

APROXIMACIÓN A LA DINÁMICA DEL TRANSPORTE DEL NITRÓGENO Y DEL FÓSFORO EN LA CIÉNAGA DE AYAPEL

Carlos Alberto Restrepo C.¹, Mauricio Toro B.¹ & Néstor Jaime Aguirre R.²

1. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

2. Grupo GAIA, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín
carlosrestrepo@epm.net.co, fntoro@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 16 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 07 de Julio de 2006

RESUMEN

Este trabajo presenta la simulación del transporte del nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos y oxígeno disuelto en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia), basado en cuatro muestreos realizados entre septiembre de 2004 y marzo de 2005, tanto para condiciones de lluvias como de estiaje. La simulación se realizó mediante el uso de los modelos ELCOM y CAEDYM, el primero simula las condiciones hidrodinámicas del cuerpo de agua y el segundo toma la información obtenida del ELCOM para simular la cadena trófica de la ciénaga de Ayapel. La calibración de los parámetros biogeoquímicos comenzó con la determinación en campo de las especies más importantes fitoplanctónicas de la ciénaga de Ayapel, y de los parámetros biológicos involucrados en el desarrollo celular de estas especies. Luego se inició la calibración de los parámetros químicos que modelan el seguimiento de las variables de estado en el cuerpo de agua, a través de los diferentes procesos donde estos intervienen. Para la calibración se emplearon dos puntos de control con perfiles de concentración de los constituyentes en estudio. Para la validación se usaron otros dos puntos de control con información completa de las variables de estado. Los resultados obtenidos para ambos escenarios reflejan de manera coherente lo reportado en campo.

PALABRAS CLAVES: Modelación, Calidad del Agua, Nitrógeno, Fósforo, Oxígeno Disuelto, Estado Trófico, Ciénagas Tropicales.

ABSTRACT

This research reports the simulation of ammoniacal nitrogen, nitrate orthophosphates and dissolved oxygen transport in the Ayapel wetland (Cordoba, Colombia), based on four sampling periods carried out between September 2004 and March 2005, for both rainy and dry seasons. The simulation was performed using the ELCOM and CAEDYM models (CWR, 2004); the first one simulates hydrodynamic conditions and the second one takes the results gotten by the first model to simulate the trophic chain. The calibration of biochemical parameters began establishing the most important phytoplanktonic species and biological parameters involved in the vegetative development of this species. Then, calibration of the chemical parameters to model the tracking of state variables in the wetland was developed through the different processes in which they interact. Two control sites were used to calibrate the model with concentration profiles of the constituents under study. Other two sites which had complete information were used to validate the model. The results obtained for both scenarios showed coherently the field values. The obtained simulated results show good agreement with the field measurements.

KEY WORDS: Simulation, Water Quality, Nitrogen, Phosphorus, Dissolved Oxygen, Trophic State, Tropical Wetlands.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciénaga de Ayapel es un cuerpo de agua del cual dependen una gran cantidad de personas para su sustento, el cual se basa principalmente en actividades pesqueras. Desafortunadamente, este cuerpo de agua ha presentado en los últimos años un deterioro importante de sus condiciones naturales reflejadas en un decaimiento de tales actividades.

Con el propósito de evaluar las condiciones de productividad de la ciénaga en la actualidad, las Universidades de Antioquia y Nacional de Colombia desarrollaron conjuntamente el proyecto de investigación “Evaluación de la productividad en la Ciénaga de Ayapel y su relación con la comunicación con el río San Jorge”. Como parte de este proyecto, se planteó la tesis de maestría “Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y del fósforo en la Ciénaga de Ayapel, mediante el estudio de la dinámica del nitrógeno y del fósforo”, (Restrepo, 2005). El estudio desarrollado se basa en el modelamiento matemático de dichos nutrientes en la Ciénaga.

En el estudio se tienen en cuenta las mediciones de campo realizadas para la calibración, de manera inicial y preliminar, del modelo matemático CAEDYM. Este modelo de calidad de aguas utiliza la información hidrodinámica modelada con el modelo ELCOM y fue aplicado para condiciones de lluvias y estiaje, lo que permitió predecir el estado trófico de la ciénaga frente a estas condiciones hidrológicas. Asimismo, el modelo incluye las descargas más representativas de agua residual doméstica proveniente de las poblaciones circundantes a la ciénaga. La calibración realizada del modelo arrojó resultados consistentes con las mediciones, dejando para una segunda etapa la calibración detallada del modelo.

2. GENERALIDADES

La Ciénaga de Ayapel hace parte de un sistema hidrológico independiente que recoge las precipitaciones de las cuencas de las quebradas y de los caños que desembocan a ella por los costados Oriental y Sur. Este sistema entrega sus excedentes al río San Jorge por el caño Grande y mantiene la regulación de los niveles altos del mismo río a través de este caño. Los caños y quebradas, especialmente del costado Oriental y Suroriental, son de baja velocidad y permiten la conexión de sus aguas con la de otros caños y ciénagas menores en los periodos de alta precipitación. Por su ubicación

en la depresión Momposina, la elevación de estos caños es menor que la del río Cauca en el tramo comprendido entre Caucasia y San Jacinto (Ecoestudios, 1989).

2.1 Localización y descripción de la zona de estudio

La zona de estudio, la Ciénaga de Ayapel, está ubicada en el departamento de Córdoba. Está delimitada por el río San Jorge al Oeste; al Norte con el caño Grande, el cual es la conexión con el río San Jorge; al Este con el sistema de caños, Trejos, Barro, Muñoz, San Matías y con el río Cauca; al Sur limita con los caños: Quebradona y Escobilla, y también con el río Cauca. En sus orillas se encuentran la cabecera municipal de Ayapel al Suroeste y el corregimiento de El Cedro al Noreste y varios caseríos de pescadores.

La ciénaga de Ayapel es un importante cuerpo de agua de la región de la Mojana, y está comunicada por medio de una compleja red de canales con las ciénagas La Caimanera, Danta, Caño Fístula, Larga, Las Palomas, Los Bagres, Los Toros, Paticos y Playa Tendida. Recibe las aguas de las quebradas Las Quebras, Quebradona y Santana y los caños Trejos, San Matías, Escobilla, Barro, Pinto, Roblal y Muñoz. La Figura 1 muestra una localización general de la ciénaga y su posición con respecto a los ríos Cauca, Nechí y San Jorge.

3. LOS MODELOS ELCOM-CAEDYM

El modelo ELCOM -*Estuary and Lake Computer Model*- es una herramienta de modelamiento numérico tridimensional para lagos y embalses, desarrollada por el Centro de Investigación del agua -*Center for Water Research*, CWR- de la Universidad del Oeste de Australia.

Esta herramienta utiliza modelos hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua estratificados, incluyendo efectos del viento, de caudales afluentes y eferentes, entregando información sobre distribución de velocidades, de temperatura y de salinidad, sometidos a forzamientos o estímulos ambientales externos.

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo no permanente, viscoso e incompresible, usando la aproximación hidrostática para la presión (Di Toro, 1980). La solución numérica de las ecuaciones se basa en el método semi-implícito de diferencias finitas (Imberger, 1981).

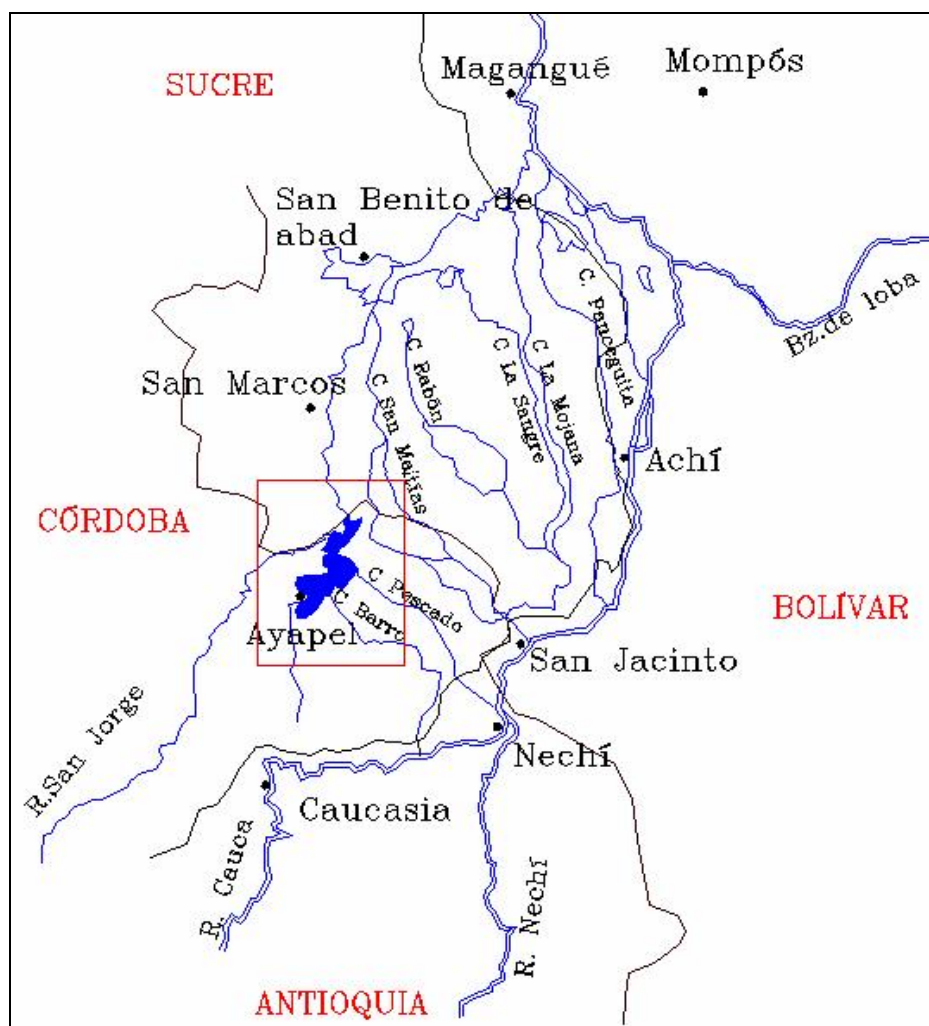


FIGURA 1. Ubicación general de la Ciénaga de Ayapel.

Este modelo se usa conjuntamente con un módulo de calidad de aguas, el modelo CAEDYM, para simular el transporte tridimensional de especies bioquímicas y su interacción física, química y biológica con el flujo. Específicamente, el modelo CAEDYM es un modelo ecológico acuático que fue diseñado para la simulación de lagos, ciénagas, humedales, ríos, estuarios y embalses. El modelo se basa en la relación funcional nutrientes-fitoplancton-zooplancton, permitiendo, además, la simulación de carbono, sílice, partículas inorgánicas y otras variables biológicas.

La configuración del CAEDYM es flexible por lo que el usuario puede concentrarse en los procesos de interés. Por ejemplo, el modelo puede ser configurado para un conjunto simple de nutrientes-fitoplancton-zooplancton. Sin embargo, en el estudio se deben incluir siempre las siguientes variables: oxígeno disuelto, coeficiente de

extinción de luz, radiación activa fotosintética, fósforo orgánico particulado, fósforo orgánico disuelto, fósforo reactivo filtrable, nitrógeno orgánico particulado, amonio, nitratos, carbono orgánico particulado y carbono orgánico disuelto.

La ecuación que gobierna cada una de las especies a modelar e implementadas en el modelo es de la forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S_k + S_E \quad (1)$$

Donde: C = concentración de la sustancia en estudio (mg/l); t = tiempo (s); u_x, u_y, u_z = velocidades longitudinal, lateral y vertical (m/s); E_x, E_y, E_z = Coeficientes de difusión longitudinal, lateral y vertical (m²/s); S_k = término que representa la fuente/sumidero (mg/l/s) e incluye las transformaciones controladas por la cinética de las reacciones químicas; y S_E = término de entradas/salidas de materia (mg/l/s) (Thomann, 1987).

Es importante resaltar que los dos primeros términos de la ecuación (1) son característicos del sistema natural que se vaya a estudiar, mientras que el tercero es particular de la sustancia que vaya a ser considerada, (Stefan, 1989). Independientemente de las dimensiones que representen al sistema natural, es necesario aportar al modelo de calidad de aguas el campo de velocidades y los coeficientes de difusión. El campo de velocidades puede ser definido previamente a partir de datos experimentales o calculado mediante un modelo hidrodinámico, el modelo ELCOM en nuestro caso. Detalles sobre los modelos ELCOM y CAEDYM se pueden encontrar en el manual científico y del usuario. (Romero y otros 2004).

4. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

El primer paso para la modelación de calidad de aguas consiste en definir unas condiciones hidrodinámicas

típicas de la zona de estudio. El parámetro que se empleó para calibrar el modelo ELCOM fue el coeficiente de extinción de luz, el cual se determinó con la profundidad de disco Secchi. Este coeficiente presentó un valor promedio entre 1.5 y 2 para la ciénaga de Ayapel durante el año 2005. Los perfiles de temperatura del agua simulados fueron contrastados con los reportados en campo. Además, se empleó la información climatológica suministrada gratuitamente por el IDEAM de las series de viento, temperatura ambiente, radiación solar y los caudales de los caños integrados al sistema cenagoso. En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan resultados obtenidos para la variable temperatura tanto en invierno como en estiaje. Se observa que la temperatura en el cuerpo principal puede alcanzar los 33°C en el periodo de invierno. En la Figura 2, se presenta el ciclo diario de temperatura y además se observa que los gradientes más importantes de temperatura toman lugar en la superficie, donde puede variar hasta 3°C, encontrándose las temperaturas mayores entre el medio día y las dos de la tarde. La zona fótica, es decir la zona que se encuentra a un metro de profundidad, no presenta tanta variación como la capa superficial, debido a que no se ve tan influenciada por el viento. La última capa, ubicada a 6 metros de profundidad, no refleja de manera significativa la influencia del viento, presentando una temperatura relativamente constante de 29°C. Un completo estudio de la dinámica de la ciénaga se puede consultar en Zapata, (2005).

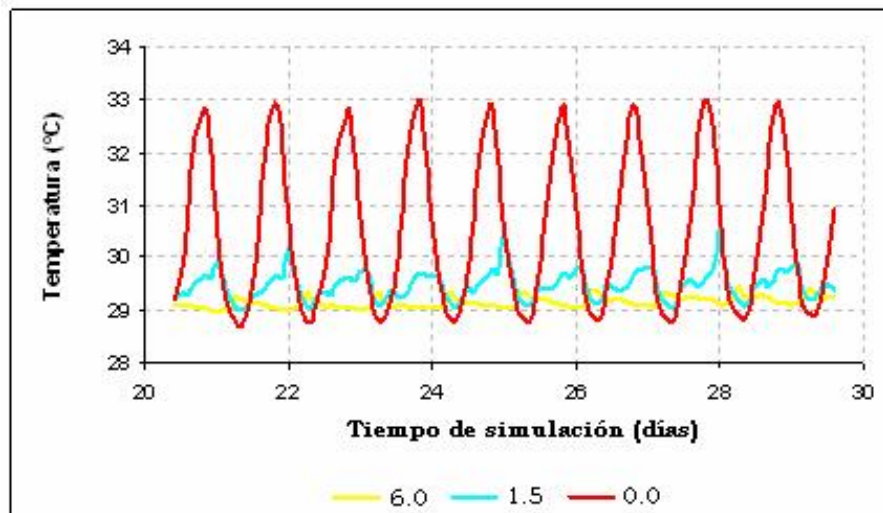


Figura 2. Serie simulada de temperatura para la estación 2 a tres profundidades, periodo de lluvias.

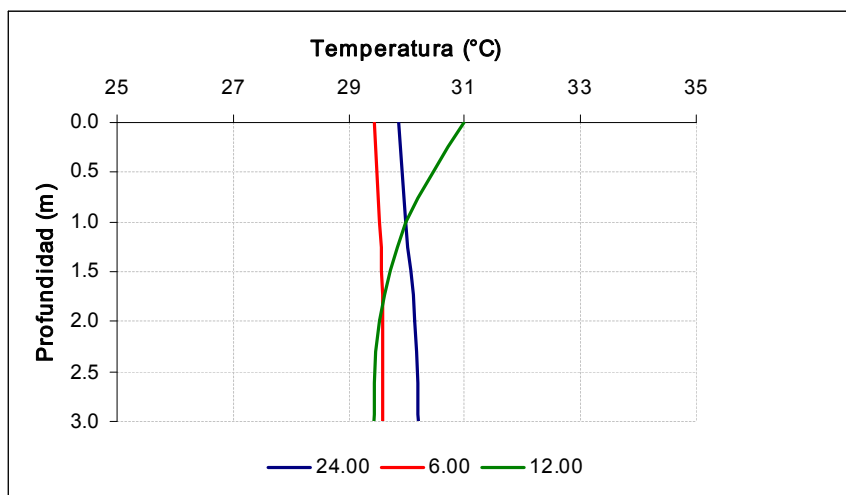


Figura 3. Perfiles de temperatura para la estación 8 en periodo de estiaje.

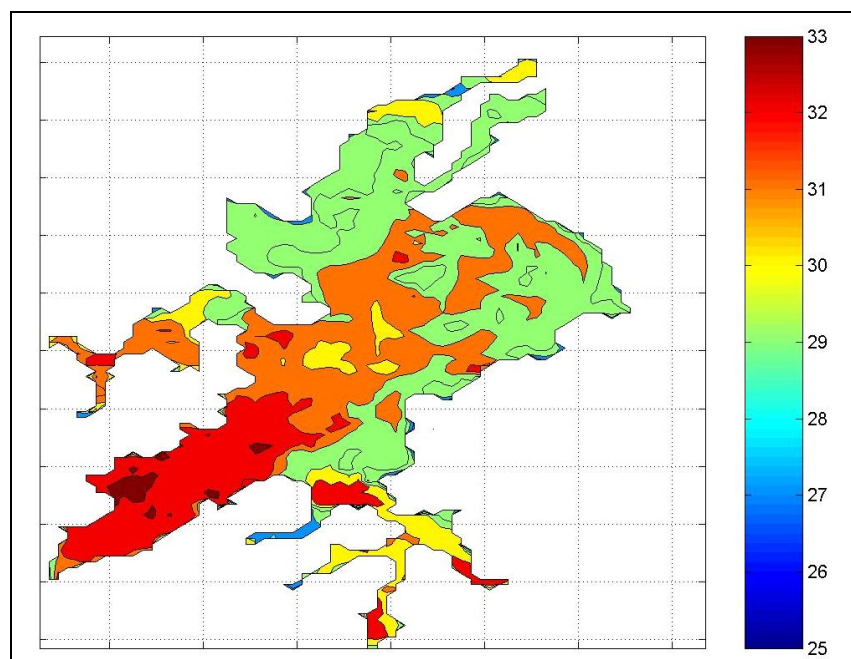


Figura 4. Temperatura superficial simulada en la Ciénaga de Ayapel, periodo de estiaje.

Una vez el modelo hidrodinámico se calibró, se realizaron simulaciones que proveen las condiciones hidrodinámicas de la ciénaga, y se procedió a la calibración del modelo CAEDYM. La calibración comenzó con la identificación de los grupos biológicos dominantes en la ciénaga (fitoplancton y zooplancton). Luego se procedió con el ajuste de los parámetros asociados a las variables de estado por simular: nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos y oxígeno disuelto.

El ajuste de los parámetros del fitoplancton comenzó identificando el grupo más importante en la ciénaga: la

especie *Chlorophyceae* o algas verdes, con sus tasas respectivas de crecimiento, razón clorofila-carbono, saturación de luz máxima para producción, etc. La producción del fitoplancton está limitada por la transparencia del agua y por el contenido de los nutrientes (Esteves, 1998).

La variación del contenido de fosfatos en la zona fótica se determina por la intensidad de su consumo por parte del fitoplancton en el proceso de fotosíntesis y por la regeneración durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica muerta por parte de las bacterias y por

excreción durante la respiración del fitoplancton y del zooplancton (Calero, 2003).

El nitrógeno amoniacal, consumido por el fitoplancton durante la producción primaria de la materia orgánica, se oxida en condiciones aeróbicas hasta nitritos (primera fase de nitrificación). El producto final de esta reacción son los nitratos. En un medio aerobio el contenido de nitratos se determina por la intensiva absorción del fitoplancton en el proceso de fotosíntesis y la acumulación por acción de la nitrificación (Chapra, 1997).

La dinámica del oxígeno disuelto en la ciénaga se determina por la intensidad con que ocurren los procesos

de la fotosíntesis, intercambio de oxígeno con la atmósfera, consumo de oxígeno por la respiración de zooplancton y fitoplancton y por la nitrificación (Ambrose, 1988).

Adicionalmente, se reemplazaron los parámetros como el contenido de carbono en las células del fitoplancton (disminución con el aumento del nivel de eutrofización) y la mortandad del zooplancton con el aumento de su biomasa en vista del empeoramiento de las condiciones de habitabilidad y concurrencia entre los diferentes tipos y los grupos tróficos. La Tabla 1, presenta los parámetros que se seleccionaron como definitivos del grupo de fitoplancton para la modelación en la ciénaga de Ayapel.

Tabla 1. Parámetros definitivos para el modelamiento del fitoplancton

Tasa de respiración	0.060 día ⁻¹
Tasa de crecimiento máxima potencial	0.8 día ⁻¹
Relación carbono-clorofila	40 mg C / mg Clorofila
Coeficiente de temperatura para respiración	1.080
Coeficiente de temperatura para crecimiento	1.060
Temperatura óptima	28 °C
Temperatura Máxima	32 °C
Limitación por foto inhibición	Ninguna
Parámetro de la curva de fotosíntesis-irradiación	180 uE/m ² /s
Constante media de saturación para el fósforo	0.006 mg P /L.
Constante media de saturación para el nitrógeno	0.025 mg N /L
Coeficiente de atenuación específico	0.01400 ug Chla/L/m
Velocidad de sedimentación	2.30 x10 ⁻⁰⁶ m/s
Constante de saturación media para resuspensión	0.010 mg/m ²

De los parámetros presentados en la Tabla 1, los de mayor peso en los resultados fueron: la dominancia de las algas verdes, las constantes medias de saturación y las tasas de respiración y crecimiento. Los valores de la constante media de saturación para el fósforo y el nitrógeno estuvieron en el intervalo de 0,001 a 0,01 y 0,01 a 0,05, respectivamente. En el caso de las tasas de respiración y crecimiento, éstas estuvieron entre 0,01 a 0,1 y 0.6 a 1,14, respectivamente.

El otro grupo biológico incluido en la modelación ecológica fue el zooplancton, siendo la especie de los

Copépodos la más abundante. La base alimenticia del zooplancton se compone de fitoplancton, de materia orgánica muerta y de bacterias (Guisende, 2002). Se toma en cuenta también la posibilidad de que el zooplancton manifieste canibalismo, y se consuma a sí mismo (Roldán, 1992). La disminución de la biomasa del zooplancton se determina por su respiración y mortandad natural. En la Tabla 2 se presentan los parámetros utilizados en la simulación de este grupo biológico.

Tabla 2. Parámetros definitivos para el modelamiento del zooplancton

Tasa de asimilación	0.2
Coeficiente de tasa de mortalidad	0.08
Limitación por oxígeno disuelto	1.00 ppm
Tasa de pastoreo	1.92 (g fitoplancton C/m ³) /
Preferencia de zooplancton por zooplancton	0.2
Constante de saturación media por pastoreo	0.132 g C /m ³
Fracción de excretas de pastoreo	0.08

Otro grupo importante de parámetros en el modelo CAEDYM son los relacionados con el oxígeno disuelto. Esta variable es importante debido a que permite que el usuario del modelo tenga un panorama general del estado ambiental de un cuerpo de agua (Barnwell, 1985).

Además, se puede relacionar con el proceso de nitrificación, ya que para la formación de nitratos es necesario que esté presente el oxígeno disuelto. La Tabla 3 muestra los parámetros definidos para la simulación de esta especie química.

Tabla 3. Parámetros definitivos para el modelamiento del oxígeno disuelto

Razón estequiométrica de carbono-oxígeno	2.667 mg C / mg OD
Tasa de intercambio desde el sedimento	0.200 g m ² / día
Pérdida de oxígeno por respiración fitoplanctónica	= 0.014
Constante de saturación media para el flujo de sedimentos	0.50 cm ² /día
Coeficiente de extinción de luz (profundidad media = 0.9 m)	1.8 m ⁻¹

Por último están los parámetros de limitación de nutrientes, los cuales establecen cual nutriente, entre el nitrógeno y el fósforo, es el limitante en la ciénaga de Ayapel. La constante de saturación para el fósforo se tomó como 0.01 mg/L, y la constante de saturación para el nitrógeno se tomó como 0.05 mg/L.

La determinación de los parámetros biogeoquímicos que describen el comportamiento del ciclo de los nutrientes con la asistencia de los datos reportados en campo de cada una de las variables de estado, se conoce como la etapa de calibración y validación (Stefan, 1989). Para la etapa de validación se emplearon los datos de las estaciones E2 y E3 (ver Figura 5), las cuales son las únicas estaciones que poseen muestreos nictérmicos. Sin embargo, se usó la información de las otras estaciones para verificar los resultados simulados. El período de muestreo estuvo comprendido entre septiembre de 2004 y Marzo de 2005, abarcando tanto condiciones de estiaje como de lluvias.

5. VALIDACIÓN

Para esta etapa ya se tenían todos los parámetros biogeoquímicos calibrados para todas las variables de estado. Lo que se presenta en este numeral son los resultados obtenidos de las simulaciones del estado trófico de la ciénaga de Ayapel.

Se realizaron mediciones de diversos parámetros ambientales que describen las condiciones del estado actual del sistema. Para ello, se hicieron determinaciones de nitrógeno en sus formas orgánicas e inorgánicas, ortofosfatos, y se realizaron pruebas biológicas como determinación de biomasa fitoplanctónica y zooplanctónica. Además, y de forma complementaria, se efectuaron lecturas *in situ* de parámetros fisicoquímicos tales como temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, profundidad y transparencia. La información fue recolectada en 11 estaciones limnológicas, en las cuales se realizaron

muestreos compuestos. En la Tabla 4 se presentan las características de las estaciones de medición utilizadas en la calibración de los modelos y en la Figura 5 se

presenta la ubicación de cada una de las estaciones de muestreo.

Tabla 4. Registros generales de las 11 estaciones de muestreo

Información General	Fecha	Estación	Zona	Profundidad Total (m)	Coordenada s N	Coordenada W
E1	19-09-04	Al frente del Cedro	Limnética	5,4	8°11'42,5"	75°08'12,3"
E2	16-09-04	Al frente del pueblo	Limnética	5,4	8°18'57,3"	75°07'34,5"
E3	18-09-04	Al frente de Caño Pinto	Limnética	3,2	8°19'21,9"	75°06'57,4"
E4	16-09-04	Sector La Miel	Limnética	5,3	8°20'4,0"	75°06'38,0"
E5	18-09-04	Frente a la Ciénaga Los Toros	Limnética	2,8	08°23'22,3"	75°04'56,1"
E6	19-09-04	Quebrada Quebradota	Caño	2,5	0,8°17'17,9"	75°09'27,8"
E7	18-09-04	Quebrada Piedras	Caño	4,0	8°17'49,8"	75°06'0,79"
E8	18-09-04	Caño Barro	Caño	5,7	8°18'34,5"	75°05'58,4"
E9	18-09-04	Caño Muñoz	Caño	2,2	8°21'11"	75°03'26,6"
E10	18-09-04	Caño la Miel, sitio las Parías	Caño	1,55	08°24'11,9"	75°04'0,67"
E11	18-09-04	Caño Grande	Caño	4,8	8°24'42,2"	75°04'35,2"

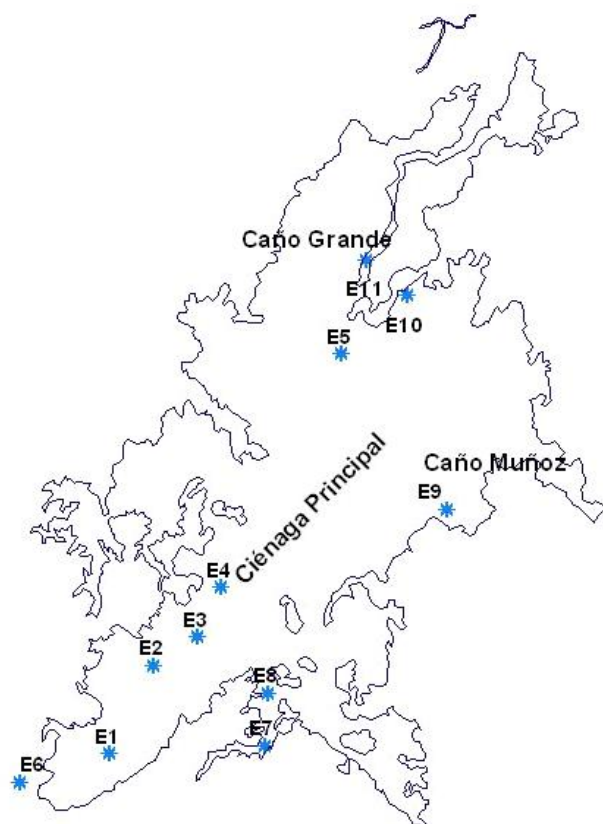


Figura 5. Estaciones de muestreo

Para la aplicación del modelo CAEDYM, se definió una malla de cálculo de 15 capas en la vertical (la malla horizontal coincide con la malla utilizada por el modelo hidrodinámico, el modelo ELCOM). Para asegurar la estabilidad numérica del modelo hidrodinámico se empleó como criterio el número de Courant, el cual siempre fue menor que 0.7. Las “corridas” del modelo se hicieron para un período de simulación de 30 días.

5.1. Resultados de las simulaciones del escenario de aguas altas (Período de lluvias)

A continuación se presentan los resultados simulados de las variables de estado, oxígeno disuelto y temperatura

para el periodo de aguas altas en la ciénaga de Ayapel, comprendido entre septiembre y diciembre de 2004 para los puntos de control 1 y 8 que corresponden a las estaciones E1 y E5, respectivamente (ver Figura 5), que corresponden a las estaciones limnológicas Cedros y Ciénaga Los Toros, respectivamente.

En las Tablas 5, 6 y 7 se presentan los valores correspondientes a dos muestreos (m1 y m2) para los perfiles día y noche de ortofosfatos, nitrógeno amoniacal y nitratos, respectivamente, para la estación E2, y durante el período de aguas altas.

Tabla 5. Perfiles de ortofosfatos medidos.

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1	Concentración (mg/l) E2-día_m2	Concentración (mg/l) E2-noche_m2
0.000	0.130	0.120	0.180	0.190
0.212	0.150	0.150	0.180	0.180
1.412	0.120	0.130	0.210	0.160
3.406	0.130	0.130	0.160	0.200
5.400	0.150	0.170	0.180	0.200

Tabla 6. Perfiles de nitrógeno amoniacal medidos.

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1	Concentración (mg/l) E2-día_m2	Concentración (mg/l) E2-noche_m2
0.00	0.07	0.06	0.02	0.02
0.35	0.10	0.06	0.00	0.03
2.,35	0.07	0.05	0.03	0.02
2.54	0.07	0.05	0.02	0.02
5.90	0.08	0.05	0.02	0.02

Tabla 7. Perfiles de nitratos medidos.

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1	Concentración (mg/l) E2-día_m2	Concentración (mg/l) E2-noche_m2
0.00	0.600	0.700	0.700	0.700
0.35	0.300	0.300	0.600	0.700
2.,35	0.500	0.600	0.600	0.700
2.54	0.900	0.500	0.800	0.800
5.90	0.600	0.500	1.000	0.900

En la Figura 6, se muestra la malla de cálculo, de 250 m x 250 m, para el escenario de invierno. Los cuadros rojos representan los puntos de control y los cuadros negros

simbolizan las descargas de agua residual desde el pueblo de Ayapel hacia la ciénaga.

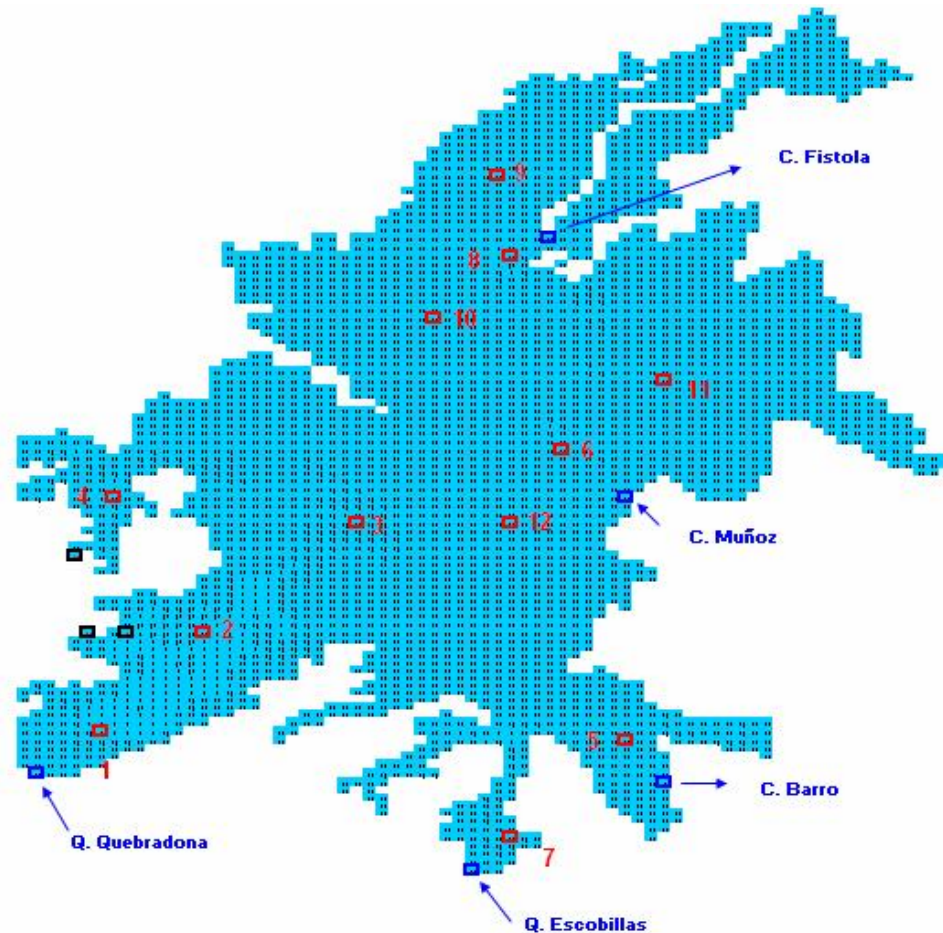


Figura 6. Puntos de control sobre la malla de cálculo para el escenario de lluvias.

En la Figura 7 se presentan los resultados de la simulación del nitrógeno amoniacal y nitrato para la estación 1 o punto de control 1 en la época de invierno. En la parte (a) se presenta el perfil del nitrógeno amoniacal; resultando una concentración media de 0.04 mg /l, mientras que los valores reportados en campo están alrededor de los 0.05 mg/l. En la parte (b) se presenta la serie de simulación para el nitrato, encontrándose una concentración media de 0.7 mg /l y el valor en campo es de 0.6 mg /l.

En la Figura 8 se presentan los valores obtenidos de la modelación de las variables de estado para el período de lluvias en la zona fótica, a un metro de la superficie. Los resultados de las variables de estado muestran que la zona que presenta concentraciones más altas de las variables de estado es la zona de la influencias de la Quebrada Escobillas y el Caño Barro en el caso del ortofosfato, nitrógeno amoniacal; para el caso del nitrato, en el norte se encuentran las concentraciones más altas, influenciados posiblemente por Caño Fístula, lo cual concuerda con los datos encontrados en campo.

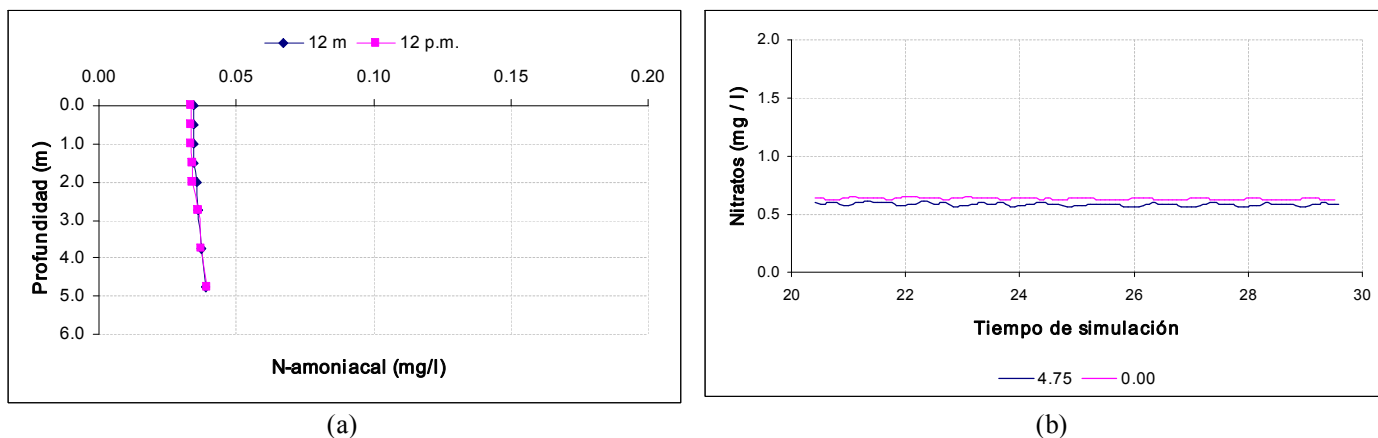


Figura 7. Resultados de simulación para el nitrógeno amoniacal y el nitrato en época de lluvias.

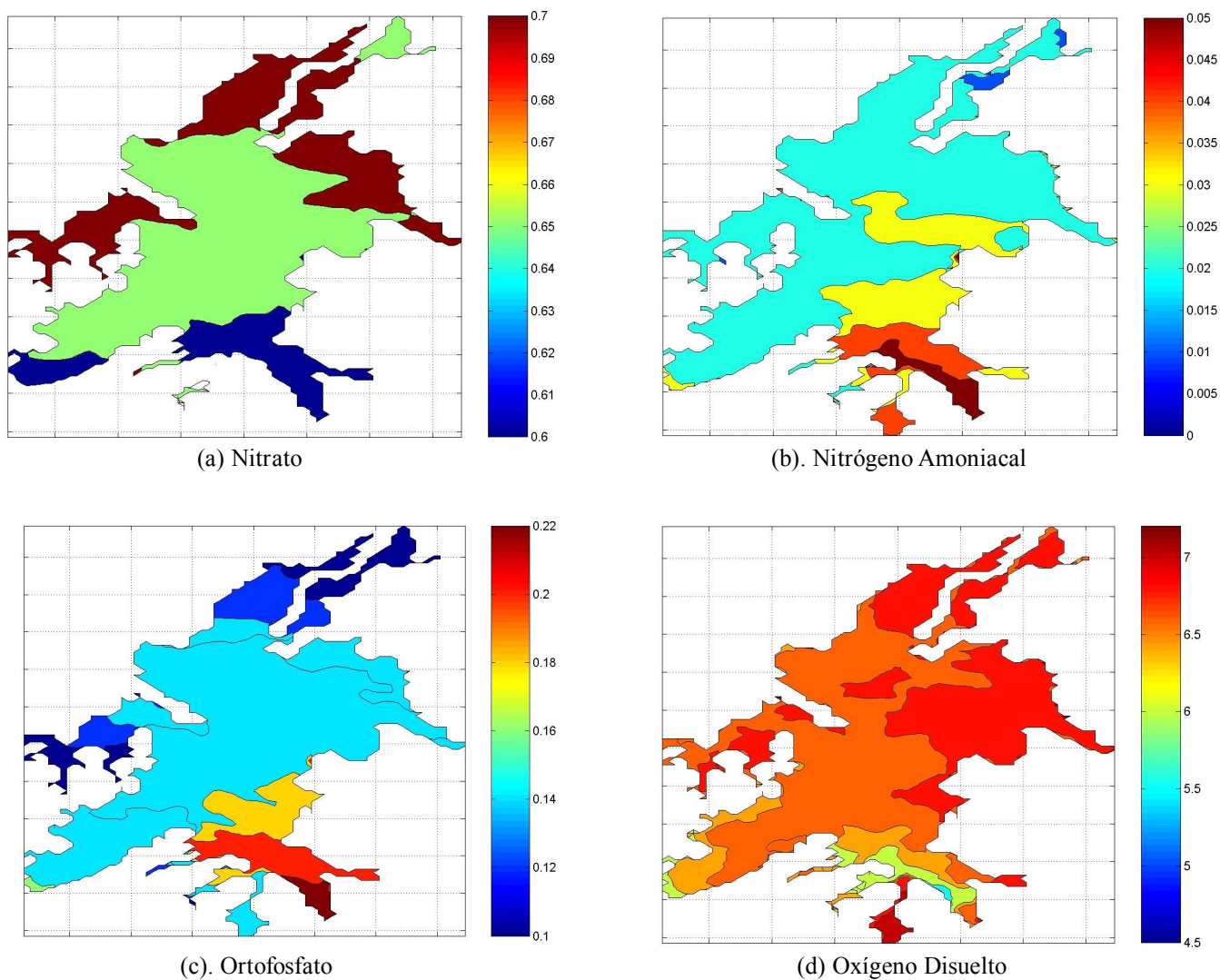


Figura 8. Valoressimulados de las variables de estado en la zona Fótica de la Ciénaga de Ayapel, para el período de lluvias.

5.1. Simulación escenario de aguas bajas (Período de estiaje)

Para el escenario de aguas bajas, las condiciones climáticas cambian dramáticamente, dándose una reducción del espejo de agua de 120 km² a 50 km².

En las Tablas 8, 9 y 10 se presentan las mediciones de campo de las variables de estado asociados al período de estiaje más crítico, el cual se encuentra entre los meses de febrero y marzo. Esta información se presenta como la variación diurna-nocturna de las variables de estado para la estación E2 para dos muestreos, la cual presenta condiciones muy semejantes a la estación E4, y fue la información de entrada del modelo CAEDYM-ELCOM.

Tabla 8. Mediciones de ortofosfatos para el escenario de estiaje

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1	Concentración (mg/l) E2-día_m2	Concentración (mg/l) E2-noche_m2
0.00	0.18	0.19	0.28	0.32
0.21	0.18	0.18	0.30	0.30
1.41	0.21	0.16	0.31	0.30
3.41	0.16	0.20	0.29	0.30
5.40	0.18	0.20	0.31	0.35

Tabla 9. Mediciones de nitrógeno amoniacal para el escenario de estiaje.

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1	Concentración (mg/l) E2-día_m2	Concentración (mg/l) E2-noche_m2
0.00	0.17	0.26	0.20	0.20
0.21	0.18	0.27	0.21	0.21
1.41	0.20	0.20	0.21	0.17
3.41	0.29	0.28	0.20	0.20
5.40	0.31	0.35	0.21	0.21

Tabla 10. Mediciones de nitratos para el escenario de estiaje.

Profundidad (m)	Concentración (mg/l) E2-día_m1	Concentración (mg/l) E2-noche_m1
0.00	0.7	0.7
0.35	0.6	0.7
2.35	0.6	0.7
2.54	0.8	0.8
5.90	1	0.9

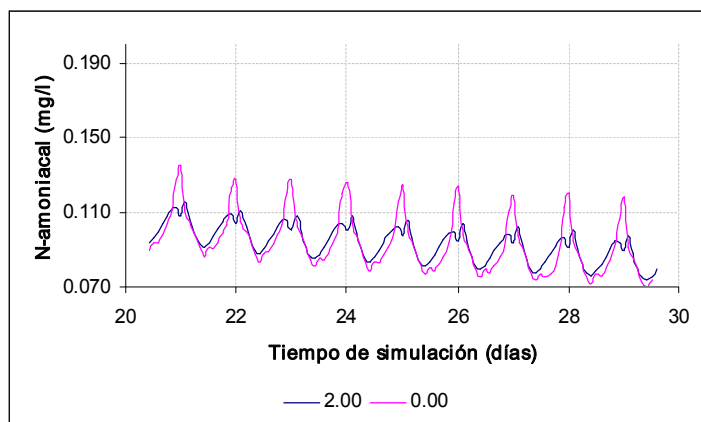
En las figuras siguientes se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación ELCOM-CAEDYM para el escenario de estiaje, considerado el más crítico en cuanto a calidad de aguas se refiere, debido a que en este período las concentraciones de las variables de estado aumentaron considerablemente, incluso alcanzando valores superiores al 400% comparadas con el escenario de lluvias. En este escenario las concentraciones de entrada al modelo pertenecen a la estación E2, y los resultados de la modelación fueron validados con los puntos de control 8 y 1, los cuales corresponden a las

estaciones limnológicas ciénaga Toros (E5) y Zona Cedros (E1), respectivamente.

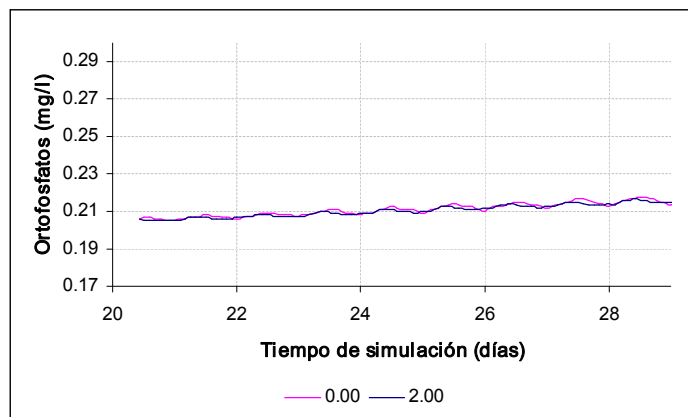
En la Figura 9 (a) se presenta la serie simulada de nitrógeno amoniacal para el punto de control 1 y se observa un ciclo diario bien definido de esta variable. La concentración media correspondiente es de 0.12 mg / l y el valor medio en campo de la estación Cedros fue de 0.20 mg / l. En la Figura 9 (b) se presenta la serie simulada del ortofosfato en el punto de control 1 cuya concentración media es de 0.20 mg / l, mientras que la concentración en

campo en la estación Cedros fue de 0.17 mg /l. Finalmente, en la Figura 9 (c) se presenta la serie simulada del oxígeno disuelto en el punto de control 8, cuyo valor

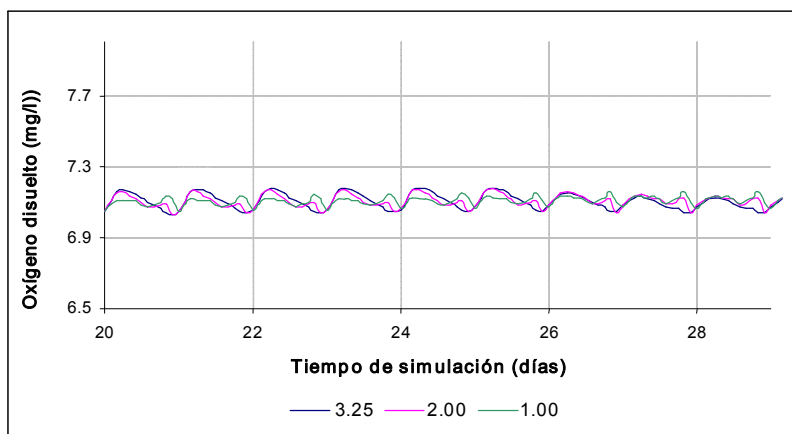
medio de 7 mg/l se compara bien con el valor medio en campo en la estación Toros, de 6,9 mg/l.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Resultados de la simulación del nitrógeno amoniacal, de los ortofosfatos y del oxígeno disuelto en la época de estiaje.

En la Figura 10 se presentan los resultados de la simulación de las variables de estado en toda la ciénaga de Ayapel para el periodo de estiaje a 1 m de profundidad. Estos resultados muestran que la zona que presenta concentraciones más altas de las variables de estado es la zona de la influencias de la Quebrada Escobillas y del Caño Barro, lo cual concuerda con los datos encontrados en campo.

En general, las concentraciones de las variables presentan condiciones muy uniformes en la columna de agua en las estaciones 1 y 5. Esto se debe a que en la época de estiaje la profundidad media de la ciénaga es de sólo 3 metros, aunque se pueden encontrar valores inferiores a 2 metros en el cuerpo principal, lo cual hace más fácil que el viento actue y mezcle los constituyentes en la columna de agua.

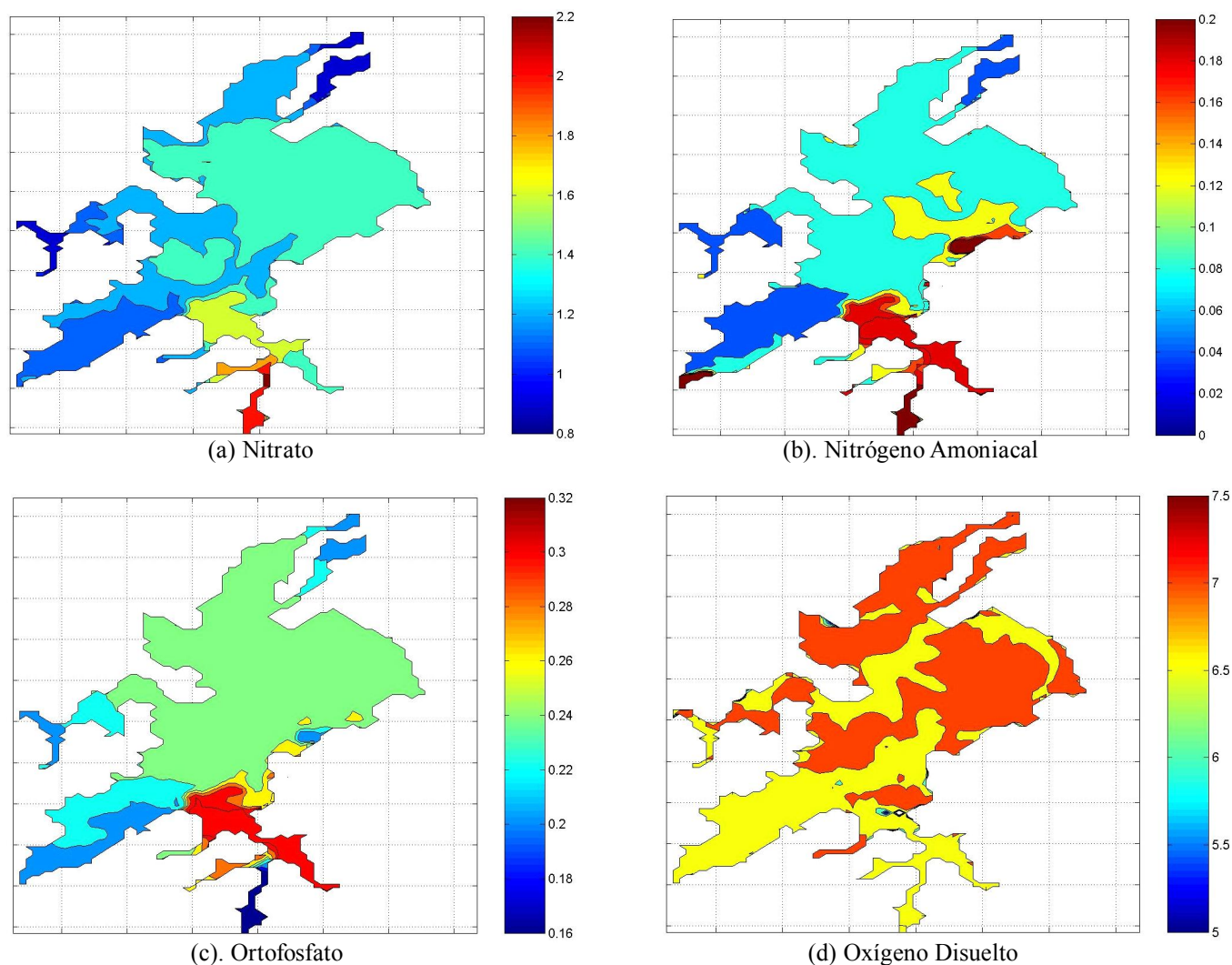


Figura 10. Resultados de la simulación de las variables de estado en la Ciénaga de Ayapel, a 1 m de profundidad, para el período de estiaje.

6. CONCLUSIONES

El modelo ELCOM-CAEDYM es un modelo robusto que permite simular escenarios con batimetrías complejas, permitiéndole al usuario la entrada de series de variables en todo el dominio, lo cual se hace importante cuando se desea hacer énfasis en una sola variable de estado, como es el caso del Fósforo para determinar el estado trófico de un cuerpo de agua.

En el periodo de lluvias la Ciénaga de Ayapel presentó un área del espejo de agua cercana a los 120 km² y un nivel medio de 5 m en el cuerpo principal. La temperatura media fue de 32.5°C en la superficie y en el fondo alrededor de los 27°C. Los caños se encontraron a banca

llena para el período de modelación comprendido entre septiembre y octubre de 2004 y la temperatura de éstos fue inferior a la del cuerpo principal en 3°C, aproximadamente.

Para el período de estiaje la ciénaga presentó un área del espejo de agua de 50 km² y un nivel medio de 3 m en el cuerpo principal. La temperatura se incrementó en aproximadamente 1.5°C, respecto al escenario de lluvias. Los caños se encontraron muy por debajo del nivel de banca llena y la temperatura de éstos osciló entre 25°C y 28°C. Los vientos para ambos escenarios provienen del suroeste a una velocidad media diaria de 2 m/s a 10 m de altura.

Las concentraciones iniciales de la ciénaga y las condiciones de frontera cambian de escenario a escenario. En el escenario de lluvias, las concentraciones de las especies simuladas son menores a las correspondientes en estiaje. Las concentraciones reportadas en campo para el periodo de estiaje pueden llegar a ser 500 % superiores a las del periodo de lluvias para el caso del nitrógeno amoniacal.

Las concentraciones medias encontradas en campo, en mg/l, para el nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos y oxígeno disuelto en la estación E2, en época de lluvias fueron: 0.05, 0.60, 0.11 y 7.60, respectivamente. Por otro lado, las variables nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos y oxígeno disuelto, expresadas en mg/l, para la estación E2 en época de estiaje, presentaron las siguientes concentraciones: 0.2, 0.60, 0.15 y 7.50, respectivamente.

La concentración media del NH_4^+ , NO_3^- y PO_4^{3-} en las aguas residuales que son vertidas en la ciénaga son: 1.50, 0.2 y 2.5 mg/l y la temperatura media del agua fue de 33°C. El caudal medio de las descargas fue de 0.50 l/s.

La modelación de la ciénaga mostró que las concentraciones de nutrientes más altas se encuentran asociadas a los caños Barro y Escobillas al Sur de la ciénaga para la época seca. Las concentraciones medias para el NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y oxígeno disuelto para el escenario de estiaje son: 0.2, 2.2, 0.3 y 6.4 mg/l. La temperatura media a 1m de la superficie era de 32°C.

Las concentraciones simuladas más bajas de ortofosfatos para el escenario de lluvias se hallaron en caño Barro y Escobilla con un valor de 0.6 mg/l. Mientras la concentración más alta se localizó en Caño Grande con una concentración media de 0.8 mg/l.

La modelación del nitrógeno amoniacal para el escenario de estiaje presentó una variación entre 0.02 y 0.2 mg/l. Los valores más altos se encontraron en el caño Barro y el caño Escobillas, mientras que los más bajos se localizaron en caño Grande y en la zona del punto de control 4. Por otro lado, el PO_4^{3-} simulado para el escenario de estiaje presentó una distribución espacial entre 0.16 y 0.32 mg/l. Las concentraciones más altas se asociaron a la zona de influencia del caño Escobillas y las más bajas se encontraron en las zonas de los puntos de control 2 y 4.

El oxígeno disuelto simulado para el escenario de estiaje, presentó una variación espacial entre 5.5 y 7.5 mg/l a 1 m de la superficie. Las concentraciones más altas se encontraron en la zona donde converge el año Grande y en sectores del cuerpo principal de la ciénaga, mientras las más bajas se localizaron en la zona ubicada al frente del pueblo de Ayapel, punto de control 2.

Los resultados de la modelación de la ciénaga para el escenario de lluvias muestran concentraciones de nutrientes muy bajas en todo el dominio. La distribución vertical de estos en la columna de agua no presenta variaciones importantes. La distribución horizontal presenta variaciones asociadas a las cargas de nutrientes presentes en los caños.

7. AGRADECIMIENTOS

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Grupo PRH, Universidad de Antioquia, Grupo GAIA, IDEAM por la información, a COLCIENCIAS por el patrocinio dado al proyecto “Análisis de la Relación Ciénaga – Río y su Efecto sobre la Productividad Pesquera en el Sistema Cenagoso de Ayapel, Colombia”.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ambrose, R.B., et al., 1988, WASP4, A hydrodynamic and water quality model theory, User's manual, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, EPA/600/3-87/039.
- Barnwell, T.O. y Col. Rates, 1985, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, EPA/600/3-85/040.
- Calero, L.A., Tuchkovenko y Lonin, S.A., 2003, Modelo numérico de calidad de aguas para la Ciénaga Grande de Santa Marta, Ingeniería del Agua Vol. 10, pp 479-492.
- Chapra, S.C., 1997, Surface water-quality modelling, University of Colorado at Boulder, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, New York, USA.
- Di Toro, D.M. y Matystik, W.F., 1980, Mathematical models of water quality in large lakes, Part 1 Lake Huron and Saginaw Bay, EPA-600/3-80-056.

- Ecoestudios Ltda., 1989, Estudio manejo integral de la Ciénaga de Ayapel, Montería.
- Esteves, F.S, 1988, Fundamentos de limnología, Editora Interciencia Ltda. 2 edición, Brasil.
- Gaudy, A.F. y Gaudy, E.T., 1980, Microbiology for environmental scientists and engineers, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Guisende, C., 2002, Diferenciación del nicho trófico en especies del zooplancton, En: Resúmenes Reunión de Limnología Neotropical – Neotropical, Leticia (Amazonas), Colombia.
- Hipsey, M.R., Romero, J.R., Antenucci, J.P. y Hamilton, D.P, 2004, Caedym user manual, Version 2.1.
- Imberger, J. y J.C. Patterson. 1981, A dynamic reservoir simulation model-DYRESM-5, En: Transport models for inland and coastal waters, H.B. Fischer, ed., Academic, New York.
- Margalef, R., 1983, Limnología, Editorial Omega Barcelona, 1010 P .
- Postel, S., y S.R. Carpenter, 1997, Freshwater ecosystem services. En: G. Daily (Editor). Nature's services. Island Press, Washington, D.C., USA. Postel y Carpenter, pp 195-214.
- Restrepo Carvajal C.A., Aproximación a la dinámica del fósforo y del nitrógeno en la ciénaga de Ayapel, Tesis de Maestría, Universidad Nacional. Medellín, 2005.
- Roldán, G. 1992, Fundamentos de limnología neotropical, Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Stefan, H.G, R.B. Ambrose, Jr. y M.S. Dortch, 1989, Formulation of water quality models for streams, lakes and reservoirs: Modeler's perspective, Miscellaneous paper E-89-1, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Thomann R.V. y Mueller J.A., 1987, Principles of surface water quality modelling and control, Manhattan College, Harper International Edition, New York, USA.
- Zapata, J.F., 2005, Dinámica hidrológica en la Ciénaga de Ayapel: Modelación del balance hídrico y simulación hidrodinámica, Tesis de Maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Wetzel, R. y Likens, G., 2000, Limnological Analyses, Second Edition. Springer Verlag, New York.