vegetation of Coastal Plain rivers in the south-eastern USA. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2991-3010.
- Ideam (1972-2010). Registros climatológicos del Sistema de Información Hidromete-reológica.
- Izquierdo, D. (2005). Modelación hidráulica del humedal Jaboque. Informe final con-venio de cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá- Uni-versidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D. C.
- Janse, J. H., Van Donk E. y Aldenberg, T. (1998). A model study on the stability of the macrophyte-dominated state as affected by biological factors. *Water Research*, 32(9), 2696-2706.
- Janus, L. C. y Vollenweider, R. A. (comps.) (1981). Summary report, the OECD coo-perative programme on eutrophication: Canadian contribution. Centre Inland Water Scientific series, n.º 131.
- Jiménez, H. P. (2006). Las variaciones diarias de la producción primaria y la con-centración de la clorofila en un lago tropical (Guatavita, Colombia). Tesis de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Johnston, C. (1993). Material fluxes acrosswetland ecotones in northern landscapes. *Ecological Applications*, 3(3), 424-440.
- Jørgensen, S. y Bendoricchio, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling*. Deve-lopments in Environmental Modelling, 21. Amsterdam: Elsevier Science B. V.
- Jørgensen S. E. (2003). The aplication of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management. *Papers from Bolsena Conference: Resi-dence time in lakes: Science, Management, Eduacation*. *J. Limnol* (62): 16-20.
- Jørgensen, S. (2008). Overview of the model types available for development of eco-logical models. *Ecological Modelling*, 215(1-3), 3-9.
- Kadlec, R. H. (1997). An autobiotic wetland phosphorus model. *Ecological Enginee-ring*, 8, 145-172.

- Kadlec, R. y Hammer, D. (1988). Modeling nutrient behavior in Wetlands. *Ecological Modelling*, 40(1), 37-66.
- Kadlec, R. (1990). Overland flow in wetlands: vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116: 691.
- Kadlec, R. (1994). Detention and mixing in free water wetlands. *Ecological Engineering*, 3(4), 345-380.
- Kiersch, B., Mühleck, R. y Gunkel, G. (2004). Las macrófitas de algunos lagos altoandinos del Ecuador y su bajo potencial como bioindicadores de eutrofización. *Revista de Biología Tropical*, 52(4), 829-837.
- Knight, R. (2000). Constructed wetlands for livestock wastewater management. *Ecological Engineering*, 15(1-2), 41-55.
- Koch, M. S., Mendelsohn, I. A. y McKee K. L. (1990). Mechanism for the hydrogen sulfide-induced growth limitation in wetland macrophytes. *Limnology and Oceanography*, 35(2), 399-408.
- Kroeger, A. C. (2008). Monitoring and simulating nutrient removal in a constructed wetland. Montreal: McGill University. Department of Bioresource Engineering. Thesis Master of Science.
- Kuehn, K. A., Lemke, M. J., Suberkropp K. y Wetzel, R. G. (2000). Microbial biomass and production associated with decaying leaf litter of the emergent macrophyte *Juncus effusus*. *Limnology and Oceanography*, 45(4), 862-870.
- Kuo, J. T., Hsieh, M. H., Lung, W. S. y She, N. (2007). Using Artificial Neural Network for Reservoir Eutrophication Prediction. *Ecological Modelling*, 200 (1-2), 171-177.
- Lassaletta, L. (2004). *Agricultura intensiva, alteración de ciclos bioquímicos y cambio global*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Legendre, P., y Legendre, L. (1998). *Numerical ecology*. Oxford: Elsevier Science.
- Lindstrom, M., Håkanson, L., Abrahamsson, O. y Johansson, H. (1999). An empirical model for prediction of lake water suspended particulate matter. *Ecological Modelling*, 121, 185-198.
- Lung, W. S. y Light, R. N. (1996). Modelling copper removal in wetland ecosystems. *Ecological Modelling*, 93(1-3): 89-100.
- Mancera, J., Peña, E., Giraldo, R. y Santos, A. (2003). *Introducción a la modelación ecológica. Principios y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Mann, C. y Wetzel, R. (2000). Hydrology of an impounded lotic wetland-wetland sediment characteristics. *Wetlands*, 20(1), 23-32.

- Malmaeus, J. y Håkanson L.. (2003). A dynamic model to predict suspended particulate matter in lakes. *Ecological Modelling*, 167(3), 247-262.
- Mejía, D. (2011). Diatomeas perifíticas y algunas características limnológicas de un humedal urbano en la sabana de Bogotá. Tesis de maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Biología.
- Ministerio de Agricultura de Chile (2006). *Conceptos y criterios para la evaluación ambiental de humedales*. Santiago de Chile: Centro de Ecología Aplicada.
- Mitsch, W., Cronk, J. K., Wu X. y Nairn, R. W. (1995). Phosphorus retention on constructed freshwater riparian marshes. *Ecological Applications*, 5(3), 830-845.
- Mitsch, W. y Gosselink, J. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, 35(1), 25-33.
- Mitsch, W. y Day J. (2004). Thinking big with whole-ecosystem studies and ecosystem restoration- a legacy of H. T. Odum. *Ecological Modelling*, 178 (1-2): 133-155, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2003.12.038.
- Mitsch, W. J., y Day, J. W. (2006). Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: Experience and needed research. *Ecological Engineering*, 26(1), 55-69.
- Mitsch, W. J. y Gosselink J. G. (2007). *Wetlands* (4ª ed.), New Jersey: John Wiley & Sons.
- Mitsch, W., Nahlik, A., Wolski, P., Bernal, B., *et al.* (2009). Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands Ecology and Management*. 18(5), 573-586.
- Montoya, Y. y Aguirre, N. (2009). Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la Ciénaga de Patícos, complejo cenagoso de Ayapel, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 57(3), 635-646.
- Montoya, Y. y Aguirre, N. (2010). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (Ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 55, 76-89.
- Montoya, Y., Vélez, F. y Aguirre, N. (2011, junio). Características morfométricas de un lago de plano inundable tropical (ciénaga Hoyo Los Bagres, Colombia) *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 59, 203-214.
- Mooij, W. M., Trolle, D., Jeppesen, E., Arhonditsis, G., *et al.* (2010). Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*, 44: 633-667.
- Mora, D. y Mata, A. V. (2007). *Aguas para consumo humano y disposición de aguas residuales*. San José: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados-Laboratorio Nacional de Aguas.

- Muhammetoğlu, A. y Soyupak, S. (2000). A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, 133(3), 161-180.
- Muñoz, J. M. (2004). *Humedal Jaboque, evolución geomorfológica y geológica, y su relación con las culturas prehispánicas* (Trabajo de grado). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geología.
- Muñoz, J. M., y Jaramillo, J. (2005). Evaluación geológica-geomorfológica del humedal Jaboque. Plan de restauración ecológica del humedal de Jaboque. Informe final. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Neiff, J. J. (2001). Humedales de la Argentina: Sinopsis, problemas y perspectivas futuras. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Cyted). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XVII, Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos.
- Niño, J. P. (2003). *Variación espacio-temporal del nitrógeno y el fósforo en el embalse del Neusa* (Tesis de maestría) Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Noé, G. B y Harvey, J. W. (2007). Characterization of suspended particles in Everglades wetlands. *Limno. Oceanogra*, 52(3), 1166-1178.
- Nutter, W. L. y Brinson M. M. (1994). Application of hydrogeomorphic principles and function to assessment of drainage intensity in forested wetlands. *Technical Publication*, 20, 13-26.
- OCDE (1982). Eutrophication of eaters. Monitoring, assesment and control. París: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- Peñuela, S. M. (2005). Diagnóstico participativo social en la zona de influencia del humedal de Jaboque, localidad de Engativá. Investigación aplicada en restauración ecológica del humedal de Jaboque. Informe final.
- Pinilla, G. (1996). La problemática de los sistemas acuáticos en Colombia. *La Tadeo*, 51, 19-22.
- Pinilla, G. A. (2006). Modelación del pulso de inundación en el lago Boa (Amazonia colombiana). *Ecotrópicos*, 19(1), 30-47.
- Pinilla, G. A. (2006). Evaluación de la eficiencia fotosintética del fitoplancton en un lago amazónico (lago Boa) y en un lago andino (lago Guatavita). *Acta Amazónica*, 36(2): 221-228.
- Prescott, K. L. y Tsanis I. K. (1997). Mass balance modelling and wetland restoration. *Ecological Engineering*, 9(1-2): 1-18.
- Quinn, N. y Hanna, W. (2003). A Decision Support System for Adaptive Real-Time Management of Seasonal Wetlands in California. *Environmental Modelling and Software*, 18(6), 503-511.

- Raich, J., Rastetter, E., Melillo, J., Kicklighter D. y Steudler, P. (1991). Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1, 399-429.
- Ramírez, J., y Alcaráz, H. (2002). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un sistema eutrófico tropical: Laguna del Parque Norte, Medellín, Colombia. *Caldasia*, 24(2), 411-423.
- Ramírez, J. J., Gutiérrez F. L. y Vargas, A. (2005). Respuesta de la comunidad fitoplanctónica a experimentos de eutrofización artificial realizados en la represa de La Fe, El Retiro, Antioquia, Colombia. *Caldasia*, 27(1), 103-115.
- Rangel-CH., J. O. y Aguirre-C., J. (1983). Comunidades acuáticas altoandinas-I. Vegetación sumergida y de ribera en el Lago de Tota, Boyacá, Colombia. *Caldasia*, 13(65), 719-742.
- Rangel-Ch., J. O. (2003). El antiguo lago de la sabana de Bogotá. Su vegetación y su flora en el tiempo. En *Los humedales de Bogotá y la sabana*, vol. I: 53-70. Acueducto de Bogotá-Conservación Internacional-Colombia.
- Rangel-Ch., J. O. (Comp.). (2005). Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque. Convenio Acueducto de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia, Informe final.
- Reinhardt, M., Gächter, R., Wehrli B. y Müller, B. (2005). Phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural drainage water. *Journal of Environmental. Quality*, 34, 1251-1259.
- Restrepo, C. A., Toro, F. M. y Aguirre, N. J. (2006). Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la ciénaga de Ayapel. *Avances en Recursos Hidráulicos* (13), 7-22.
- Ricci, C. y Balsamo, M. (2000). The biology and ecology of lotic rotifers and gastrotrichs. *Freshwater Biology*, 44, 15-28.
- Rivera, C. A. (2006). Modelos correlativos de algunas variables físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita (Tesis de maestría). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rivera, J. (2011). *Relación entre la composición y biomasa de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos y las variables físicas y químicas en el humedal Jaboque Bogotá-Colombia* (Tesis de maestría). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.
- Rodríguez-Chila, J. D., Mancera-Pineda, J. E. y López-Salgado H. D. (2009). Efectos de la recomunicación del río Magdalena con su antiguo delta: cambios en la producción primaria fitoplanctónica y respiración en el Complejo Pajarales, 1989 a 2005. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38(2), 119-144.

- Roldán, G. A. (1992). Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Roldán, G., Bohórquez, A., Cataño, R. y Ardila J. I. (2000). Estudio limnológico del embalse del Guavio (Colombia). *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, 24(90), 73-84.
- Ryding, S. O. y Rast, W. (1989). *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. New Jersey: The Parthenon Publishing Group.
- Salama. S. y Monbaliu, J. (2004). *Quantitative estimation of suspended particulate matter from chris images*. Frascati: ESA Publications.
- Salas, H. J y Martino, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [Cepis].
- Scheffer, M. y Nes, E. (2007). Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Shallow Lakes in a Changing World*, 196(8), 455-466.
- Schenone, N., Voppedo, A. y Fernández, A. (2008). Estado trófico y variación estacional en los ríos y canales del humedal mixo-halino de Bahía Samborombón (Argentina). *Limnetica*, 27(1), 143-150.
- Shukla, V. P. (1998). Modelling the dynamics of wetland macrophytes: Keoladeo National Park wetland, India. *Ecological Modelling*, 109(1), 99-114.
- Sierra, O. R. y Monsalve, C. A. (2005). Zonificación trófica del humedal Jaboque, con base en la familia *Bacillariophyceae*, Engativá. En: Rangel-Ch., J. O. (comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque*. Convenio Acueducto de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia, Informe final, pp. 1-23.
- Smith, V. H., Tilman, G. D. y Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100, 179-196.
- Spieles, D. y Mitsch, W. (2003). A model of macroinvertebrate trophic structure and oxygen demand in freshwater wetlands. *Ecological Modelling*, 161(3), 181-192.
- Tangirala, A. K., Teegavarapu, R. S. y Ormsbee, L. (2003). Modeling Adaptive Water Quality Management Strategies Using System Dynamics Simulation. *Environmental Informatics Archives*, 1, 245-253.
- Tuttle, C., Zhang, L. y Mitsch, W. (2008). Aquatic metabolism as an indicator of the ecological effects of hydrologic pulsing in flow-through wetlands. *Ecological Indicators*, 8(6): 795-806.

- Universidad Javeriana (2007). *Informe técnico-obras para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque*. Bogotá: autor.
- Valencia, H., Sánchez, J., Castellanos, D., Rodríguez, *et al.* (2005). Evaluación de microflora en el humedal de Jaboque. Investigación aplicada en restauración ecológica del humedal de Jaboque. Informe final.
- Van der Hammen, T. (1995). *Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis Geográficos*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC].
- Van der Hammen, T. (2003a). Los humedales de la sabana. Origen, evolución, degradación y restauración. En A. Guarnizo y B. Calvachi (coords.), *Los humedales de Bogotá y la Sabana*, pp. 19-52. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Conservación Internacional.
- Van der Hammen, T. (2003b). El lago de Humboldt. En A. Guarnizo y B. Calvachi (Coords.), *Los humedales de Bogotá y la sabana*, vol. I, 53-70. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Conservación Internacional.
- Van der Hamen, T., White, H. J. L. y Van Reinen, G. B. A. (1995). Aspectos climáticos del área del transecto Parque Los Nevados. En: T. Van der Hammen y A. G. Dos Santos (eds.). *La cordillera central colombiana transecto Parque Los Nevados*, serie Ecoandes. Estudios de ecosistemas tropandinos, vol. 4, 329-364. Berlín, Stuttgart: J. Cramer.
- Van der Peijl, M. J. y Verhoeven, J. T. A. (1999). A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecological Modelling*, 118, 95-130.
- Vásquez, C., Ariza, A. y Pinilla, G. (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*, 11(2): 61-75.
- Velásquez, J. O., Jiménez, J. y Sepúlveda, M. (2007). Determinación de la calidad ambiental de la ciénaga Colombia. Cauca, Antioquia, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 10(4), 187-199.
- Vollenweider, R. (1965). *Calculation models of photosynthesis-depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements. Primary productivity in aquatic environments*. Verbania Pallanza: Instituto Italiano di Idrobiologia.
- Vollenweider, R. (1970). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. OECD report, september.
- Vorosmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K. Green, P. y Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 169-190.

- Wade, A. J., Whitehead, P. G., Hornberger, G. M., Jarvie, H. R. y Flynn, N. (2002). On modelling the impacts of phosphorus stripping at sewage works on in-stream phosphorus and macrophyte/epiphyte dynamics: a case study for the River Kennet. *Science of the Total Environment*, 282-283, 395-415.
- Wang, N. y Mitsch, W. J. (2000). A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. *Ecological Modelling*, 126, 101-130.
- Werner, T. y Kadlec, R. (1996). Application of residence time distributions to stormwater treatment systems. *Ecological Engineering*, 7(3): 213-234.
- Werner, T. y Kadlec, R. (2000). Wetland residence time distribution modeling. *Ecological Engineering*, 15(1-2), 77-90.
- Wetzel, R. G. (2001). Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: short-term versus long-term objectives. *Water Science and Technology*, 4(11-12), 1-8.
- Weyhenmeyer, G. A., Håkanson, L. y Meili, M. (1997). A validated model for daily variations in the flux, origin, and distribution of settling particles within lakes. *Limnology and Oceanography*, 42(7), 1517-1529.
- Winz, I., Brierley, G. y Trowsdale, S. (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Management*, 23(7), 1301-1323.
- Wu, J. y Marceau D. (2002). Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling*, 153(1): 1-6.
- Yue, T. X., Jørgensen, S. E. y Larocque, G. R.. (2011). Progress in global ecological modelling. *Ecological Modelling*, 222, 2172-2177.
- Zacharias, I., Dimitriou, E. y Koussouris, T. (2005). Integrated water management for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environmental Modelling & Software*, 21, 177-185.
- Zapata, A. (2001). *Variaciones diarias y mensuales de la producción primaria de un lago andino (lago Guatavita-Cundinamarca)* (Tesis de maestría). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Zhang, L. y Mitsch, W. (2005). Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. *Environmental Modelling y Software*, 20(7), 935-946.
- Zubiría, M. P. y Rivera, C. (2005). Producción primaria neta y descomposición de *Eichhornia crassipes*, *Pennisetum clandestinum*, *Polygonum punctatum*, *Schoenoplectus californicus* y *Typha latifolia* en el humedal Juan Amarillo. En: *Memorias Día Mundial de los Humedales* (2005). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Anexos

Anexo A. Registros estación Aeropuerto Eldorado, desde 1972 hasta 2010.

Convenciones

EST = ESTADO DE LA INFORMACIÓN

1. Preliminares Ideam.
2. Definitivos Ideam.
3. Preliminares Otra Entidad.
4. Definitivos otra Entidad.

AUSENCIAS DE DATOS

1. Ausencia del observador.
2. Desperfecto instrumento.
3. Ausencia instrumento.
4. Dato rechazado.
6. Nivel superior.
7. Nivel inferior.
8. Curva de gastos.
9. Sección inestable.
- A. Instrumento, sedimentado.
- M. Máximo no extrapolado.
- *. Datos insuficientes.

ORÍGENES DE DATO

1. Registrados.
3. Incompletos.
4. Dudosos.
6. Est, Regresión.
7. Est, Interpolación.
8. Est, Otros métodos.
9. Generados (Series).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES										SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL									
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)										ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO									
FECHA DE PROCESO : 2010/08/30										FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB									
LATITUD 0442 N LONGITUD 7409 W ELEVACIÓN 2547 m.s.n.m										FECHA-SUSPENSIÓN									
TIPO EST SP DEPTO BOGOTÁ D.C. MUNICIPIO BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ																			
ENTIDAD 01 IDEAM REGIONAL 11 BOGOTÁ																			
*****										*****									
AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB * NOVIE * DICI * VR ANUAL *										*****									
*****										*****									
1972	2	01	72.1	21.9	57.2	159.4	3	118.1	58.1	36.7	39.6	17.4	71.6	101.1	28.5	781.7	3		
1973	2	01	2.9	3.8	50.1	39.3	75.0	59.5	59.5	55.1	57.4	130.3	115.4	105.8	117.3	811.9			
1974	2	01	79.6	100.0	28.5	83.8	61.3	65.5	15.8	46.8	51.8	91.8	100.3	150.6	24.0	848.0			
1975	2	01	5.5	32.2	130.0	57.9	105.3	56.4	60.3	52.2	55.1	160.8	70.7	77.9	77.9	864.3			
1976	2	01	59.9	118.3	59.9	118.3	122.1	104.4	58.9	17.4	34.7	47.3	140.0	81.6	49.5	865.3			
1977	2	01	9.1	20.4	72.2	86.4	34.1	15.9	52.0	52.0	52.9	115.7	120.4	82.3	26.9	688.3			
1978	2	01	5.6	25.0	55.7	121.4	73.5	71.2	52.9	12.9	66.4	3	102.9	47.4	30.2	665.1	3		
1979	2	01	27.5	44.8	55.0	137.3	84.5	137.5	64.8	113.5	86.3	133.4	141.7	25.4	991.7				
1980	2	01	28.2	63.4	28.9	46.0	39.5	76.9	10.6	40.3	49.3	62.1	50.7	3	102.2	598.1	3		
1981	2	01	2.5	27.3	13.7	174.6	202.1	78.1	78.1	23.7	34.4	51.1	113.4	111.8	25.5	858.2			
1982	2	01	78.5	43.3	86.2	218.1	81.1	15.9	12.8	21.4	14.2	112.7	63.6	44.6	792.4	3			
1983	2	01	6.0	18.4	124.4	207.3	120.4	50.3	45.7	34.9	29.3	77.0	43.0	3	132.6	889.3	3		
1984	2	01	99.6	55.2	65.7	140.1	118.0	90.5	35.5	73.4	74.9	50.4	3	86.3	40.2	929.8	3		
1985	2	01	2.8	5.1	28.3	31.4	118.4	25.3	3	44.6	95.9	157.9	79.8	73.8	34.7	698.0	3		
1986	2	01	112.2	61.2	96.5	114.0	74.0	3	95.6	36.2	38.3	56.9	217.5	3	122.3	4.0	914.7	3	
1987	2	01	42.8	32.2	25.7	95.0	113.2	13.8	91.2	25.0	69.5	148.7	64.2	29.2	750.5				
1988	2	01	13.8	50.5	12.2	143.9	58.7	68.5	46.9	73.2	119.1	117.9	151.0	78.8	934.5				
1989	2	01	11.7	41.0	153.6	32.9	53.8	48.2	39.1	34.9	84.8	82.1	30.7	66.2	679.0				
1990	2	01	48.3	48.9	3	155.7	3	102.5	21.9	35.9	35.8	75.7	195.5	85.0	97.4	948.2	3		
1991	2	01	25.5	18.3	126.3	82.6	110.0	27.1	43.4	31.0	54.2	47.1	103.9	64.1	733.5	3			
1992	2	01	14.0	22.1	3	26.2	35.0	28.4	8.8	33.3	24.5	49.7	25.4	108.3	59.0	434.7	3		
1993	2	01	34.7	13.8	78.6	114.2	106.3	19.7	60.6	29.2	63.8	67.5	146.9	25.5	760.8				
1994	2	01	30.6	65.6	107.1	89.4	94.2	55.0	24.4	34.5	32.6	93.9	189.1	9.3	825.7				
1995	2	01	3.4	20.7	68.1	142.3	126.2	3	81.1	55.1	86.7	56.6	112.0	97.3	78.4	927.9	3		
1996	2	01	6.5	53.3	60.0	57.5	102.5	30.6	47.7	43.6	28.7	90.6	12.6	34.7	568.3				
1997	2	01	67.3	16.1	58.0	46.4	59.7	66.0	18.8	14.0	25.1	63.0	38.1	2.7	475.2				
1998	2	01	1.9	41.8	27.8	96.2	147.5	52.7	84.1	51.6	115.2	96.3	94.7	122.7	932.5				
1999	2	01	43.4	93.8	62.7	71.2	3	68.6	116.9	3	140.3	199.3	101.9	47.9	1027.1	3			
2000	2	01	28.3	123.4	73.9	57.5	110.9	61.6	70.1	55.9	130.6	90.7	41.5	41.1	885.5				
2001	2	01	49.3	19.3	81.9	19.4	87.0	47.2	40.5	17.7	66.4	43.1	54.2	53.8	579.8				
2002	2	01	26.8	16.8	111.5	134.8	116.3	74.8	39.7	22.5	45.5	55.7	44.0	64.1	752.5				
2003	2	01	3.0	24.1	75.4	128.0	46.4	61.5	31.1	67.6	42.6	54.9	134.8	78.8	748.2				
2004	1	01	22.0	98.7	40.8	197.7	101.4	51.1	51.2	19.7	59.0	170.0	118.6	31.9	962.1				
2005	1	01	11.1	33.2	33.7	93.6	161.3	36.6	21.4	66.0	97.8	131.3	47.8	111.2	845.0				
2006	1	01	58.1	31.7	214.9	153.7	194.9	115.4	16.3	22.7	25.1	195.6	91.1	30.2	1149.9	3			
2007	1	01	7.6	10.9	62.0	150.6	125.4	54.2	56.1	58.9	18.0	200.6	117.4	82.9	944.6				
2008	1	01	30.5	84.6	93.8	112.9	225.6	119.5	61.5	94.7	48.8	140.7	134.2	60.0	1206.8				
2009	1	01	51.4	91.4	142.8	55.2	15.7	64.1	53.2	28.4	21.5	129.1	95.1	58.4	806.3				
2010	1	01	6.3	36.6	23.2	187.3	160.3	107.8	136.7	51.8	76.4	132.9	196.6	134.6	1250.5	1			
MEDIOS										111.3							93.1	57.1	829.6
MÁXIMOS										123.4							157.9	134.6	225.6
MÍNIMOS										1.9							12.6	2.7	1.9

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES				SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL									
VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)				ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO									
FECHA DE PROCESO : 2010/08/30		TIPO EST ENTIDAD REGIONAL	SP 01 IDEAM 11 BOGOTÁ	DEPTO MUNICIPIO BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ	BOGOTÁ D.C.	FECHA-INSTALACIÓN FECHA-SUSPENSIÓN	1972-FEB						
AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB * NOVIE * DICIE * VR ANUAL *													
1972	2	01	12.6	13.0	13.9	13.4	13.3	12.9	13.2	13.0	13.4	13.0	13.1
1973	2	01	13.3	13.6	13.6	13.2	12.8	12.9	12.6	12.8	13.1	12.4	13.1
1974	2	01	12.1	12.8	13.5	13.0	12.5	13.0	12.4	12.5	13.2	12.0	12.7
1975	2	01	12.3	12.8	13.0	13.1	12.4	12.5	12.6	12.4	12.9	12.3	12.7
1976	2	01	12.2	12.4	13.2	13.0	13.4	12.7	12.4	13.1	13.3	13.0	12.9
1977	2	01	12.7	13.1	14.2	13.9	13.6	13.3	12.9	13.4	13.6	13.2	13.4
1978	2	01	12.5	13.6	13.8	13.9	13.9	13.3	12.7	13.1	13.2	13.2	13.3
1979	2	01	12.9	13.0	13.7	14.3	13.9	13.4	13.2	13.3	13.7	14.0	13.3
1980	2	01	13.5	13.3	14.3	14.2	14.2	13.9	13.7	12.8	13.8	13.7	13.3
1981	2	01	12.5	14.0	13.8	14.1	14.1	14.0	13.4	13.2	13.0	13.2	13.7
1982	2	01	12.7	13.9	13.9	13.7	13.8	13.8	13.4	13.2	13.7	13.3	13.4
1983	2	01	14.1	14.3	14.7	14.6	14.8	13.9	13.6	13.7	13.3	13.6	12.8
1984	2	01	12.5	12.8	13.4	13.3	13.8	13.1	12.7	13.2	12.7	13.1	13.0
1985	2	01	12.5	12.3	13.8	13.6	13.6	13.2	12.7	12.3	12.8	13.1	12.7
1986	2	01	13.2	12.7	13.2	13.9	13.9	13.3	12.9	13.3	13.3	13.4	13.5
1987	2	01	13.2	14.1	13.8	14.3	14.3	14.0	13.4	13.6	13.9	13.8	13.4
1988	2	01	13.3	14.0	13.3	14.0	13.3	13.3	13.1	13.8	13.2	13.2	13.3
1989	2	01	13.0	13.0	12.6	13.8	13.6	13.8	13.0	13.2	13.1	13.7	13.8
1990	2	01	13.5	13.4	14.1	14.0	14.2	14.3	13.6	13.8	13.6	13.4	13.5
1991	2	01	13.6	14.6	14.0	14.4	14.6	14.7	13.9	13.6	14.1	13.4	14.1
1992	2	01	13.8	14.2	14.9	15.1	14.7	15.1	13.7	14.4	13.7	14.0	13.9
1993	2	01	14.2	14.8	14.8	14.5	14.5	14.6	14.1	14.1	13.8	13.7	13.8
1994	2	01	13.6	14.1	14.1	14.5	14.5	14.7	14.2	13.4	13.7	13.2	13.3
1995	2	01	12.9	13.8	14.0	13.8	14.0	13.4	12.8	13.3	12.8	13.1	12.5
1996	2	01	11.5	12.8	13.2	13.3	13.0	13.4	12.9	13.4	13.5	13.2	13.5
1997	2	01	13.1	14.0	13.6	13.6	14.4	14.3	13.9	13.9	13.9	14.5	13.9
1998	2	01	14.6	15.0	15.2	15.6	14.8	14.5	13.8	13.9	14.2	14.4	13.9
1999	2	01	13.6	13.3	13.7	13.9	14.0	13.5	13.8	13.4	13.2	13.3	13.4
2000	2	01	12.9	13.2	13.5	13.7	13.8	14.0	13.5	13.0	13.5	13.2	13.0
2001	2	01	12.5	13.5	14.0	14.2	14.2	13.6	13.9	13.2	14.2		

FECHA DE PROCESO : 2010/08/30				ESTACIÓN : 2120579										APTO EL DORADO	
LATITUD	0442 N	TIPO EST	SP	IDEMAM	DEPTO	BOGOTÁ D.C.	FECHA-INSTALACIÓN	1972-FEB							
LONGITUD	7409 W	ENTIDAD	01	BOGOTÁ	MUNICIPIO	BOGOTÁ	FECHA-SUSPENSIÓN								
ELEVACIÓN	2547 m.s.n.m	REGIONAL	11		CORRIENTE	BOGOTÁ									
***** AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB * NOVE * DICE * VR ANUAL *****															
1972	2	01	80	79	80	83	82	80	77	78	78	81	82	80	
1973	2	01	78	77	78	82	77	83	81	81	84	84	84	83	
1974	2	01	81	83	83	81	80	78	76	77	83	85	85	81	
1975	2	01	76	83	81	81	83	80	81	81	82	85	87	82	
1976	2	01	79	84	85	86	82	79	77	74	74	74	79	80	
1977	2	01	78	78	79	82	82	79	76	81	78	84	86	79	
1978	2	01	79	79	79	85	82	81	77	78	78	80	82	80	
1979	2	01	74	75	80	83	82	83	78	78	78	82	84	83	
1980	2	01	79	83	78	80	82	83	74	77	77	78	81	80	
1981	2	01	79	79	81	83	84	80	77	79	79	85	82	81	
1982	2	01	82	83	86	85	85	78	77	76	78	84	84	82	
1983	2	01	81	83	86	82	82	80	76	78	77	83	82	83	
1984	2	01	83	84	82	84	82	81	79	83	85	85	81	83	
1985	2	01	83	73	78	81	81	79	78	80	81	84	85	80	
1986	2	01	78	84	86	85	82	75	74	78	87	87	86	81	
1987	1	01	80	76	81	78	81	76	79	80	80	85	83	77	
1988	1	01	80	74	81	81	80	83	80	82	82	83	86	81	
1989	1	01	80	84	78	81	81	77	76	76	80	81	81	79	
1990	1	01	77	83	77	82	80	74	75	72	74	84	78	78	
1991	1	01	75	76	82	79	80	76	77	73	76	79	85	81	
1992	1	01	78	79	75	76	77	72	74	73	74	75	80	77	
1993	1	01	76				82	74	75	74	78	82	85	79	
1994	2	01	83	85	83	82	81	76	77	77	77	82	84	81	
1995	1	01	76	81	83	81	82	81	85	77	77	79	82	81	
1996	1	01	78	79	83	84	85	81	83	80	78	84	81	82	
1997	1	01	83	81	83	81	80	79	78	73	76	74	81	75	
1998	1	01	77	77	77	78	81	75	76	75	80	78	79	77	
1999	1	01	78	77	81	80	79	83	72	76	83	83	84	81	
2000	1	01	79	79	79	78	81	75	76	74	82	80	83	79	
2001	1	01	75	76	83	76	83	75	79	78	81	85	83	80	
2002	1	01	76	76	81	84	79	73	74	76	81	85	82	80	
2003	1	01	74	77	81	84	79	73	75	73	81	79	79	78	
2004	1	01	80	76	77	85	84	75	77	75	82	83	84	80	
2005	1	01	83	84	82	83	87	81	77	78	79	86	86	84	
2006	1	01	82	80	86	84	87	83	76	84	86	86	86	83	
2007	1	01	76	72	81	86	88	84	80	83	88	88	88	83	
2008	1	01	83	84	85	87	88	85	78	87	83	88	89	86	
2009	1	01	84	83	88	83	80	77	76	76	71	78	80	79	
2010	1	01	71	76	77	85	84	81	85	81	83	83	83	81	
MEDIOS				79	81	82	82	79	77	77	82	83	83	80	
WÁXIMOS				84	88	87	85	85	87	84	88	89	88	89	
MINIMOS				71	72	74	76	72	72	71	74	78	75	71	

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES										SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL																		
VALORES TOTALES MENSUALES DE BRILLO SOLAR (Horas)										ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO																		
FECHA DE PROCESO : 2010/08/30										FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB																		
LATITUD	0442 N	LONGITUD	7409 W	IDEAM	DEPTO	BOGOTÁ D.C.	IDEAM	MUNICIPIO	BOGOTÁ	FECHA-SUSPENSIÓN	***** AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB * NOVE * DICIE * VR ANUAL *****																	
ELEVACIÓN	2547 m.s.n.m	REGIONAL	11	BOGOTÁ	CORRIENTE	BOGOTÁ																						
1972	2	01	143.5	165.4	141.0	133.7	115.9	113.0	146.3	147.1	131.5	157.7	144.8	158.2	1698.1													
1973	2	01	180.3	193.4	144.6	119.5	127.4	59.1	123.6	104.8	93.2	99.8	109.3	131.8	1486.8													
1974	2	01	151.2	95.6	134.5	102.1	109.7	119.9	123.5	141.8	105.7	114.2	114.0	214.9	1527.1													
1975	2	01	192.7	111.9	125.0	128.1	98.1	73.2	109.0	102.8	99.8	105.3	115.6	86.8	1348.3													
1976	2	01	167.1	150.5	100.1	69.8	97.4	78.7	131.5	151.2	119.8	107.5	128.4	131.4	1433.4													
1977	2	01	204.7	133.7	144.1	94.7	73.2	100.4	128.4	124.5	129.5	111.4	115.8	183.1	1543.5													
1978	2	01	200.3	137.6	137.6	78.0	107.6	137.9	171.8	156.2	163.1	139.3	142.8	188.6	1623.2	3												
1979	2	01	243.4	209.6	140.7	121.3	117.1	124.2	170.9	118.1	143.1	114.2	135.7	159.7	1798.0													
1980	2	01	220.0	206.8	152.2	146.0	146.6	138.4	177.3	146.5	141.9	127.3	149.7	135.2	1911.9	3												
1981	2	01	234.0	193.0	164.5	88.8	98.8	*	152.5	142.9	131.4	132.4	175.9	138.5	1592.7	3												
1982	2	01	201.8	118.1	149.0	113.8	116.5	135.6	135.2	154.3	101.2	123.5	129.4	129.3	1606.7	3												
1983	2	01	190.1	172.1	186.9	85.7	135.3	126.1	166.1	159.8	127.8	116.5	149.5	162.1	1748.0	3												
1984	2	01	180.2	132.7	163.1	129.2	133.8	3	133.7	124.1	3	97.6	110.6	128.6	183.8	3												
1985	2	01	214.6	164.5	155.4	116.8	128.5	116.3	139.4	136.9	131.4	134.8	145.5	227.4	1811.5													
1986	1	01	154.0	132.0	123.6	93.5	131.5	109.3	160.3	163.2	124.6	102.4	136.0	183.4	1613.8													
1987	1	01	200.6	144.7	159.1	127.8	127.8	130.4	123.9	132.6	129.7	105.7	153.9	197.1	1733.3	3												
1988	1	01	209.8	155.5	186.7	110.2	118.5	108.5	105.6	132.1	107.1	124.3	96.6	164.6	1487.4	3												
1989	1	01	177.6	135.4	148.6	130.4	113.2	123.2	164.7	134.8	120.8	121.1	125.3	179.8	1674.9	3												
1990	2	01	153.1	133.2	118.1	111.7	103.8	129.0	145.6	152.3	142.8	118.2	123.3	156.8	1587.9													
1991	1	01	237.9	157.8	136.0	128.8	93.3	117.8	103.7	135.0	128.8	3	100.0	156.1	1495.2	3												
1992	1	01	182.3	148.3	175.5	133.3	119.6	150.9	126.8	159.5	142.8	111.5	123.2	161.5	1735.2													
1993	2	01	169.7	236.6	133.3	92.8	101.3	110.8	143.7	146.4	123.4	129.6	117.7	185.4	1557.4	3												
1994	2	01	182.3	118.8	112.3					103.7	3	117.6	126.8	111.4	413.4	3												
1996	2	01	148.9	3	126.3	160.7	99.7	89.6	111.0	104.3	134.1	116.6	157.9	119.9	696.2	3												
1997	1	01	193.0	145.7	120.7	93.5	80.4	116.9	121.9	124.3	121.3	130.9	132.7	143.2	1555.4	3												
1999	1	01	131.1	3	83.5	127.9	95.0	3	138.4	108.0	138.6	120.5	72.5	111.0	144.7	3												
2000	1	01	184.5	151.8	132.6	3	105.6	3	87.7	3	117.3	130.8	148.2	95.7	1439.7	3												
2001	1	01	234.3	150.5	110.2	71.1	97.1	119.6	136.7	3	132.1	117.7	130.2	125.3	1605.8	3												
2002	1	01	195.0	185.7	137.0	136.0	76.7	104.3	127.5	144.3	140.7	137.1	115.8	155.7	1662.9	3												
2003	1	01	235.7	139.2	139.8	96.2	116.5	97.5	127.2	132.2	123.6	93.7	117.0	121.0	1539.6	3												
2004	1	01	182.7	3	185.0	157.6	95.7	75.8	126.3	128.7	121.2	108.2	108.2	137.2	1555.8	3												
2005	1	01	142.3	168.6	90.0	70.0	158.9	70.0	103.0	163.8	123.2	117.8	110.5	119.4	1264.6	3												
2006	1	01	142.3	168.6	90.0	86.2	97.5	119.6	134.8	133.1	119.3	96.0	92.9	107.6	1418.2													
2007	1	01	134.5	215.4	87.1	*	74.4	76.3	119.3	100.3	119.7	110.2	136.7	144.4	1318.3	3												
2008	1	01	147.1	148.4	140.6	114.4	79.1	96.1	95.0	105.9	108.6	104.2	93.9	170.0	1403.3													
2009	1	01	112.7	120.1	96.7	100.6	91.5	109.2	131.5	155.9	161.6	128.8	128.7	191.2	1528.3													
2010	1	01	224.7	140.5	3	135.3	101.4	101.8	136.7	103.3																		
MEDIOS		184.9	151.7	137.9	106.4	107.1	113.2	134.0	135.0	123.1	118.9	128.0	158.0	1599.1														
MAXIMOS		243.4	236.6	186.7	146.6	163.1	177.3	163.2	175.9	175.9	227.4	243.4																
MINIMOS		112.7	83.5	87.1	69.8	73.2	59.1	95.0	100.3	72.5	93.7	92.9	86.8	59.1														

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES										SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL			
VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)										ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO			
FECHA DE PROCESO : 2010/08/30										FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB			
LATITUD 0442 N LONGITUD 7409 W ELEVACION 2347 m.s.n.m										FECHA-SUSPENSIÓN			
*****										*****			
ANO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB * NOVE * DICE * VR ANUAL *										*****			
*****										*****			

Anexo B. Ecuaciones del modelo de simulación ecológica humedal Jaboque.

B1. Componente hidrológico

$$\text{Vol_Sec_1}(t) = \text{Vol_Sec_1}(t - dt) + (\text{Flujo_Cuenca_Aferente} + \text{Pre_sec_1} - \text{Flujo_Sec_2} - \text{Evapo}) * dt$$

$$\text{INIT Vol_Sec_1} = 64018$$

INFLOWS:

$$\text{Flujo_Cuenca_Aferente} = \text{Prom_anual_de_Q_año}$$

$$\text{Pre_sec_1} = (\text{P_ef_Sec_1} * 10^{-1})$$

OUTFLOWS:

$$\text{Flujo_Sec_2} = \text{Vol_Sec_1} - \text{Vol_m_sec_1} + \text{Flujo_Cuenca_Aferente}$$

$$\text{Evapo} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_1}$$

$$\text{Vol_sec_2}(t) = \text{Vol_sec_2}(t - dt) + (\text{Flujo_Sec_2} + \text{Pre_sec_2} - \text{Flujo_Sec_3} - \text{Eva_2}) * dt$$

$$\text{INIT Vol_sec_2} = 159221$$

INFLOWS:

$$\text{Flujo_Sec_2} = \text{Vol_Sec_1} - \text{Vol_m_sec_1} + \text{Flujo_Cuenca_Aferente}$$

$$\text{Pre_sec_2} = (\text{P_ef_Sec_2} * 10^{-1})$$

OUTFLOWS:

$$\text{Flujo_Sec_3} = \text{Vol_sec_2} - \text{Vol_m_sec_2} + \text{Flujo_Sec_2}$$

$$\text{Eva_2} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_2}$$

$$\text{Vol_sec_3}(t) = \text{Vol_sec_3}(t - dt) + (\text{Flujo_Sec_3} + \text{Pre_sec_3} - \text{Salida_R_Bogotá} - \text{Eva_3}) * dt$$

$$\text{INIT Vol_sec_3} = 191000$$

INFLOWS:

$$\text{Flujo_Sec_3} = \text{Vol_sec_2} - \text{Vol_m_sec_2} + \text{Flujo_Sec_2}$$

$$\text{Pre_sec_3} = (\text{P_ef_Sec_3} * 10^{-1})$$

OUTFLOWS:

$$\text{Salida_R_Bogotá} = \text{Vol_sec_3} - \text{Vol_m_sec3} + \text{Flujo_Sec_3}$$

$$\text{Eva_3} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_3}$$

```

Area_de_cuenca_afidente = 5.7*10^6
Area_sec_1 = 116396
Area_sec_2 = 261132.4
Area_sec_3 = 315308
Continentalidad = 1250
Latitud = 4.74
msnm = 2547
Precipitación_anual = 1*828
Prof_Sec3 = Vol_sec_3*Area_sec_3
Prof_Sec_1 = Vol_Sec_1/Area_sec_1
Prof_Sec_2 = Vol_sec_2/Area_sec_2
Prom_anual_de_Q_año = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitación_anual*Area_de_cuenca_afidente*0.001)+1*(Area_de_
cuenca_afidente*(Precipitación_anual/817.7)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else
P_emp
P_ef_Sec3 = if P_emp=0
then0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_3*0.001)+1*(Area_sec_3*(Pr
ecipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
P_ef_Sec_1 = if P_emp=0
then0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_1*0.001)+1*(Area_sec_1*(Pr
ecipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
P_ef_Sec_2 = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_2*0.001)+1*(Area_sec_2*(Precipi
tacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_empP_emp = 0
Q__Cuenca_afidente = if P_emp=0 then
0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_de_cuen-
ca_afidente*0.001)+1*(Area_de_cuenca_afidente*(Precipitaci
on_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
THR__Jt = ((Vol_Sec_1+Vol_sec_2+Vol_sec_3)/Salida__R_Bogotá)*365
TRH_1_Sec1 = (Vol_Sec_1/Flujo_Sec_2)*365
TRH_1_Sec2 = ( Vol_sec_2/Flujo_Sec_3)*365
TRH_1_Sec_3 = (Vol_sec_3/Salida__R_Bogotá)*365

```

Vol_m_sec3 = 191000

Vol_m_sec_1 = 64018

Vol_m_sec_2 = 159221

Precipitacion_1972__2010 = GRAPH(MOD(TIME,468))

(1.00, 72.1), (2.00, 21.9), (3.00, 57.2), (4.00, 159), (5.00, 118), (6.00, 58.1), (7.00, 36.7), (8.00, 39.6), (9.00, 17.4), (10.0, 71.6), (11.0, 101), (12.0, 28.5), (13.0, 2.90), (14.0, 3.80), (15.0, 50.1), (16.0, 39.3), (17.0, 75.0), (18.0, 59.5), (19.0, 55.1), (20.0, 57.4), (21.0, 130), (22.0, 115), (23.0, 106), (24.0, 117), (25.0, 79.6), (26.0, 100), (27.0, 28.5), (28.0, 83.3), (29.0, 61.3), (30.0, 65.5), (31.0, 15.8), (32.0, 46.8), (33.0, 91.8), (34.0, 100), (35.0, 151), (36.0, 24.0), (37.0, 5.50), (38.0, 32.2), (39.0, 130), (40.0, 57.9), (41.0, 105), (42.0, 56.4), (43.0, 60.3), (44.0, 52.2), (45.0, 55.1), (46.0, 161), (47.0, 70.7), (48.0, 77.9), (49.0, 31.2), (50.0, 59.9), (51.0, 118), (52.0, 122), (53.0, 104)...

B2. Componente estado trófico

$M_TP(t) = M_TP(t - dt) + (IN - Salida) * dt$

INIT M_TP = 25

INFLOWS:

$IN = (Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_1)$

OUTFLOWS:

$Salida = M_TP / TW_1$

$M_TP_2(t) = M_TP_2(t - dt) + (IN_2 - Salida_2) * dt$

INIT M_TP_2 = 25

INFLOWS:

$IN_2 = Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_2$

OUTFLOWS:

$Salida_2 = M_TP_2 / TW_2$

$M_TP_3(t) = M_TP_3(t - dt) + (IN_3 - Salida_3) * dt$

INIT M_TP_3 = 25

INFLOWS:

$IN_3 = Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_3$

OUTFLOWS:

$$\text{Salida}_3 = M_TP_3 / TW_3$$

$$\text{Area_de_cuenca_aficiente} = 5.7 \times 10^6$$

$$A_sec2 = 261132.4$$

$$A_sec3 = 315308.4$$

$$A_Sec_1 = 116396$$

$$Ctp_Sec_1 = ((M_TP / Vol_sec1))$$

$$Ctp_Sec_2 = ((M_TP_2 / Vol_sec2))$$

$$Ctp_Sec_3 = ((M_TP_3 / Vol_sec3))$$

$$\text{Profundidad_media} = (Zsec1 + Zsec2 + Zsec3) / 3$$

Promedio_anual_de_Q_año = if Promedio_emp_de_Q_anual=0 then $0 \times (0.38 \times P_precipitacion \times \text{Area_de_cuenca_aficiente} \times 0.001) + 1 \times (\text{Area_de_cuenca_aficiente} \times (P_precipitacion / 840) \times 0.01 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 10^{(-6)})$ else Promedio_emp_de_Q_anual

$$\text{Promedio_emp_de_Q_anual} = 0$$

$$\text{Promedio_mensual_de_Q} = \text{Promedio_anual_de_Q_año} / 12$$

$$P_Cin = 0.98$$

$$P_precipitacion = 840$$

$$P_Q = 1.79755e+006$$

$$\text{Temperatura_fondo_de_agua}_3 = 15$$

$$TRH_Sec2 = TW_2 \times 365$$

$$TRH_Sec_1 = TW_1 \times 365$$

$$TSI_TP_OECD_2 = 10 \times (1 \times 1.55 \times (Cin_Sec_2 / (\text{SQRT}(TW_2)))^{0.82})$$

$$TSI_TP_OECD_3 = 10 \times (1 \times 1.55 \times (Cin_Sec_3 / (\text{SQRT}(TW_3)))^{0.82})$$

$$TSI_TP_OECD_1 = 10 \times (1 \times 1.55 \times (Cin_Sec_1 / (\text{SQRT}(TW_1)))^{0.82})$$

$$TW_1 = (Vol_sec1 / \text{Promedio_anual_de_Q_año})$$

$$TW_2 = (Vol_sec2 / \text{Promedio_anual_de_Q_año})$$

$$TW_3 = (Vol_sec3 / \text{Promedio_anual_de_Q_año})$$

$$\text{Volumen_total} = (Vol_sec1 + Vol_sec2 + Vol_sec3)$$

$$Vol_sec1 = A_Sec_1 \times Zsec1$$

$$Vol_sec2 = A_sec2 \times Zsec2$$

$$Vol_sec3 = A_sec3 \times Zsec3$$

Cin_Sec_1 = GRAPH (MOD (TIME, 12))

(1.00, 0.98), (2.00, 1.03), (3.00, 0.74), (4.00, 0.45), (5.00, 0.37), (6.00, 0.555),
(7.00, 0.54), (8.00, 1.03), (9.00, 0.75), (10.0, 0.51), (11.0, 0.52), (12.0, 0.72)

Cin_Sec_2 = GRAPH(MOD(TIME,12))

(1.00, 1.40), (2.00, 1.80), (3.00, 0.83), (4.00, 0.51), (5.00, 0.3), (6.00, 0.43), (7.00,
0.65), (8.00, 0.82), (9.00, 0.72), (10.0, 0.54), (11.0, 0.61), (12.0, 0.94)

Cin_Sec_3 = GRAPH(MOD(TIME,12))

(1.00, 0.7), (2.00, 0.52), (3.00, 0.7), (4.00, 0.31), (5.00, 0.29), (6.00, 0.31), (7.00,
0.35), (8.00, 0.3), (9.00, 0.41), (10.0, 0.36), (11.0, 0.28), (12.0, 0.5)

Precipitacion = GRAPH(MOD(TIME,24))

(1.00, 29.0), (2.00, 41.0), (3.00, 65.0), (4.00, 103), (5.00, 92.0), (6.00, 54.0), (7.00,
41.0), (8.00, 47.0), (9.00...)....

B3. Componente sólidos suspendidos totales

$M_SST_Sec_1(t) = M_SST_Sec_1(t - dt) + (IN + Carga_interna - Salida - Sedi-$
 $mentación) * dt$

INIT M_SST_Sec_1 = 25

INFLOWS:

$IN = (Promedio_anual_de_Q_año * C_SST_Sec_1)$

$Carga_interna = Sed_SST_Sec_1 * Rres$

OUTFLOWS:

$Salida = M_SST_Sec_1 / TRH_Sec_1$

$Sedimentación = R_Sed * M_SST_Sec_1$

$M_SST_Sec_3(t) = M_SST_Sec_3(t - dt) + (IN_3 + Carga_interna_3 - Sali-$
 $da_3 - Sedimentacion_3) * dt$

INIT M_SST_Sec_3 = 25

INFLOWS:

$IN_3 = (Q_Sec_3 * CSST_Sec_3)$

$Carga_interna_3 = Sed_SST_sec_3 * Rres_3$

OUTFLOWS:

$Salida_3 = M_SST_Sec_3 / TRH_Sec_3$

$Sedimentacion_3 = R_Sed_3 * M_SST_Sec_3$

$$M_SST_sec_2(t) = M_SST_sec_2(t - dt) + (IN_2 + Carga_interna_2 - Salida_2 - Sedimentacion_2) * dt$$

$$INIT\ M_SST_sec_2 = 25$$

INFLOWS:

$$IN_2 = (Q_Sec_2 * C_SST_Sec_2)$$

$$Carga_interna_2 = Sed_SST_Sec_2 * Rres_2$$

OUTFLOWS:

$$Salida_2 = M_SST_sec_2 / TRH_Sec_2$$

$$Sedimentacion_2 = R_Sed_2 * M_SST_sec_2$$

$$Sed_SST_Sec_1(t) = Sed_SST_Sec_1(t - dt) + (Sedimentación - Carga_interna - MIneralización_sec_1) * dt$$

$$INIT\ Sed_SST_Sec_1 = 10^4$$

INFLOWS:

$$Sedimentación = R_Sed * M_SST_Sec_1$$

OUTFLOWS:

$$Carga_interna = Sed_SST_Sec_1 * Rres$$

$$MIneralización_sec_1 = Sed_SST_Sec_1 * R_min$$

$$Sed_SST_Sec_2(t) = Sed_SST_Sec_2(t - dt) + (Sedimentacion_2 - Carga_interna_2 - Mineralizacion_sec_2) * dt$$

$$INIT\ Sed_SST_Sec_2 = 10^4$$

INFLOWS:

$$Sedimentacion_2 = R_Sed_2 * M_SST_sec_2$$

OUTFLOWS:

$$Carga_interna_2 = Sed_SST_Sec_2 * Rres_2$$

$$Mineralizacion_sec_2 = Sed_SST_Sec_2 * R_min$$

$$Sed_SST_sec_3(t) = Sed_SST_sec_3(t - dt) + (Sedimentacion_3 - Carga_interna_3 - Mineralización_sec3) * dt$$

$$INIT\ Sed_SST_sec_3 = 10^4$$

INFLOWS:

$$Sedimentacion_3 = R_Sed_3 * M_SST_Sec_3$$

OUTFLOWS:

$$\text{Carga_interna_3} = \text{Sed_SST_sec_3} * \text{Rres_3}$$

$$\text{Mineralización_sec3} = \text{Sed_SST_sec_3} * \text{R_min}$$

$$\text{Area_de_cuenca_aferente_2} = 5.7 * 10^6$$

$$\text{A_sec2} = 261132.4$$

$$\text{A_sec3} = 315308.4$$

$$\text{A_Sec_1} = 116396$$

$$\text{FT_2} = 2.5$$

$$\text{FT_3} = 2.5$$

$$\text{Profundidad_media} = (\text{Zsec1} + \text{Zsec2} + \text{Zsec3}) / 3$$

Promedio_anual_de_Q_año = if Promedio_emp_de_Q_anual=0 then
 $0 * (0.38 * \text{Precipitacion} * \text{Area_de_cuenca_aferente_2} * 0.001) + 1 * (\text{Area_de_cuenca_aferente_2} * (\text{Precipitacion} / 53) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 * 10^{(-6)})$ else Promedio_
emp_de_Q_anual

$$\text{Promedio_emp_de_Q_anual} = 0$$

$$\text{Promedio_mensual_de_Q} = \text{Promedio_anual_de_Q_año} / 12$$

$$\text{P_precipitacion} = 840$$

$$\text{Q_Sec_2} = 1.823e+006$$

$$\text{Q_Sec_3} = 1.8459e+006$$

$$\text{Red_sed} = (72/12) * \text{YSPM}$$

$$\text{Red_sed_2} = (72/12) * \text{YSPM_2}$$

$$\text{Red_sed_3} = (72/12) * \text{YSPM_3}$$

$$\text{Rres} = 0.6$$

$$\text{Rres_2} = 0.6$$

$$\text{Rres_3} = 0.6$$

$$\text{R_min} = 0.25$$

$$\text{R_Sed} = \text{Profundidad_media} * \text{Red_sed}$$

$$\text{R_Sed_2} = \text{FT_2} * \text{Profundidad_media} * \text{Red_sed_2}$$

$$\text{R_Sed_3} = \text{FT_3} * \text{Profundidad_media} * \text{Red_sed_3}$$

$$\text{SST_Sec_1} = (\text{M_SST_Sec_1} / \text{Vol_sec1})$$

$$\text{SST_Sec_2} = (\text{M_SST_sec_2} / \text{Vol_sec2})$$

$$\text{SST_Sec_3} = (\text{M_SST_Sec_3} / \text{Vol_sec3})$$

$$\text{TRH_Sec_1} = (\text{Vol_sec1} / \text{Promedio_anual_de_Q_año})$$

$$\text{TRH_Sec_2} = (\text{Vol_sec2} / \text{Q_Sec_2})$$

$$\text{TRH_Sec_3} = (\text{Vol_sec3} / \text{Q_Sec_3})$$

$$v = 5$$

$$\text{Volumen_total} = (\text{Vol_sec1} + \text{Vol_sec2} + \text{Vol_sec3})$$

$$\text{Vol_sec1} = \text{A_Sec_1} * \text{Zsec1}$$

$$\text{Vol_sec2} = \text{A_sec2} * \text{Zsec2}$$

$$\text{Vol_sec3} = \text{A_sec3} * \text{Zsec3}$$

$$\text{YSPM} = 1$$

$$\text{YSPM_2} = 1.0$$

$$\text{YSPM_3} = 1.0$$

$$\text{CSST_Sec_3} = \text{GRAPH}(\text{TIME})$$

$$(0.00, 0.00), (1.00, 50.0), (2.00, 70.0), (3.00, 91.0), (4.00, 83.0), (5.00, 69.0), (6.00, 52.0), (7.00, 38.0), (8.00, 63.0), (9.00, 74.0), (10.0, 85.0), (11.0, 46.0), (12.0, 38.0)$$

$$\text{C_SST_Sec_2} = \text{GRAPH}(\text{MOD}(\text{TIME}, 12))$$

$$(0.00, 36.0), (1.00, 68.0), (2.00, 83.0), (3.00, 94.0), (4.00, 74.0), (5.00, 65.0), (6.00, 50.0), (7.00, 34.0), (8.00, 66.0), (9.00, 75.0), (10.0, 81.0), (11.0, 47.0), (12.0, 36.0)$$

$$\text{C_SST_Sec_1} = \text{GRAPH}(\text{MOD}(\text{TIME}, 12))$$

$$(0.00, 40.0), (1.00, 50.0), (2.00, 70.0), (3.00, 91.0), (4.00, 83.0), (5.00, 69.0), (6.00, 52.0), (7.00, 38.0), (8.00, 63.0), (9.00, 74.0), (10.0, 85.0), (11.0, 46.0), (12.0, 38.0)$$

$$\text{Precipitacion} = \text{GRAPH}(\text{MOD}(\text{TIME}, 24))$$

$$(1.00, 29.0), (2.00, 41.0), (3.00, 65.0), (4.00, 103), (5.00, 92.0), (6.00, 54.0), (7.00, 41.0), (8.00, 47.0), (9.00, 70.0), (10.0, 107), (11.0, 91.0), (12.0, 53.0), (13.0, 31.0), (14.0, 40.0), (15.0, 64.0), (16.0, 103), (17.0, 93.0), (18.0, 55.0), (19.0, 41.0), (20.0, 45.0), (21.0, 69.0), (22.0, 104), (23.0, 90.0), (24.0, 51.0)$$

B4. Componente producción primaria fitoplanctónica

$$\text{Biomasa_de_fitoplancton}(t) = \text{Biomasa_de_fitoplancton}(t - dt) +$$

$$(\text{Produccion_inicial_fitoplancton} - \text{Pastoreo} - \text{Eliminación_fitoplancton}) * dt$$

$$\text{INIT Biomasa_de_fitoplancton} = 450000$$

INFLOWS:

Produccion_inicial_fitoplancton =

$$(30.6 * \text{Clorofila_sec_1}^{\wedge 0.927}) * 30 * 0.45 * A_Sec_1 * Zsec1 * 0.01 * ((Temp_norm + 0.1) / 17) * 0.25$$

OUTFLOWS:

Pastoreo = Biomasa_de_fitoplancton * Rata_de_consumo

Eliminación_fitoplancton = Biomasa_de_fitoplancton * 1.386 / renovacion_fitoplanctn

$$Biomasa_de_fitoplancton_2(t) = Biomasa_de_fitoplancton_2(t - dt) + (Produccion_inicial_fitoplancton_2 - Pastoreo_2 - Eliminación_fitoplancton_2) * dt$$

INIT Biomasa_de_fitoplancton_2 = 450000

INFLOWS:

Produccion_inicial_fitoplancton_2 =

$$(30.6 * \text{Clorofila_a_sec_2}^{\wedge 0.927}) * 30 * 0.45 * A_sec2 * Zsec2 * 0.01 * ((Temp_norm + 0.1) / 17) * 0.25$$

OUTFLOWS:

Pastoreo_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 * Rata_de_consumo

Eliminación_fitoplancton_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 * 1.386 / renovacion_fitoplanctn_2

$$Biomasa_de_fitoplancton_3(t) = Biomasa_de_fitoplancton_3(t - dt) + (Produccion_inicial_fitoplancton_3 - Pastoreo_3 - Eliminación_fitoplancton_3) * dt$$

INIT Biomasa_de_fitoplancton_3 = 450000

INFLOWS:

Produccion_inicial_fitoplancton_3 =

$$(30.6 * \text{Clorofila_a_sec_3}^{\wedge 0.927}) * 30 * 0.45 * A_sec3 * Zsec3 * 0.01 * ((Temp_norm + 0.1) / 17) * 0.25$$

OUTFLOWS:

Pastoreo_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 * Rata_de_consumo

Eliminación_fitoplancton_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 * 1.386 / renovacion_fitoplanctn_3

$$A_sec2 = 261132.4$$

$$A_sec3 = 315308.4$$

$$A_Sec_1 = 116396$$

$$A_T = A_Sec_1 + A_sec2 + A_sec3$$

$$Ppf_sec3 = (Biomasa_de_fitoplancton_3 / Vol_Msec3) * 10$$

$$Ppf_Sec_1 = (Biomasa_de_fitoplancton / Vol_Msec1) * 10$$

$$Ppf_Sec_2 = (Biomasa_de_fitoplancton_2 / Vol_sec_2) * 10$$

$$Producción_fitoplancton = (Biomasa_de_fitoplancton / renovacion_fitoplanctn)$$

$$Producción_fitoplancton_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 / renovacion_fitoplanctn_2$$

$$Producción_fitoplancton_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 / renovacion_fitoplanctn_3$$

$$Rata_de_consumo = 0.5$$

$$renovacion_fitoplanctn = 3.2/7$$

$$renovacion_fitoplanctn_2 = 3.2/7$$

$$renovacion_fitoplanctn_3 = 3.2/7$$

$$Volumen_total = Vol_Msec1 + Vol_sec_2 + Vol_Msec3$$

$$Vol_Msec1 = A_Sec_1 * Zsec1$$

$$Vol_Msec3 = A_sec3 * Zsec3$$

$$Vol_sec_2 = A_sec2 * Zsec2$$

$$Z_promedio = (Zsec1 + Zsec2 + Zsec3) / 3$$

$$Clorofila_a_sec_1 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$$

$$(1.00, 22.5), (2.00, 25.5), (3.00, 18.9), (4.00, 11.4), (5.00, 8.40), (6.00, 6.60), (7.00, 10.5), (8.00, 19.5), (9.00, 15.3), (10.0, 9.30), (11.0, 14.4), (12.0, 15.3)$$

$$Clorofila_a_sec_2 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$$

$$(1.00, 34.2), (2.00, 26.1), (3.00, 22.5), (4.00, 12.6), (5.00, 11.1), (6.00, 12.3), (7.00, 16.8), (8.00, 18.6), (9.00, 15.9), (10.0, 11.7), (11.0, 10.5), (12.0, 22.8)$$

$$Clorofila_a_sec_3 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$$

$$(1.00, 7.80), (2.00, 5.85), (3.00, 3.30), (4.00, 1.95), (5.00, 1.56), (6.00, 1.74), (7.00, 2.70), (8.00, 3.69), (9.00, 3.21), (10.0, 2.22), (11.0, 1.65), (12.0, 2.80)$$

$$Precipitacion_24 = GRAPH(MOD(TIME, 24))$$

(1.00, 29.0), (2.00, 41.0), (3.00, 65.0), (4.00, 103), (5.00, 92.0), (6.00, 54.0), (7.00, 41.0), (8.00, 47.0), (9.00, 70.0), (10.0, 107), (11.0, 91.0), (12.0, 53.0), (13.0, 31.0), (14.0, 40.0), (15.0, 64.0), (16.0, 103), (17.0, 93.0), (18.0, 55.0), (19.0, 41.0), (20.0, 45.0), (21.0, 69.0), (22.0, 104), (23.0, 90.0), (24.0, 51.0)

Temp_norm = GRAPH(mod(time, 12))

(1.00, 16.8), (2.00, 16.6), (3.00, 15.4), (4.00, 15.2), (5.00, 14.6), (6.00, 14.4), (7.00, 16.3), (8.00, 16.6), (9.00, 14.9), (10.0, 15.1), (11.0, 15.9), (12.0, 16.9)

B5. Componente biomasa de macrófitas

Biomasa_macrófitas(t) = Biomasa_macrófitas(t - dt) + (Produccion_inicial_macrófitas - Consumo_de_macrófitas - Eliminación_macrófitas) * dt

INIT Biomasa_macrófitas = 0

INFLOWS:

Produccion_inicial_macrófitas = Area*Cobertura_de_macrófitas*0.01*Factor_de_retardo_pH*Rata_de_producción_macrófitas*Y_Temp_Moderador*YTP

OUTFLOWS:

Consumo_de_macrófitas = Biomasa_macrófitas*Rata_de_consumo

Eliminación_macrófitas = Biomasa_macrófitas*1.386/Rotacion_de_volumen_de_macrófitas

A1 = Area*((Profundidad_máxima-Profundidad_1_mt)/(Profundidad_máxima+Profundidad_1_mt*EXP(3-Factor_de_forma^1.5)))^(0.5/Factor_de_forma)

Area = 3500

Cobertura_de_macrófitas = (10.49+1.052*(Sec_mv/Prof_media)-1.993*(90/(90-Latitud))-0.422*(Profundidad_maxima^0.5)+0.490*LOG10(A1*10^(-6)))^2.1

DR = ((Area*10^(-6))^0.5/Prof_media)

Duracion_periodo_crecimiento = 12*Latitud

Factor_de_forma = (Prof_media/Profundidad_maxima)*3

Factor_de_retardo_pH = SMTH1(pH55,Rotacion_de_volumen_de_macrófitas,pH55)

Nor__producción_macrófitas = 0.001*Area*1/52*10^(2.472+1.028*LOG10(Cobertura_de_macrófitas)-0.516*90/(90-Latitud))

```

pH55 = IF(pH_Humedal)>5.5THEN(1+1.85)*(pH_Humedal/5.5-1)
ELSE(ph95)
ph95 = IF(pH_Humedal)>9.5THEN(1-38)*(pH_Humedal)/(9.5-1)ELSE(1)
pH_Humedal = 6.5
Profundidad_1_mt = 1
Profundidad_maxima = 1.2
Prof_media = ((Zsec1+Zsec2+Zsec3)/3)
Rata_de_consumo = 0.25
Rata_de_producción_macrófitas = 1.5
Rotacion_de_volumen_de_macrófitas = (300/7)
Sec = IF(0.75*(YDr*YpH*YCol*YDm))>(Profundidad_maxima)
THEN(Profundidad_maxima)ELSE(0.75*(YDr*YpH*YCol*YDm))
Sec_mv = (SMTH1 (Sec,52,Sec))
YCol = IF(Col<30)THEN(1-3.0)*((Col/30)-1)ELSE(1-0.05*(Col/30-1))
YDm = IF(Noname_1<10)THEN(1+0.5*(Noname_1/10-1))
ELSE(1+0.1*(Noname_1/10-1))
YDr = IF (DR<0.25)THEN(1-1*((DR/0.25)-1))ELSE(1-0.02*((DR/0.25)-1))
YpH = (1-0.9*(pH_Humedal/6-1))
YTP = (Fósforo_en_triburario)
Y_Temp_Moderador = (Temp_norm/Temperatura_media_epil)/2
Fósforo_en_triburario = GRAPH(MOD(TIME, 12))
(1.00, 0.98), (1.92, 1.03), (2.83, 0.74), (3.75, 0.45), (4.67, 0.37), (5.58, 0.555),
(6.50, 0.54), (7.42, 1.03), (8.33, 0.75), (9.25, 0.51), (10.2, 0.52), (11.1, 0.72),
(12.0, 0.72)

```


Julio Eduardo Beltrán Vargas

Biólogo Marino, egresado de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, M.A en Planificación y Administración del Desarrollo Regional, de la Universidad de los Andes, MSc. en Ecoauditoría y Gestión Ambiental Empresarial, del Instituto de Investigaciones Ecológicas, de Málaga (España) y doctor en Ciencias-Biología, de la Universidad Nacional de Colombia. Ejerció como profesor investigador en el Centro Interdisciplinario de Estudios Regionales (CIDER), de la Universidad de los Andes y ha sido catedrático de la Universidad Javeriana y de la Escuela Superior de Administración Pública. También ha realizado investigaciones y asesorías técnicas sobre gestión ambiental, desarrollo sustentable para entidades nacionales y extranjeras de cooperación técnica. Sus trabajos incluyen varios libros y artículos científicos publicados en revistas de impacto nacional e internacional. En la actualidad, se desempeña como docente de tiempo completo en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en el programa de Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Este libro se
terminó de imprimir
en julio de 2016
en la Editorial UD
Bogotá, Colombia