

MODELIZACIÓN DEL PULSO DE INUNDACIÓN EN EL LAGO BOA (AMAZONÍA COLOMBIANA)

MODELING OF THE FLOOD PULSE IN THE LAKE BOA (COLOMBIAN AMAZON)

Gabriel A. Pinilla A.

*Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
Fax 57-1-3165310; E-mail: gapinillaa@unal.edu.co*

RESUMEN

Se proponen varios modelos basados en la simbología Stella que explican, a partir de sus características hidrológicas, el funcionamiento físico y químico del lago Boa, un meandro del río Metá localizado en la cuenca media del río Caquetá en la Amazonía colombiana. El primer modelo se refiere al aumento de volumen de agua en el lago como reflejo del pulso de inundación en la región. Los demás modelos tratan de los efectos que provoca dicho pulso hidrológico sobre las variables químicas del agua en el lago, con especial referencia al fósforo total (PT) y al carbono orgánico disuelto (COD). La modelización permitió determinar que el pulso de inundación es el principal modificador de las características físicas y químicas, pero que en la época de desconexión del río con el lago éste se torna químicamente autónomo, ya que algunas sustancias se resuspenden a partir del sedimento o se ven afectadas por otros procesos no considerados como la producción primaria, la actividad bacteriana y la excreción. El desarrollo de los modelos para el PT y el COD tuvo en consideración el hecho de que cada una de estas sustancias tiene un patrón determinado de movimiento en el ecosistema acuático. Se incluyen algunas observaciones con respecto a la utilidad de los modelos desarrollados en la predicción de la dinámica del lago Boa.

Palabras Clave: Modelización, pulso de inundación, aguas claras, lago Boa, Amazonía, Colombia

ABSTRACT

Based in the hydrologic characteristics, several models created with the Stella language were set out to explain the physical and chemical functioning of the Lake Boa, a meandric lake of the River Metá located in the Middle Caquetá Basin at the Colombian Amazon. The first model exhibited the changes in the water column level due to the regional flood pulse. The other models considered the effects that the hydrological pulse causes over the chemical variables in the lake, especially on total phosphorus (TP) and dissolved organic carbon (DOC). The models revealed that the flood pulse was the main force that modified the chemical and physical lake characteristics; however during time that lake is disconnected from the river, the lake gained chemical autonomy and some elements were re-suspended from the sediments, or they were affected by other processes not measured in this study like primary production, bacterial production, and excretion. The development of the models for the TP and the DOC had in consideration the fact that each one of these substances has a determined pattern of movement in the aquatic ecosystem. Some observations with respect to the utility of the models developed in the prediction of the dynamics of the Lake Boa are included.

Keywords: Modeling, flood pulse, clear waters, Lake Boa, Amazon, Colombia

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de modelos para predecir el comportamiento limnológico de los sistemas acuáticos ha tenido gran interés desde hace varias décadas. Desde que Vollenweider propusiera en 1968 uno de los primeros modelos para calcular la cantidad de fósforo en el agua de un lago (Hakanson y Peters 1995) hasta hoy, son innumerables los esfuerzos por construir herramientas destinadas a conocer, a partir de algunas variables de entrada, la respuesta esperada de otras variables dependientes o para predecir el comportamiento del sistema en su totalidad. Este ejercicio de modelar los procesos limnológicos tiene, por una parte, un interés académico o teórico, ya que muchos trabajos de modelización se realizan para entender los fenómenos implicados sin que necesariamente se quiera resolver un problema práctico. Sin embargo, con la modelización también se pretende disponer de herramientas que permitan abordar el manejo de los ecosistemas acuáticos, que faculten estudiar diferentes posibilidades de uso y que en definitiva posibiliten la toma de decisiones con respecto a la utilización sostenible de estos ambientes acuáticos.

Existen diferentes tipos de modelos, desde los verbales y conceptuales que se limitan a señalar de qué manera se conectan los componentes de un sistema, hasta los modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales que pueden simularse en lenguaje computacional para predecir con determinada exactitud el comportamiento de una variable o de un conjunto de ellas. Los modelos en limnología se han centrado en pronosticar el comportamiento físico y químico del agua de acuerdo a las condiciones morfológicas e hidrológicas de los cuerpos de agua. No obstante, algunos de ellos se han desarrollado para evaluar la producción primaria, la biomasa algal, la producción pesquera o la depredación sobre el fitoplancton (Margalef 2002). Para la región amazónica los modelos propuestos han sido tanto de tipo estadístico (de regresión) como de balance de masas y han tratado aspectos como la estacionalidad hidrológica de los cationes (Weber 1997), el balance de nitrógeno en el agua (Kern *et al.* 1998), la producción pesquera en lagos de várzea (Silva 1998), las relaciones entre la turbidez y el plancton (Bozelli y Garrido 2000) y las entradas de solutos a los lagos a partir de las aguas subterráneas (Furch 2000), entre otros temas.

En este trabajo se presenta una serie de modelos desarrollados con el fin de comprender mejor el funcionamiento de un lago de aguas claras (uno de los tres tipos de aguas de la Amazonía según Sioli 1967) influenciado por el pulso de inundación. Este fenómeno hidrológico es determinante en la marcha ecológica no sólo de los ambientes acuáticos de planicies de desbordamiento de la cuenca amazónica (Junk *et al.* 1989, Junk 1997), sino también de otras áreas inundables del mundo (Hamillton y Lewis 1987, Wen 1992, Heckman 1998, Vazzoler *et al.* 1997, Carignan y Vaithiyathan 1999, Oliveira y Calheiros 2000). Dicho fenómeno físico implica la fluctuación, durante el año, del nivel del agua, que pasa de una época de máxima inundación a otra de estiaje. Entre estos dos extremos se presentan épocas de transición (ascenso y descenso de la inundación).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El lago Boa es un antiguo meandro del río Metá que se ubica cerca de su desembocadura sobre el río Caquetá, en las coordenadas 71° 36' 28" LW y 0° 56' 33" LS, en la región Amazónica colombiana (Pinilla 2004) (Figura 1). Tiene forma de herradura, su longitud es de 680 m, su anchura media es de 46 m, su perímetro mide 1540 m y su profundidad fluctúa entre 2 y 6 m de acuerdo al periodo hidrológico. Está sometido a la influencia directa del río Metá, de aguas claras (Pinilla 2004) y se inunda anualmente conforme se produce el pulso de inundación en la región, el cual se puede observar en la Figura 2. Este lago se visitó siete veces desde mayo de 1999 hasta mayo de 2000 y en él se registraron algunas características morfométricas (profundidad) e hidroquímicas (nutrientes, iones, conductividad, carbono orgánico disuelto) que se emplearon en la modelización. El lago se caracteriza por estar rodeado de bosques inundables con vegetación en estado de clímax y gran profusión de epífitas y parásitas (Proradam 1979). Urrego (1996) estudió estas formaciones vegetales en la región del Medio Caquetá y encontró que en general son de menor altura que otras comunidades vegetales de zonas no inundables, tienen menos biomasa aérea arbórea y presentan mayor densidad de palmas (*Mauritia flexuosa*, *Mauritiella aculeata* y *Euterpe catinga*) y de árboles de menos de 10 cm de diámetro de las familias Lecythidaceae,

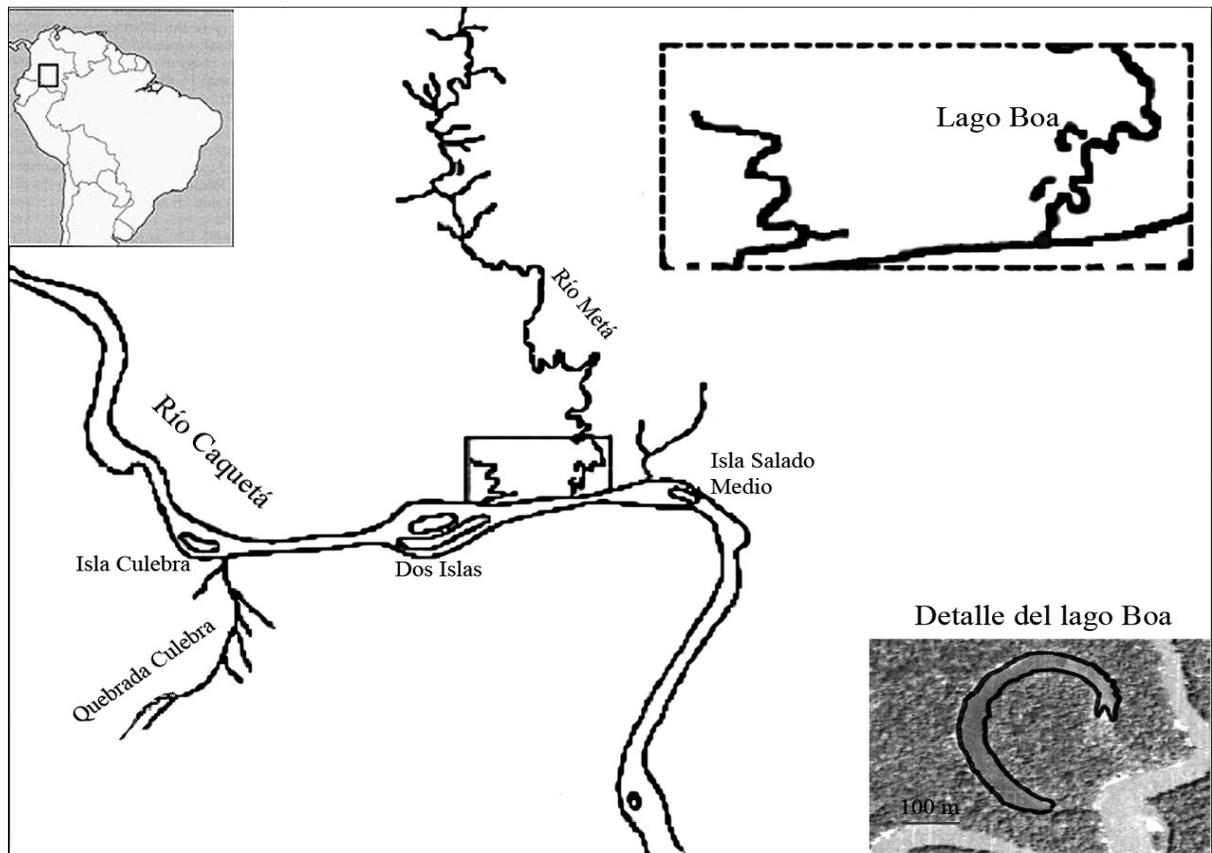


Figura 1. Ubicación del lago Boa en la región amazónica colombiana. En el recuadro superior derecho se amplía la desembocadura del río Meta en sobre el río Caquetá. La forma de herradura del lago Boa se detalla en el recuadro inferior derecho.

Euphorbiacea y Chrysobalanaceae. Las aguas del lago Boa son transparentes, oxigenadas, pobremente mineralizadas, tienen amplias variaciones en nutrientes y pH y presentan cantidades elevadas de materia orgánica. En este ambiente se desarrolla una comunidad del fitoplancton muy diversa pero poco abundante, compuesta principalmente por clorofíceas, cianobacterias, criptofíceas y dinoflagelados. Solo en el periodo seco se observa una importante abundancia de algas verdes del grupo de las clorococales (Pinilla 2004).

Definición de Variables

El establecimiento de las relaciones entre las variables que se definen a continuación, los modelos gráficos y computacionales derivados de ellas, así como los valores esperados (simulaciones) de las variables de interés, se manejaron mediante el

programa STELLA[®] 7.0.2 Research.

Área (A): es la superficie que ocupa el espejo de agua del lago en metros cuadrados. El área del lago Boa se determinó mediante un planímetro y una fotografía aérea de la zona tomada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (vuelo M-1430 de febrero 3 de 1972). Debido a que la cubeta del lago es de pendiente fuerte, no se presentaron variaciones apreciables del área a lo largo del periodo hidrológico.

Profundidad del lago (Z): se asume como el espesor de la columna de agua en el centro del lago y se establece en metros. La profundidad se midió en cada una de las siete visitas al lago, realizadas entre mayo de 1999 y mayo de 2000. A partir de estos datos se determinó, mediante promedios de los datos conocidos e interpolación

gráfica, la profundidad para los meses en que no se viajó al lago (Figura 2).

Volumen del lago (V): representa la cantidad de agua en metros cúbicos que se almacena en el lago. Esta variable es función del área del lago y de su profundidad en la zona central ($V=A \times Z$). Este cálculo asume una profundidad igual en todo el lago, por lo cual puede haber una sobreestimación del volumen.

Descarga del tributario (Q): es el caudal en metros cúbicos por mes que suministra el río Metá al lago Boa. Este caudal se calculó a partir de las variaciones en el volumen del lago (volumen en un mes dado menos volumen promedio entre octubre y marzo, meses en que el lago estuvo desconectado del río). Esta aproximación al caudal no considera las pérdidas por evaporación e infiltración.

Concentración de la sustancia (C): se refiere a la cantidad de una sustancia dada en un volumen determinado de agua. La concentración en el tributario se identifica como C_i . Se mide en miligramos por litro o gramos por metro cúbico.

Tasa de sedimentación (TS): es la velocidad con que se precipita hacia el fondo una sustancia en la columna de agua y normalmente se asume como una constante que depende de la ley de Stokes (Hakanson y Peters 1995), aunque sus valores pueden variar temporal y espacialmente. Sus dimensiones son 1/mes.

Tasa de resuspensión (TR): es la proporción en que regresan a la columna de agua las sustancias que se han sedimentado. Depende de variables como la superficie expuesta al viento, la profundidad de acción de las olas y la forma del litoral y del

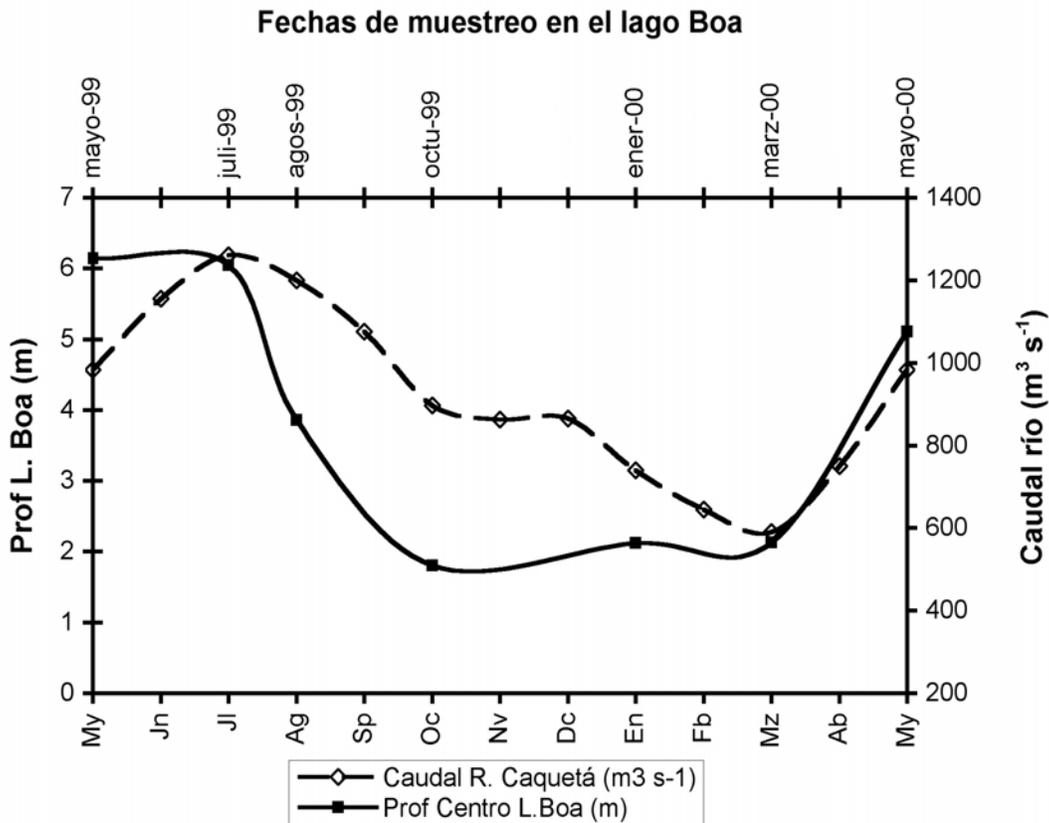


Figura 2. Caudal del río Caquetá en La Pedrera (1994 y 1995) y profundidad de la estación central del lago Boa (Amazonas) durante el periodo de estudio.

fondo del lago. Para este estudio se asume como una constante adimensional (0,2 o 20%) que se puede emplear en lagos pequeños de menos de 1 km² de superficie (Hakanson y Peters 1995).

Tasa de resuspensión dependiente de la temperatura de fondo (TRF): este factor representa el transporte desde el sedimento (difusión) en función de la temperatura del fondo. El transporte se incrementa con el aumento en la temperatura del agua de fondo.

Tasa de resuspensión dependiente de la relación temperatura superficial/temperatura de fondo (TRSF): este factor describe el proceso de difusión que gobierna el flujo de una sustancia desde el sedimento. Cuando la columna de agua está mezclada (no hay estratificación) la temperatura del fondo es igual a la de la superficie y el flujo a través de la columna de agua se asume alto.

Tasa de pérdida de COD (TPCOD): representa el flujo de salida del carbono orgánico disuelto por degradación, absorción, adsorción y coagulación, ya que el COD no se sedimenta debido a su pequeño tamaño, por lo que sigue un movimiento Browniano (Mayorga y Aufdenkampe 2001).

Presupuestos de los Modelos

Las siguientes condiciones y suposiciones previas fueron establecidas para la elaboración de los modelos:

- La entrada de agua al lago Boa está constituida básicamente por la descarga del tributario (el río Metá, Figura 1). No se tiene en cuenta la precipitación directa sobre el lago, los aportes subterráneos ni la escorrentía directa. De igual manera, la salida de agua del lago corresponde al volumen que pasa al río, sin considerar otros factores como la evaporación o la infiltración.
- No se tiene en cuenta el agua que se desborda (se asume que este evento no ocurre).
- Las fuerzas físicas determinan en gran medida los fenómenos biológicos, lo cual significa que los procesos como el pulso de inundación, la sedimentación y la difusión ejercen la mayor influencia sobre las características físicas y químicas del agua. Los eventos de origen biológico como la producción primaria son también importantes. No obstante, otras actividades biológicas como la bioturbación, el consumo y la excreción no se consideran.

- Los datos disponibles solo pertenecen a un año de muestreo, por lo cual los modelos propuestos son una primera aproximación. Se requerirán series de datos de varios años para ajustar y calibrar los esquemas desarrollados en este trabajo.

- En los cálculos del volumen de agua del lago se asume que la profundidad medida en el centro es uniforme en todo el fondo del sistema y que las paredes del vaso son verticales. Esto implica que el volumen de agua puede estar sobreestimado.

- La descarga del tributario se calculó indirectamente con base en la fluctuaciones de volumen del lago, pero es necesario tener presente que el caudal del río Metá que entra al Boa es solo una fracción del volumen total que este río acarrea, ya que la conexión entre los dos sistemas no es directa sino que se da a través de la planicie de inundación.

Descripción de los Modelos

Fluctuaciones del Volumen de Agua: En primera instancia se desarrolló un modelo para predecir el volumen de agua que almacena el lago Boa de acuerdo a los cambios ocasionados por el pulso de inundación. En cierta medida, este es el modelo básico que representa el evento físico determinante en la química del lago y que sirve de punto de partida para los demás modelos. En la Figura 3a se observa la estructura conceptual de este modelo, según la cual el lago funciona como un reservorio de agua (el cuadrado), con un flujo de entrada (la flecha que representa la entrada del tributario) y otro de salida (la flecha que muestra la salida del agua almacenada). En la Figura 3b se puede ver el mismo modelo en la simbología Stella, en el que aparecen también dos convertidores (círculos aislados) que representan o definen condicionantes externas al proceso principal y que en este caso corresponden a los valores mensuales de caudal del río Metá que ingresan al lago y al volumen mínimo que el lago conserva en los meses secos. Las flechas curvas que van de los convertidores y del almacenamiento a los flujos en la Figura 3b son conectores que unen los elementos del modelo, es decir, definen los mecanismos de causalidad entre los distintos compartimentos del diagrama y en este sentido constituyen flujos de información.

Influencia del Pulso sobre las Variables Químicas: A fin de evaluar las implicaciones del pulso de inundación en las características químicas

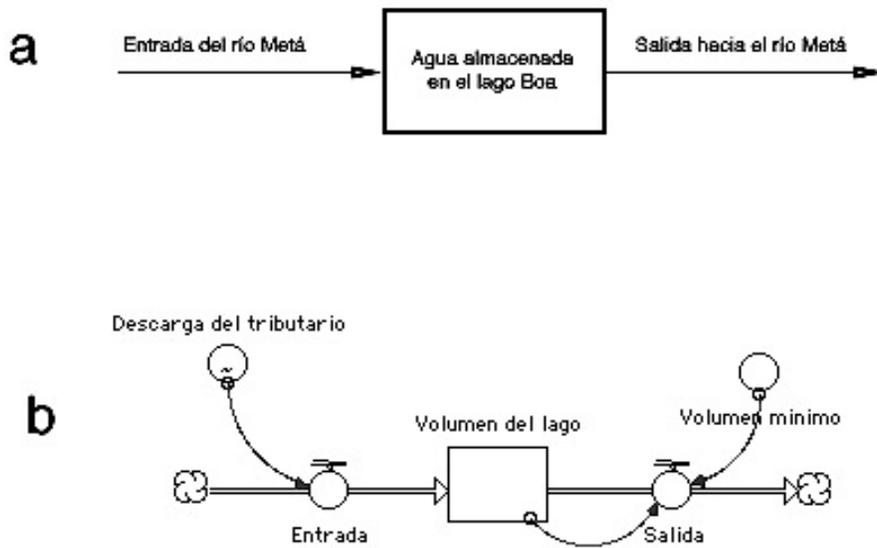


Figura 3. a- Modelo conceptual del pulso de inundación en el lago Boa. b- Representación del mismo modelo en la simbología del programa Stella

del lago Boa se desarrolló el modelo general de balance de masas que se presenta en la Figura 4. De nuevo, la figura 4a representa la manera en que se relacionan los componentes del sistema y la Figura 4b muestra el mismo proceso en los símbolos del programa Stella. Este modelo incluye, además del almacenamiento en el lago, otros procesos que tienen que ver con la dinámica de una sustancia cualquiera que ingrese al cuerpo de agua, tales como su concentración en el tributario (C_i) y su pérdida por sedimentación (TS). Además, los parámetros morfométricos del lago que definen su volumen (área y profundidad) se representan como influencias externas o convertidores en la Figura 4b.

Modelos para Fósforo Total y Carbono Orgánico Disuelto: Como cada sustancia tiene un comportamiento distinto, determinado por la forma en que fluye a través de los ciclos biogeoquímicos, fue necesario construir modelos particulares basados sobre el modelo general de balance de masas. En consecuencia, se diseñaron dos modelos, uno para fósforo total (PT) y otro para carbono orgánico disuelto (COD) por ser éstas sustancias de especial interés en la ecología del lago Boa.

El modelo de PT se muestra en las Figuras 5a y 5b. La primera constituye la conceptualización del proceso y la segunda lo representa según el

programa Stella. Este modelo tiene en cuenta no solo la entrada de fósforo por el tributario (C_{ixQ}), sino también la carga interna de este nutriente a partir de los sedimentos (TR). Dicha carga interna depende de las tasas de resuspensión del elemento acumulado en el fondo del lago, las cuales a su vez están determinadas por la temperatura de las aguas de fondo y superficie. Se supone, de acuerdo con Hakanson y Peters (1995), que en la medida en que la temperatura de fondo sea mayor, el transporte de fósforo desde el sedimento hacia la columna de agua se incrementa por difusión; este factor se conoce como la tasa de resuspensión dependiente de la temperatura de fondo (TRF). Igualmente, cuando la temperatura de superficie y la de fondo son iguales el lago está mezclado y la resuspensión aumenta debido a que la difusión se hace mayor (tasa de resuspensión dependiente de la relación temperatura de superficie/temperatura de fondo $TRSF$).

El modelo del COD se representa tanto conceptualmente (Figura 6a) como en la simbología Stella (Figura 6b). Este modelo incluye la producción autóctona de carbono orgánico a partir de la producción primaria. Margalef (2002) indica que entre el 15 y el 20% del carbono producido por las algas es materia orgánica soluble; para el presente modelo se ha supuesto que el aporte de carbono orgánico disuelto en el lago Boa fluctúa entre el 6 y el 40% de la producción primaria

MODELIZACIÓN DEL PULSO DE INUNDACIÓN EN UN LAGO AMAZÓNICO

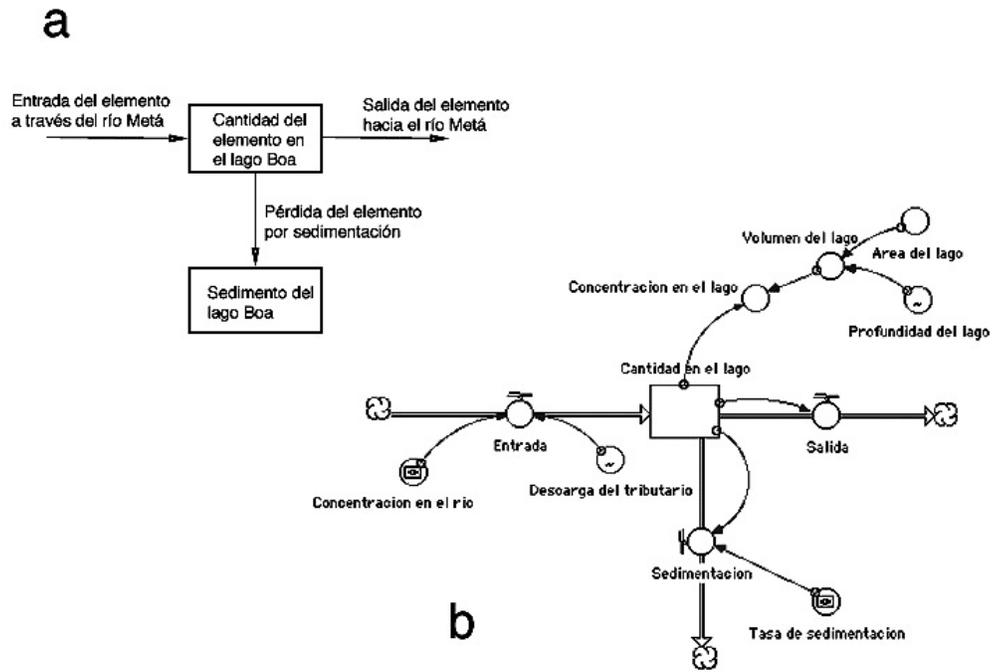


Figura 4. a- Modelo conceptual del balance de masas en el lago Boa. b- Representación del mismo modelo en la simbología del programa Stella

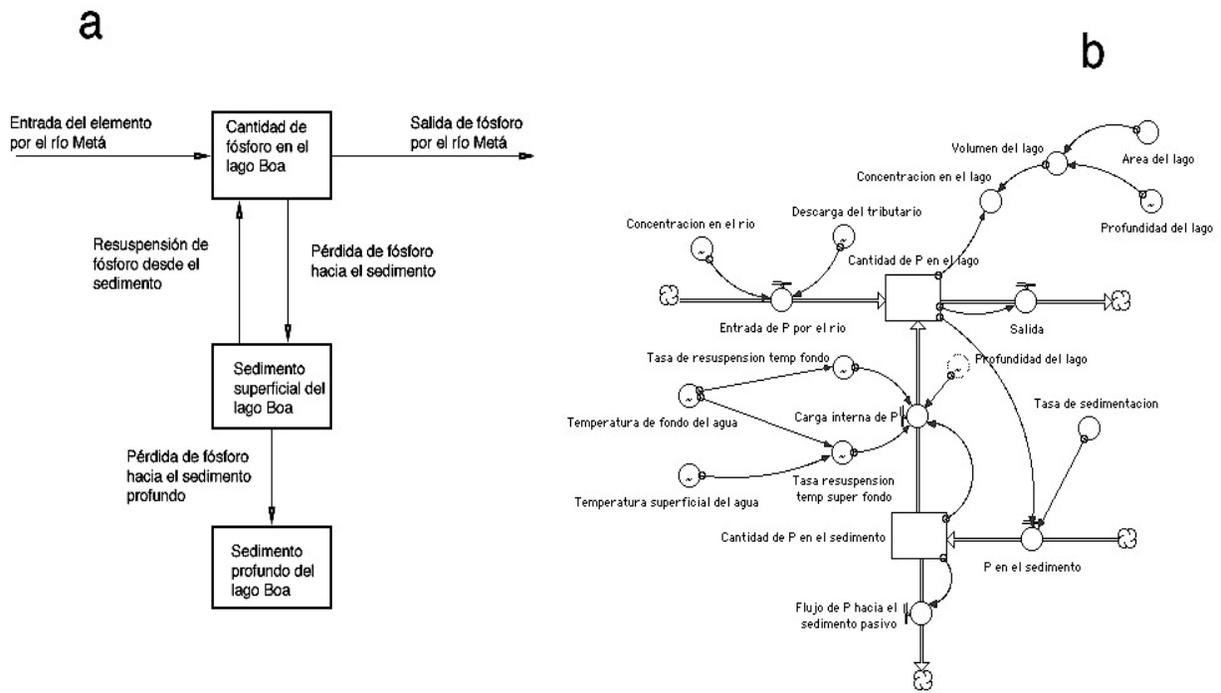


Figura 5. a- Modelo conceptual del balance de masas para el fósforo total en el lago Boa. b- Representación del mismo modelo en la simbología del programa Stella

dependiendo del momento del ciclo hidrológico. El mayor porcentaje (40%) se tomó para los meses secos (octubre a enero) y el menor (6%) para los demás meses, lo que constituye un moderador estacional. Los valores mensuales de producción primaria se calcularon de mediciones hechas en el lago Boa (Pinilla 2004). Debido a que la materia orgánica disuelta es de tamaño tan pequeño que no se sedimenta según la ley de Stokes, sino que se difunde en la masa de agua mediante movimientos Brownianos, se adiciona un flujo de salida del COD (TPCOD) que es una tasa de pérdida interna dentro del lago debida a procesos como degradación, absorción, coagulación

(Mayorga y Aufdenkampe 2001) y adsorción a sólidos. Esta tasa se considera *a priori* en un 15%.

Las relaciones conceptuales representadas gráficamente en las Figuras 3 a 6 se convirtieron en una serie de ecuaciones mediante el programa Stella. Estas ecuaciones, cuya versión no formal se presentan en el Anexo, permitieron a su vez obtener los valores para los parámetros de interés, los cuales se graficaron y se compararon con los datos medidos efectivamente en el lago Boa. En algunos casos se realizaron análisis de regresión entre los datos medidos y los simulados a fin de establecer el grado de confiabilidad de la modelación.

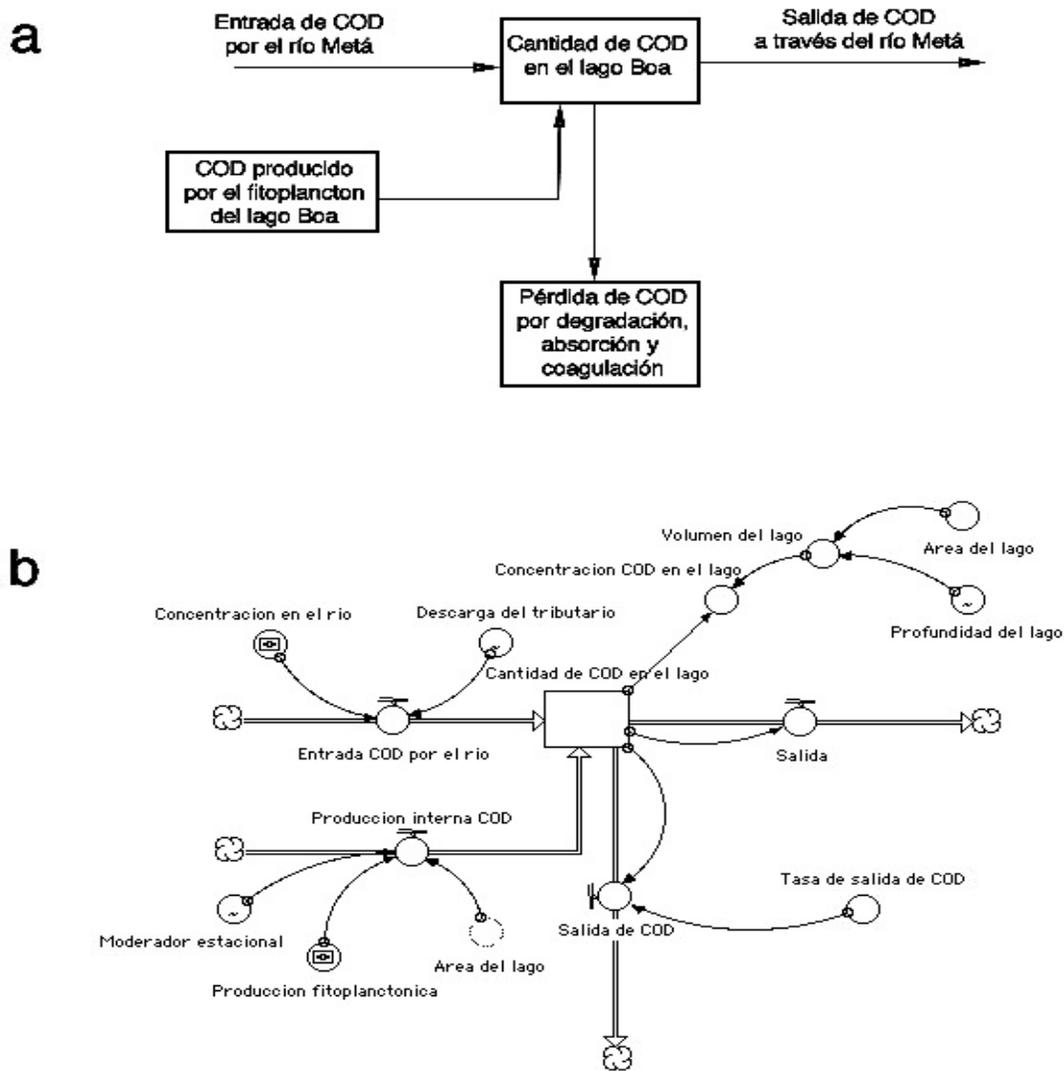


Figura 6. a- Modelo conceptual del balance de masas para el COD en el lago Boa. b- Representación del mismo modelo en la simbología del programa

RESULTADOS

En la Figura 7 se puede ver la simulación obtenida para la entrada de agua al lago y para la cantidad de agua almacenada (V) en el mismo a lo largo de un año. Como puede observarse, las dos curvas dibujadas en la Figura 7 muestran claramente el pulso de inundación, con un máximo de la descarga del afluente en julio y un tope de almacenamiento de agua en el lago en la primera semana de agosto. Hay un desfase entre los dos picos que podría deberse al efecto conjunto del tiempo de llenado del lago y del tiempo de residencia del agua.

En la Figura 8 se comparan los volúmenes de agua calculados mediante el modelo anterior y los medidos en campo. El análisis de regresión entre los dos conjuntos de datos mostró un buen ajuste ($r = 0,75$; $r^2 = 56,9\%$; $p < 0,05$). Sin embargo, hay cerca de un 43% de diferencia entre los valores medidos y los simulados que seguramente se ajustará en la medida en que se cuente con más observaciones de campo y se incluyan otros factores que influyen en el volumen almacenado,

tales como la evaporación, la precipitación directa, la escorrentía y la infiltración. Igualmente, será necesario tener en cuenta la morfometría y la batimetría del lago, ya que la inclusión de estos factores permitirán rectificar la pendiente de los bancos del lago, lo que seguramente ajustaría mucho mejor la modelización del agua contenida en el lago Boa.

El resultado de la simulación con el modelo de balance de masas indica que la concentración de una sustancia cualquiera (C) sigue el patrón del pulso de inundación, es decir, hay un pico de máxima concentración de la sustancia en el lago (Figura 9), el cual ocurre en agosto, un mes después del pico máximo de inundación, es decir cuando el agua empieza a descender. Por supuesto, este modelo presupone que la única fuente de ingreso de la sustancia al lago es el tributario (CixQ) y que no existen otros procesos que modifiquen su concentración.

La simulación con el modelo de PT arrojó los resultados que se presentan en la Figura 10. Aún cuando el aporte de fósforo a través del río sigue siendo alto, la resuspensión del elemento se hace

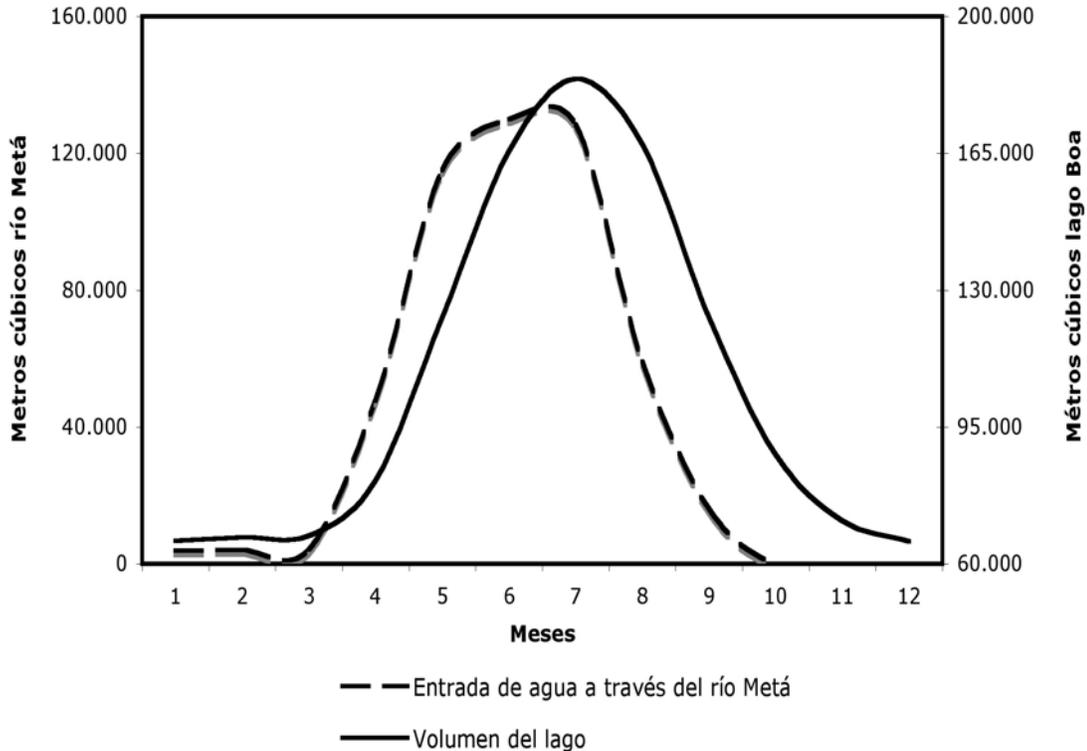


Figura 7. Resultado de la modelización del pulso de inundación en el lago Boa con el programa Stella. Se representan la entrada de agua a través tributario y el volumen de agua almacenada en el sistema

PINILLA

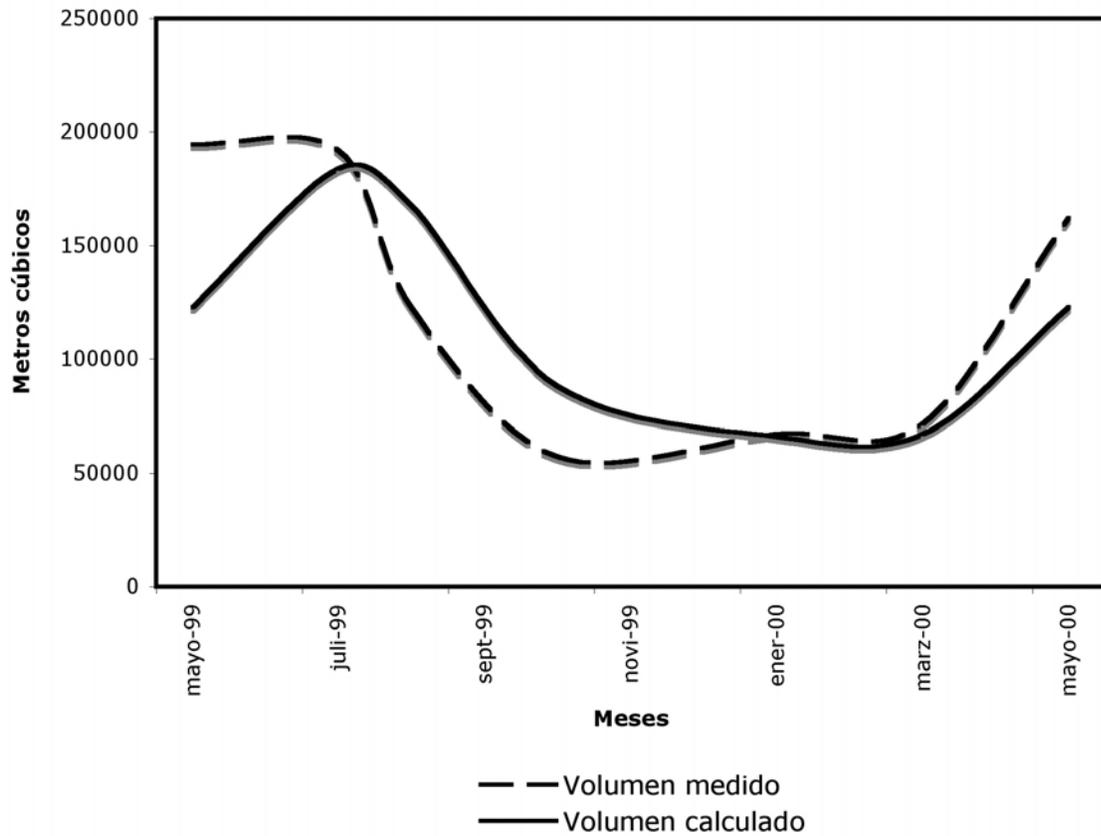


Figura 8. Comparación entre el volumen de agua medido y el calculado en el lago Boa

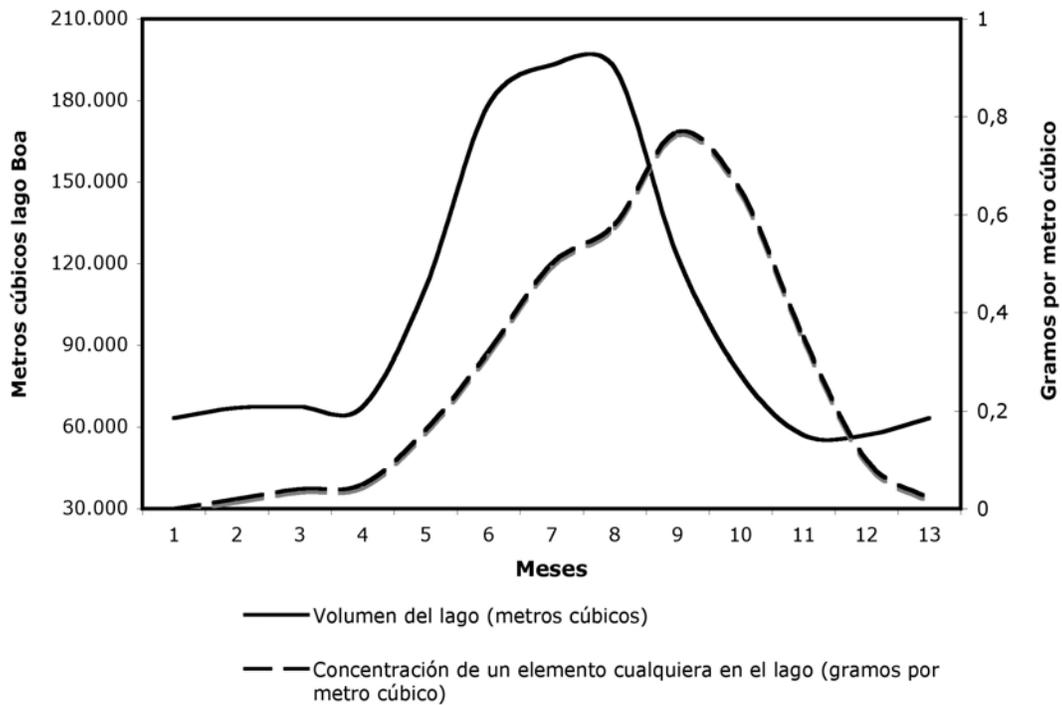


Figura 9. Resultado de la modelización del balance de masas en el lago Boa con el programa Stella. Se muestran el volumen de agua en el lago y la concentración de una sustancia cualquiera en el lago

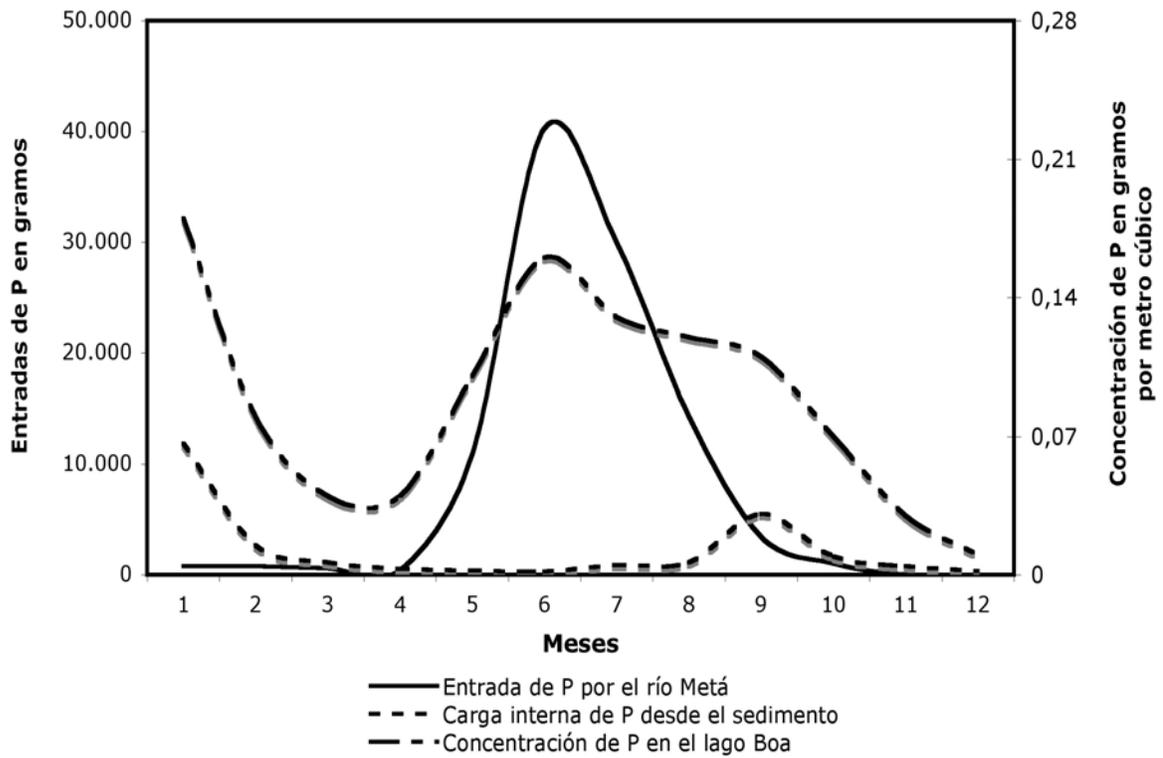


Figura 10. Resultado de la modelización del balance de masas del fósforo total en el lago Boa con el programa Stella. Se grafican la entrada de fósforo por el río Metá, la carga de fósforo proveniente del sedimento del lago y la concentración de este elemento en la columna de agua

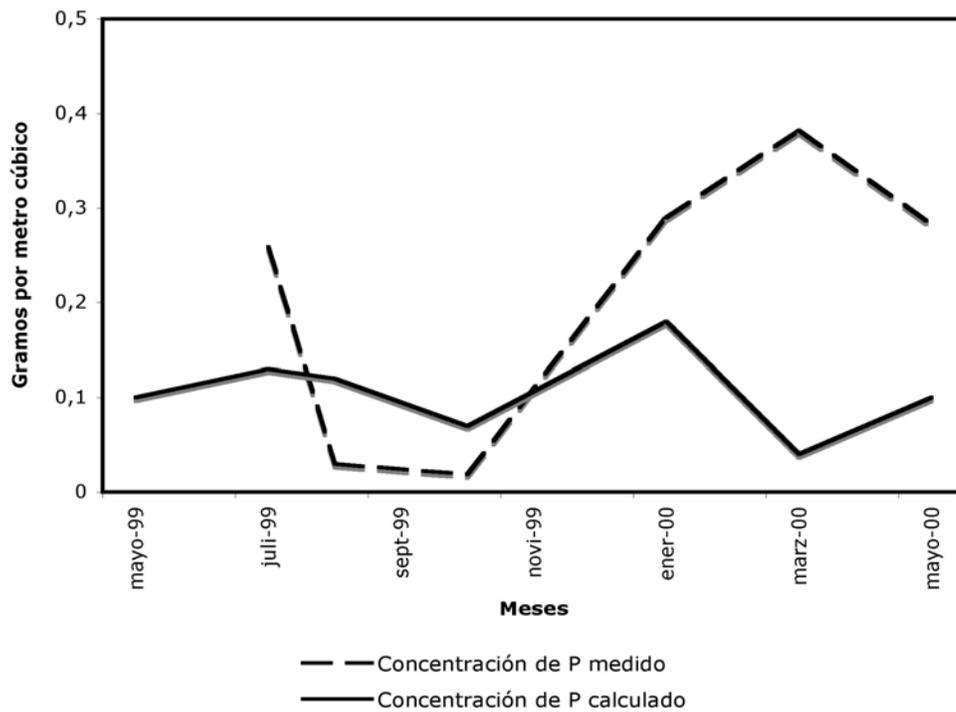


Figura 11. Comparación entre el fósforo total medido y el calculado en el lago Boa

notoria en los meses secos, cuando el lago es somero y caliente y los sedimentos están sometidos a mayor efecto de resuspensión. La concentración de fósforo en el agua del lago (Figura 10) ya no sigue un patrón claramente monomodal dependiente del pulso de inundación, sino que presenta una serie de ascensos y descensos, supeditados tanto a las descargas del tributario como a la carga interna de fósforo desde el sedimento. Carignan y Vaithyanathan (1999) indican que a menudo en los lagos de planicies inundables de la Amazonía y la Orinoquía el fósforo tiende a decaer en el periodo de aguas bajas. Este no parece ser el caso del lago Boa, en el cual los efectos de la resuspensión y otros fenómenos no considerados en el modelo (aportes de fósforo por los peces y el zooplancton) producen concentraciones altas de fósforo en los meses secos. El comportamiento del fósforo en el lago Boa se parece más al de los lagos de llanura inundable del río Paraná, que conservan altas concentraciones de este elemento aún en la fase de aguas bajas (Carignan y Vaithyanathan 1999).

Al comparar los valores de fósforo simulados con los observados en campo (Figura 11) se observa que a pesar de no existir relación estadística significativa entre unos y otros ($p > 0,05$), el comportamiento temporal tiende a ser el mismo: aumento durante el pulso de inundación (julio) por la mayor descarga del río Metá e incremento en el la época de aguas bajas (enero) debido a una resuspensión más intensa del sedimento. Como se mencionó, el modelo no considera otras fuentes de fósforo en el agua. Muy posiblemente la inclusión de las excreciones de los peces y de los organismos heterotróficos planctónicos (desde los protozoos hasta los microcrustáceos), permitira ajustar mejor los valores esperados de fósforo total.

La simulación aportada por el modelo de COD se muestra en la Figura 12. Claramente se observa un fuerte incremento en la concentración de carbono orgánico disuelto a partir de octubre, la cual permanece hasta febrero, es decir en la época de aguas bajas, cuando los aportes internos a partir de los exudados de las algas se hacen muy importantes. En el periodo de aguas en ascenso y altas el COD disminuye básicamente por dilución.

Los valores de COD calculados y los medidos en campo (Figura 13) no tuvieron una relación estadística significativa ($p > 0,05$) pero muestran un comportamiento muy similar, señal de que el aporte interno de materia orgánica a partir de la producción fitoplanctónica podría tener la

importancia que el modelo le asigna. Esta condición es contraria a las apreciaciones de Mayorga y Audefkampe (2001), quienes encontraron que en el río Amazonas (y en muchos otros ecosistemas) la materia orgánica disuelta proviene en mayor porcentaje de la degradación de hojas de árboles. Por supuesto, en los lagos la producción fitoplanctónica es mayor que en los sistemas lóticos, lo que explicaría que la fuente de COD fueran las algas y no la vegetación terrestre. Evidentemente, será necesario en el futuro optimizar el modelo con otras variables y factores que intervienen en la absorción, la coagulación y la disociación del COD, como son el tipo de suelo de la cuenca (arenoso o arcilloso), el pH y las proporciones entre iones polivalentes y monovalentes (p.e. $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$) (Mayorga y Audefkampe 2001).

DISCUSIÓN

Aún cuando los modelos desarrollados para el lago Boa son una primera aproximación en términos de su predictibilidad, las simulaciones hechas permiten acercarse al entendimiento de la dinámica del pulso de inundación en el lago y a sus efectos sobre la marcha química del sistema. De esta aproximación se deduce que a pesar de que el pulso hidrológico determina en buena medida el funcionamiento físico y químico del lago, éste presenta cierta autonomía en los meses en que se desconecta del tributario. En dicha época, las comunidades biológicas parecen ganar control sobre el metabolismo del ecosistema y manejar en parte las características químicas del agua, en especial la producción de carbono orgánico. Igualmente, en la temporada de aguas bajas el sedimento tiene mayor influencia en algunas variables químicas (iones, nutrientes) de la columna de agua, devolviendo por resuspensión parte de las sustancias almacenadas en la época de inundación. En este último caso es necesario evaluar e involucrar en los futuros modelos el efecto del viento sobre la resuspensión, puesto que el lago Boa es de muy escasa profundidad durante la época de aguas bajas, lo que haría que el sedimento fuera más susceptible a la mezcla y la turbulencia.

Por otra parte, las simulaciones realizadas muestran que en los procesos químicos de un lago de planicie de inundación como el considerado en este trabajo intervienen muchas variables (algunas funcionan a escalas espaciales y temporales amplias como el pulso de inundación y otras ocurren

MODELIZACIÓN DEL PULSO DE INUNDACIÓN EN UN LAGO AMAZÓNICO

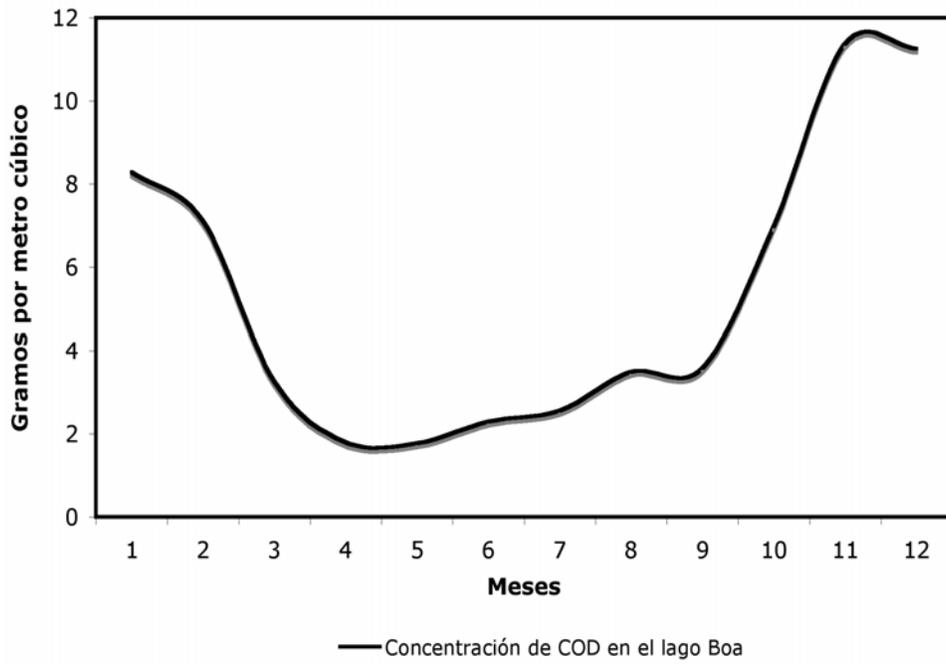


Figura 12. Resultado de la modelización de la concentración de COD en el lago Boa con el programa Stella

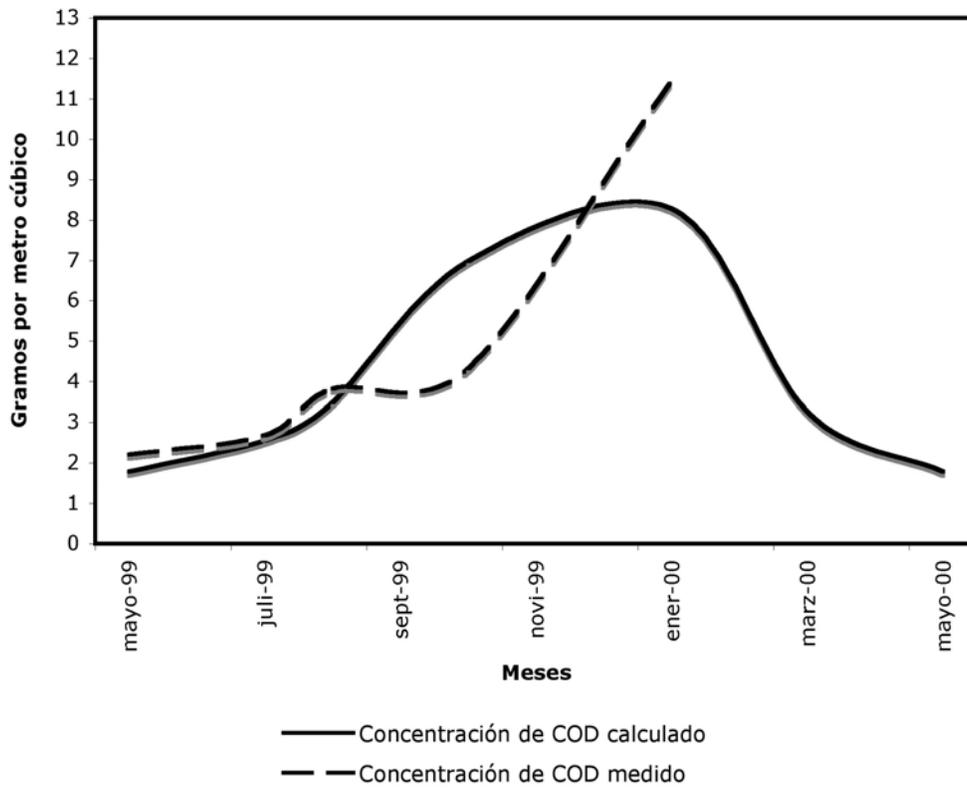


Figura 13. Comparación entre el COD medido y el calculado en el lago Boa

a niveles microscópicos como el consumo de nutrientes por el fitoplancton), de manera que es relativamente más compleja su modelización en comparación con lagos no sometidos al efecto de la inundación. Además, las aproximaciones logradas hasta el momento requerirán en el futuro un trabajo más intenso de calibración y validación con nuevos datos colectados en campo, así como un análisis de sensibilidad para establecer la robustez de las diferentes tasas, índices y constantes utilizadas en los modelos presentados.

No es posible determinar con los datos hasta ahora disponibles en qué medida los modelos elaborados son aplicables a lagos amazónicos de características similares, pero sí se puede anticipar que en principio las estructuras generales de los modelos diseñados no deben diferir mucho de lo que se podría esperar en el funcionamiento de lagos que se desconecten e inundan periódicamente. Sin embargo, parece necesario estudiar más los efectos de los parámetros morfométricos de la cubeta lacustre en los modelos, así como el fenómeno mismo del desborde de los lagos durante la inundación. Esto último implicaría considerar la expansión del área del lago hasta el límite de la planicie de inundación, con las consiguientes modificaciones en la morfometría (profundidad, pendiente, perímetro, desarrollo del litoral, desarrollo del volumen) y con la inclusión de los aportes de elementos liberados por el suelo inundado. En otras palabras, sería preciso modelar el lago como un sistema integrado o acoplado a los ecosistemas terrestres que se ubican en la planicie de inundación.

Los aspectos biológicos, como la producción primaria, la producción bacteriana y la producción íctica son temas más complejos que requerirían estudios a largo plazo. A pesar de esto, los modelos desarrollados en este trabajo indican que el lago prácticamente tiene las mismas características del tributario durante los meses de aguas altas y solo se comporta como un verdadero lago en el periodo seco, cuando se desconecta del sistema lótico. Es en esta fase cuando se esperaría la mayor producción primaria y por tanto la más alta cantidad de biomasa de peces. Un modelo de uso sostenible del lago Boa (y de otros lagos amazónicos similares) deberá considerar estos limitantes detectados por los modelos presentados en este documento.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó dentro de un proyecto financiado por el Fondo de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS y por la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Contrato No 1203-13-220-97).

LITERATURA CITADA

- BOZELLI, R.L. y A.V. GARRIDO. 2000. Gradient of inorganic turbidity and responses of planktonic communities in an Amazonian lake, Brazil. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27: 147-151.
- CARIGNAN, R. y P. VAITHIYANATHAN. 1999. Phosphorus availability in the Paraná floodplain lakes (Argentina): Influence of pH and phosphate buffering by fluvial sediments. *Limnology and Oceanography* 44(6): 1540-1548.
- FURCH, K. 2000. Evaluation of groundwater input as mayor source of solutes in an Amazonian floodplain lake during the low water period. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27: 412-415.
- HAKANSON, L. y R.H. PETERS. 1995. Predictive limnology. Methods for predictive modelling. SPB Academic Publishing, Amsterdam.
- HAMILLTON, S.K. y W.M. Jr. LEWIS. 1987. Causes of seasonality in the chemistry of a lake on the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Limnology and Oceanography* 32: 1277-1290.
- HECKMAN, Ch.W. 1998. Ecosystem dynamics in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 26: 1343-1347.
- JUNK, W. 1997. The Central Amazon Floodplain. Ecology of a pulsing system. Springer, Berlín.
- JUNK, W., P. BAYLEY y R. SPARKS. 1989. The flood pulse concept in river flood-plain systems. *Proceedings of International Large River Symposium. Canadian Special Publications in Fisheries Aquatic Science* 106: 110-127.
- KERN, J., A. DARWICH y K. FURCH. 1998. The contribution of gaseous nitrogen flux in the nitrogen budget on the Amazon floodplain at Lago Camaleao. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 26: 926-928.
- MARGALEF, R. 2002. Teoría de los sistemas ecológicos. Alfaomega, México.
- MAYORGA, E. y A. AUFDENKAMPE. 2001. Processing of bioactive elements in the Amazon River system. University of Washington, Seattle.
- OLIVEIRA, M.D. y D.F. CALHEIROS. 2000. Flood pulse influence on phytoplankton communities of the south

MODELIZACIÓN DEL PULSO DE INUNDACIÓN EN UN LAGO AMAZÓNICO

- Pantanal floodplain, Brazil. *Hydrobiologia* 427: 101-112.
- PINILLA, G.A. 2004. Ecología del fitoplancton en un lago amazónico de aguas claras (Lago Boa, Caquetá Medio). Tesis Doctorado, Universidad del Valle, Cali.
- PROGRAMA RADAGRAMETRICO DEL AMAZONAS (PRORADAM). 1979. La Amazonia colombiana y sus recursos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- SILVA, U.L. 1998. Análisa da produção pesqueira de um Lago de Várzea do Baixo Amazonas através de um modelo de blanço de massas. Tesis M.Sc. Instituto Nacional de pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade do Amazonas (UA).
- SIOLI, H. 1967. Studies in amazonian waters. Atas do Simposio sobre a biota amazonica, Brazil 3: 9-50.
- URREGO, L.E. 1996. Los bosques inundables del medio Caquetá (Amazonía colombiana). Fundación Tropenbos, Santafé de Bogotá.
- VAZZOLER, A.E., A.A. AGOSTINHO, y N.M. HAHN (Ed.). 1997. A planicie de inundação do alto rio Paraná. Aspectos físicos, biológicos y socioeconômicos. EDUEM, Nupelia, Brasil.
- WEBER, G.E. 1997. Causes of hydrochemical seasonality of major cations in lake Camaleao, a Central Amazonian floodplain lake. *Verhandlungen der internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 26: 408-411.
- WEN, Y.H. 1992. Contribution of bacterioplankton, phytoplankton, zooplankton and detritus to organic seston carbon load in a Changjiang floodplain lake (China). *Archives of Hydrobiologia* 126: 213-238.

Recibido 28 de Junio de 2005; revisado 16 de Febrero de 2006; aceptado 25 de Agosto de 2006.

ANEXO

Ecuaciones y datos de los modelos desarrollados para el lago Boa

Las formulaciones de los modelos desarrollados en el programa Stella® 7.0.2 se basan en ecuaciones de diferencia. A continuación se presentan dichas fórmulas, transformadas en un lenguaje no formal a fin de hacer comprensibles los modelos desarrollados. Se incluyen también los datos utilizados en su implementación.

Modelo del pulso de inundación

- Volumen del lago (en el tiempo $t+dt$) = (Volumen del lago en el tiempo t) + (Entrada – Salida) x dt
- Volumen del lago (inicial) = $63,23 \times 10^3 \text{ m}^3$
- Entrada = Descarga del tributario o caudal ($\text{m}^3 \text{ mes}^{-1}$)
- Salida = Volumen del lago – Volumen mínimo ($\text{m}^3 \text{ mes}^{-1}$)
- Volumen mínimo = $63,23 \times 10^3 \text{ m}^3$

Descarga del tributario (metros cúbicos):

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
3930	4090	4250	47680	115040	129940	128510	59090	15980	0.001	0.001	0.001

Modelo de balance de masas

- Cantidad del elemento en el lago (en el tiempo $t+dt$) = (Cantidad del elemento en el lago en el tiempo t) + (Entrada - Salida – Sedimentación) x dt
- Cantidad del elemento en el lago (inicial) = 0 g mes^{-1}
- Entrada = Descarga del tributario (miles de m^3/mes) x Concentración del elemento en el río (mg/l)
- Salida = Cantidad del elemento en el lago
- Sedimentación = Cantidad del elemento en el lago x Tasa de sedimentación
- Concentración del elemento en el lago (mg l^{-1}) = Cantidad del elemento en el lago (g)/Volumen del lago (m^3)
- Concentración en el río = 1 mg l^{-1}
- Tasa de sedimentación = 10% de la cantidad en el lago (g mes^{-1})
- Volumen de lago ($\text{m}^3 \text{ mes}^{-1}$) = Área del lago (m^2) x Profundidad del lago (m)
- Área del lago = 31700 m^2

Descarga del tributario (miles de metros cúbicos)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
3,93	4,09	4,25	47,7	115	130	129	59,1	16	0,0	0,0	0,0

Profundidad del lago (metros)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
2,12	2,13	2,13	3,5	5,63	6,09	6,05	3,86	2,5	1,8	1,8	2,0

MODELIZACIÓN DEL PULSO DE INUNDACIÓN EN UN LAGO AMAZÓNICO

Modelo de fósforo total

- Cantidad de P en el lago (en el tiempo t+dt) = (Cantidad de P en el lago en el tiempo t) + (Entrada de P por el río + Carga interna de P – Salida) x dt
- Cantidad de P en el lago (inicial) = 0,216 x (11x10⁴) g mes⁻¹
- Entrada de P por el río = Concentración en el río (mg/l) x Descarga del tributario (m³ mes⁻¹)
- Salida = Cantidad de P en el lago
- Cantidad de P en el sedimento (en el tiempo t+dt) = (Cantidad de P en el sedimento en el tiempo t) + (P en el sedimento - Flujo de P hacia el sedimento pasivo - Carga interna de P) x dt
- Cantidad de P en el sedimento (inicial) = 10⁴ g mes⁻¹
- P en el sedimento = Cantidad de P en el lago x Tasa de sedimentación
- Flujo de P hacia el sedimento pasivo = Cantidad de P en el sedimento
- Carga interna de P = Cantidad de P en el sedimento x 0.2 (Si Profundidad del lago > 4 m)
- Carga interna de P = Cantidad de P en el sedimento x (Tasa de resuspensión dada por la temperatura de fondo + Tasa de resuspensión dada por la relación entre la temperatura superficie y la de fondo) (Si Profundidad del lago < 4 m) g mes⁻¹
- Área del lago = 31700 m²
- Concentración en el lago = Cantidad de P en el lago (g)/Volumen del lago (m³)
- Tasa de sedimentación = 25% de la cantidad de P en el lago (g mes⁻¹)
- Volumen del lago (m³) = Área del lago (m²) x Profundidad del lago (m)

Concentración en el río (gramos por metro cúbico)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
0,192	0,148	0,105	0,227	0,35	0,23	0,111	0,058	0,063	0,068	0,13	0,16

Descarga del tributario (metros cúbicos)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
3930	4090	4250	47680	115040	129940	128510	59090	15980	0,001	0,001	0,001

Profundidad del lago (metros)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
2,12	2,13	2,13	3,5	5,63	6,09	6,05	3,86	2,5	1,8	1,8	2,0

Tasa de resuspensión dada por la temperatura de fondo (fracción del P en sedimento en g mes⁻¹)

T.Fondo	0	2,73	5,45	8,18	10,9	13,6	16,4	19,1	21,8	24,5	27,3	30,0
Tasa resusp	0,053	0,073	0,103	0,226	0,416	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43

PINILLA

Tasa de resuspensión dada por la relación entre la temperatura de superficie y la de fondo
(fracción del P en sedimento en g mes⁻¹)

T.Sup/T.Fondo	0	0,136	0,273	0,409	0,545	0,682	0,818	0,955	1,09	1,23	1,36	1,5
Tasa resuspensión	0,11	0,11	0,12	0,122	0,25	0,315	0,32	0,755	0,755	0,31	0,21	0,12

Temperatura de fondo del agua (grados centígrados)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
28,3	28,5	28,7	26,7	24,8	24,5	24,3	24,2	25,8	27,3	27,8	28,1

Temperatura superficial del agua (grados centígrados)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
28,6	29,0	29,4	27,1	25,2	24,9	24,6	25,2	26,7	28,2	28,4	28,5

Modelo de COD

- Cantidad de COD en el lago (en el tiempo t+dt) = (Cantidad de COD en el lago en el tiempo t) + (Entrada + Producción interna – Salida por el tributario – Pérdida interna de COD en el lago) x dt
- Cantidad de COD en el lago (inicial) = 4,9 x 10³ g mes⁻¹
- Entrada = Descarga del tributario (m³) x 10³ x Concentración en el río (g m³)
- Producción interna = (Producción fitoplanctónica x Área del lago) x Moderador estacional x 0,4
- Salida = Cantidad de COD en el lago
- Pérdida interna de COD en el lago = Cantidad de COD en el lago x Tasa de pérdida de COD
- Área del lago = 31700 m²
- Concentración de COD en el lago (mg l⁻¹) = Cantidad de COD en el lago (g)/Volumen del lago (m³)
- Concentración en el río = 3,47 g m³
- Producción fitoplanctónica = 66,75 g C m² mes⁻¹
- Tasa de salida de COD = 15% de la cantidad de COD en el lago en g mes⁻¹
- Volumen de lago (m³) = Área del lago (m²) x Profundidad del lago (m)

Descarga del tributario (metros cúbicos)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
3930	4090	4250	47680	115040	129940	128510	59090	15980	0,001	0,001	0,001

Moderador estacional (fracción de la producción fitoplanctónica que se convierte en COD)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
1	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	1	1	1

Profundidad del lago (metros)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
2,12	2,13	2,13	3,5	5,63	6,09	6,05	3,86	2,5	1,8	1,8	2,0