

UN MODELO DE EUTROFICACIÓN DE LA CIÉNAGA DE TESCA CON ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS

Yuriy S. Tuchkovenko y Serguei A. Lonin

**Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena de Indias, Colombia,
Tel.: 56+694465; FAX: 56+694297; email: slonin@sirius.enap.edu.co**

RESUMEN

Se presenta una breve descripción de un modelo de eutroficación de la Ciénaga de Tesca, los resultados de su verificación y el cálculo para el estado actual de eutroficación en las dos épocas del año y, también se presentan, dos escenarios pronosticados para el año 2025. Este modelo puede ser utilizado para el desarrollo de las alternativas técnicas sobre el mejoramiento de la calidad del agua para esta Ciénaga y otras similares, como la Ciénaga de Mallorquín y la Ciénaga Grande de Santa Marta.

ABSTRACT

A brief description of an eutrofication model of the Ciénaga de Tesca, the results of verification and the simulation of the actual state for the two seasons are presented. Two prognostic scenarios for 2025 also are presented. This model could be utilized for the development of technical alternatives about the improvement of the water quality for this Ciénaga and for the similar ones, as the Ciénaga de Mallorquín and the Ciénaga Grande de Santa Marta.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciénaga de Tesca (de la Virgen) se encuentra localizada al noroeste de Cartagena. Posee una forma triangular, estrecha en el norte y amplia en el sur, con una anchura máxima de 4.5 km, una longitud de 7 km aproximadamente y un espejo de agua de 22.5 km². La profundidad media de la cuenca es ≈ 0.85 m, la máxima llega a 1.6 m.

La Ciénaga se comunica con el mar en forma intermitente por la boca de La Boquilla. Esta boca se abre hacia los meses de agosto - septiembre, cuando empieza la época de lluvias, y se cierra hacia los meses de febrero - marzo, cuando ya se encuentra instalada la época seca.

La hidrología de la Ciénaga se caracteriza por este intercambio intermitente del agua con el mar a través de La Boquilla, por el aporte de agua dulce de los arroyos de la cuenca y por el balance precipitación - evaporación del clima en general.

Según los indicadores de la calidad del agua (contenido de DBO, PO₄), la Ciénaga de Tesca se puede calificar, en la actualidad, como una cuenca fuertemente contaminada (α -mesasaprobioⁱ), en la cual se encuentran todos los síntomas de eutrofificación, incluyendo hipoxiaⁱⁱ en las capas cercanas a la superficie y ausencia total de oxígeno en las capas cercanas al fondo, en las

profundidades mayores a 1 m. Las fuentes principales de contaminación provienen de las aguas negras de la ciudad de Cartagena, las cuales descargan sus fluentes por medio de canales abiertos y alcantarillas ubicados en la zona sur de la Ciénaga. En la actualidad, la Ciénaga recibe un 60 % de las aguas vertidas domésticas de la ciudad Cartagena sin ningún tipo de tratamiento.

El objetivo del presente trabajo lo representa la realización del modelo matemático, basado en la información conocida, con una adecuada descripción del régimen químico - biológico de la Ciénaga de Tesca; el modelo se puede utilizar para el desarrollo de obras técnicas, científicamente aprobadas y dirigidas al mejoramiento de la calidad de sus aguas.

En los siguientes capítulos se da una breve descripción de los bloques que conforman el modelo de eutrofificación, se muestran los resultados de su verificación y los de cálculo para el estado actual en las dos épocas del año y, también, dos escenarios de pronóstico para el año 2025.

2. MODELO HIDRODINÁMICO

Debido que la Ciénaga de Tesca es un cuerpo de aguas someras (la profundidad promedia es de un metro), es factible aplicar la respectiva teoría para su comportamiento hidrodinámico. Las ecuaciones básicas del modelo hidrodinámico son las siguientes:

$$(HU)_{,t} + (H\theta_{uu} UU)_{,x} + (H\theta_{uv} UV)_{,y} = -gHh_{,x} - \alpha_o HP_{a,x} + fHV + (2A_h HU)_{,x} + [A_h H(V_{,x} + U_{,y})]_{,y} + \tau_{sx} - \tau_{bx} \quad (1)$$

$$(HV)_{,t} + (H\theta_{uv} UV)_{,x} + (H\theta_{vv} VV)_{,y} = -gHh_{,y} - \alpha_o HP_{a,y} - fHU + (2A_h HV)_{,y} + [A_h H(V_{,x} + U_{,y})]_{,x} + \tau_{sy} - \tau_{by} \quad (2)$$

$$h_{,t} + (HU)_{,x} + (HV)_{,y} = I - E, \quad (3)$$

donde U y V son las componentes de corrientes, promediadas en la vertical (σ), para las direcciones x y y , respectivamente; H , profundidad total, es decir $H = d + h$; d , profundidad local; h , nivel de agua; t , tiempo; f , parámetro de Coriolis; P_a , presión atmosférica; g , gravedad; α_0 , volumen específico de agua; A_h , coeficiente de turbulencia horizontal; τ_{sx} y τ_{sy} son componentes de la tensión superficial de viento; τ_{bx} y τ_{by} son tensiones del fondo; I y E son, respectivamente, tasas de precipitación y evaporación. Los índices ' x ', ' y ' y ' t ' significan las respectivas derivadas.

Los términos: $\theta_{uu} = \int_{-1}^0 (uu / UU) d\sigma$,
 $\theta_{uv} = \int_{-1}^0 (uv / UV) d\sigma$, $\theta_{vv} = \int_{-1}^0 (vv / VV) d\sigma$

salen de la integración de las ecuaciones básicas tridimensionales para las velocidades u , v , w por la coordenada adimensional σ en la vertical. Si ellos no son iguales a uno, entonces sirven para parametrizar (analíticamente) la estructura vertical del flujo en el modelo de dos dimensiones.

La ecuación de transporte en 2D para una sustancia C es la siguiente:

$$(CH)_t + (HuC - HD_h C_x)_x + (HvC - HD_h C_y)_y = Q_o - Q_H + F \quad (4)$$

donde D_h es la difusión turbulenta en la horizontal; Q_o y Q_H son flujos de sustancia a través de la superficie y el fondo; F son fuentes internas de la sustancia C , relacionadas con las reacciones físico-químicas o biológicas en el sistema.

Las ecuaciones (1) a (4) se han promediado también por el ancho de flujo en caso de la presencia de canales angostos; es decir, cuando el dominio de cálculo es el de la escala de malla se utilizan directamente las ecuaciones (1) a (4) y, cuando el dominio es el de la subgrilla, se aplican las ecuaciones integradas por el ancho variable. Para la Ciénaga esta es una condición necesaria, debido a que en la parte norte los canales, ubicados entre las islas de manglar, están conectados con el mar en algunas épocas del año.

El sistema (1)-(4) requiere las condiciones de contorno dentro de las cuales mencionamos las siguientes. En las fronteras del mar abierto se definen los patrones de los campos oceanográficos si el flujo está entrando al dominio de cálculo y se utilizan las condiciones de cálculo en el caso inverso. Se ha pre establecido el comportamiento del nivel del mar, relacionándolo con el régimen de mareas y otras ondas largas, entrantes y salientes:

$$C = \begin{cases} C_*, \text{ cuando } \vec{v}\vec{n} \leq 0 \\ f(C), \text{ cuando } \vec{v}\vec{n} > 0 \end{cases}$$

$$h = h_o + \vec{v}\vec{n} \sqrt{\frac{H}{g}}, \quad (5)$$

donde C_* es el patrón oceánico de la sustancia C ; la función $f(C)$ es una función de interpolación numérica desde el dominio de cálculo hacia la frontera; \vec{n} es el vector unitario de la normal para la frontera con el vector \vec{v} de las corrientes calculadas en ella.

En la entrada de las fuentes de contaminación se dan los flujos Q_r de agua y las descargas Q_C de las sustancias estudiadas:

$$U = Q_r / (B_x \Delta L), \quad \delta \quad V = Q_r / (B_y \Delta L);$$

$$(Vn)C - D_h \partial C / \partial n = Q_C \quad (6)$$

Aquí, B_x y B_y son los anchos adimensionales de los canales con respecto al tamaño de celda ΔL de la malla de cálculo; $V = (U, V)$ es el vector de las corrientes; n – normal externa.

Las ecuaciones (1) a (4) con las condiciones (5) y (6) se resuelven por el método de las diferencias finitas. Las ecuaciones dinámicas se resuelven utilizando el esquema de Abbott (Sobey, 1970), y la ecuación de transporte, por el esquema FCT (Boris and Book, 1976). La descripción detallada de lo último está en Lonin (1997).

3. BASES TEÓRICAS DEL BLOQUE QUÍMICO – BIOLÓGICO DEL MODELO DE EUTROFICACIÓN

Debido a que en la Ciénaga de Tesca no se realizaron mediciones hidrobiológicas especializadas de los elementos bióticos, el modelo matemático presentado es el modelo de eutrofización del ecosistema, el cual tiene suficiente grado de descripción de la totalidad de los procesos de utilización de las formas minerales del nitrógeno y el fósforo en el fitoplancton durante la fotosíntesis y su regeneración, mediante la oxidación bioquímica de la materia orgánica por participación del bacteriplancton. Se supone que el ciclo del nitrógeno y el fósforo en el componente biótico del ecosistema se encierra sobre el nivel del fitoplancton, y los procesos de la regeneración de sus formas minerales se describen satisfactoriamente en las ecuaciones cinéticas de reacción de primer orden (la intensidad de estos procesos es directamente proporcional a la concentración del substrato y no depende de la biomasa de las bacterias). Esta hipótesis es correcta para ecosistemas marinos eutróficos e hipertróficos, donde el

bacteriplancton está adaptado a la alta concentración de substrato orgánico y la cadena trófica es lo suficientemente corta. La estructura del modelo propuesta corresponde en su totalidad a los datos de las mediciones.

El modelo contiene siete elementos principales del ecosistema, descritos en la utilización - regeneración de las sustancias biogénicas en el ecosistema y en el régimen de oxidación en la cuenca: fitoplancton - f ; la materia orgánica muerta e inestable - org ; fosfatos – PO_4 ; amonio – NH_4 ; nitritos – NO_2 ; nitratos – NO_3 ; oxígeno disuelto – O_2 .

Veamos las ecuaciones básicas del balance del bloque químico - biológico del modelo.

Fitoplancton, B_f [mgC/m³]:

$$\frac{dB_f}{dt} = (1 - \gamma_f) \sigma_f (I, C_{PO_4}, C_N) B_f - \mu_f B_f - \frac{w_{gf}}{H} B_f \quad (7)$$

Aquí, B_f - biomasa del fitoplancton; t - tiempo en horas; γ_f - parte de la productividad del fitoplancton dirigida al abastecimiento de su actividad vital (respiración); μ_f - velocidad específica de mortalidad del fitoplancton, [h⁻¹]; w_{gf} - velocidad gravitacional de deposición de las algas [m/h]; σ_f - velocidad específica de crecimiento del fitoplancton, [h⁻¹], determinada por las condiciones de luminosidad I y la presencia en el agua de los nutrientes - formas minerales del nitrógeno C_N y el fósforo C_{PO_4} . La magnitud σ_f se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_f = V_f^{\max} f_1(I) f_2(C_N, C_{PO_4}) \quad (8)$$

$$f_1(I) = \frac{1}{H} \int_0^H f_z(I_z) dz = \frac{2.718}{H\alpha} [\exp(-R_H) - \exp(-R_o)], \quad (8.a)$$

$$R_o = \frac{I_o}{I_{opt}}; \quad R_H = R_o \exp(-\alpha H),$$

$$f_z(I_z) = \frac{I_z}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right); \quad I_z = I_o \exp(-\alpha z), \quad (8.b)$$

$$f_2(C_N, C_{PO_4}) = \min \left\{ \frac{C_N}{Ck_N + C_N}, \frac{C_{PO_4}}{Ck_{PO_4} + C_{PO_4}} \right\} \quad (8.c)$$

$$C_N = C_{NH_4} + C_{NO_3}$$

Aquí, V_f^{\max} - velocidad máxima específica del crecimiento del fitoplancton, [h⁻¹]; C_{PO_4} , C_{NH_4} , C_{NO_3} - contenido en el agua de fosfatos, formas nitrogenadas del amonio y nitratos, respectivamente [mg/l]; I_o - flujo fotosintético de la radiación solar activa que pasa a través de la superficie del agua [W/m²]; I_{opt} - luminosidad óptima para la fotosíntesis, [W/m²]; I_z - luminosidad en la profundidad z, [W/m²]; α - coeficiente de debilitamiento de la luminosidad con la profundidad, [m⁻¹]; Ck_N, Ck_{PO_4} - constante de semisaturación (Mijael - Menten) de la intensidad del proceso de utilización del fitoplancton de las formas minerales del nitrógeno y el fósforo [mg/l].

Materia orgánica muerta B_{org} [mgO₂/l]. Se considera en el modelo como el equivalente oxigenado del contenido total de los compuestos orgánicos en el agua (detritos + materia orgánica disuelta), obedece a la oxidación bioquímica. Con el fin a distinguir la materia autóctona B_{org}^{av} y antropogénica B_{org}^{ant} en el compuesto total, estos componentes se están considerado aparte en el modelo.

$$\frac{dB_{org}^{av}}{dt} = [Y_f \sigma_f (I, C_{PO_4}, C_M) + \eta \mu_f] * B_{org}^{av} \quad (9.a)$$

$$* B_f \beta_{O_2/C} \beta_{m^3/L} - K_{DBO} \epsilon_{ing} B_{org}^{av}$$

$$\frac{dB_{org}^{ant}}{dt} = -K_{DBO} \epsilon_{ing} B_{org}^{ant} + Q_{org}^{ant}, \quad (9.b)$$

donde K_{DBO} - velocidad específica de la oxidación bioquímica de la materia orgánica, [h⁻¹]; η - parte inestable en la materia orgánica muerta; $\beta_{O_2/C}$ - coeficiente de traspaso de mgC a mgO₂, [mgO₂/mgC]; Q_{org}^{ant} - ingreso de la materia orgánica alloctona por las fuentes antropogénicas, [mgO₂ l⁻¹ h⁻¹]; ϵ_{ing} - parámetro de inhibición de los procesos de la oxidación bioquímica de la materia orgánica muerta y la nitrificación por déficit del contenido de oxígeno en el agua ($0 < \epsilon_{ing} < 1$); se calcula por

$$\epsilon_{ing} = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2} + Ck_{O_2}}, \quad \text{donde}$$

Ck_{O_2} - constante de semisaturación del proceso [mg/l], se toma igual al 15% de la concentración de saturación del oxígeno.

Fósforo de los fosfatos, C_{PO_4} [mg/l]. Se consume en la producción primaria de materia orgánica por el fitoplancton y se regenera en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica por participación de las bacterias. En condiciones aeróbicas los fosfatos pueden formar compuestos insolubles, por ejemplo con el Fe, y se depone en los sedimentos del fondo. En condiciones anaerobias el proceso cambia su dirección y ocurre el desligamiento de los fosfatos del sedimento del fondo al agua.

$$\frac{dC_{PO_4}}{dt} = -\sigma_f (I, C_{PO_4}, C_N) B_f \beta_{P/C} \beta_{m3/L} + \\ + K_{DBO} \epsilon_{ing} (B_{org} \beta_{P/O_2} + B_{org}^{\text{ant}} \beta_{P/O_2}^{\text{ant}}) + \\ + Q_{PO_4}^{\text{ant}} \pm Q_{PO_4}^{\text{sed}} \quad (10)$$

Aquí, $\beta_{P/C}$ - coeficiente estequiométrico del paso de mgC a mgP para la materia orgánica autóctona, [mgP/mgC]; β_{P/O_2} , $\beta_{P/O_2}^{\text{ant}}$ - coeficientes de recálculo de mgO₂ de la materia orgánica autóctona, B_{org}^{av} y de la antropogénica, B_{org}^{ant} en mgP, [mgO₂/mgP]; $Q_{PO_4}^{\text{ant}}$ - ingreso de los fosfatos de las fuentes antropogénicas, [mgPm⁻³h⁻¹]; $Q_{PO_4}^{\text{sed}}$ - velocidad de variación de la concentración de los fosfatos por acción del intercambio con el fondo, [mgPm⁻³h⁻¹].

Nitrógeno amoniacal, C_{NH_4} [mg/l]. En el consumo del fitoplancton esta forma es preferible dentro de las formas minerales del nitrógeno. Aparte de esto, la disminución del amonio en el agua se realiza por acción del proceso de nitrificación. El contenido de amonio en el agua se completa por acción de

los procesos de amonificación de la materia orgánica muerta en el paso a su oxidación bioquímica e intercambio con los sedimentos del fondo. A diferencia de los fosfatos, el ingreso del amonio de los sedimentos del fondo tiene lugar tanto en las condiciones aeróbicas, como en las anaerobias.

$$\frac{dC_{NH_4}}{dt} = -\chi \sigma_f (I, C_{PO_4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} + \\ + K_{DBO} \epsilon_{ing} (\beta_{N/O_2} B_{org} + \beta_{N/O_2}^{\text{ant}} B_{org}^{\text{ant}}) - \\ - v_{N_1} C_{NH_4} \epsilon_{ing} + Q_{NH_4}^{\text{ant}} + Q_{NH_4}^{\text{sed}} \quad (11)$$

donde v_{N_1} - velocidad específica de la primera estadía de nitrificación, [h⁻¹]; $\beta_{N/C}$ - coeficiente estequiométrico del paso de mgC a mgN para la materia orgánica autóctona, [mgN/mgC]; β_{N/O_2} , $\beta_{N/O_2}^{\text{ant}}$ - coeficientes de recálculo de mgO₂ y coeficientes de recálculo de mgO₂ de la materia orgánica autóctona, B_{org}^{av} y antropogénica, B_{org}^{ant} , respectivamente, a mgN, [mgN/mgO₂]; $Q_{NH_4}^{\text{ant}}$ - ingreso de amonio de las fuentes antropogénicas, [mgP I⁻¹h⁻¹]; $Q_{NH_4}^{\text{sed}}$ - velocidad de variación de la concentración de amonio por acción del intercambio con el fondo, [mgN I⁻¹h⁻¹]; χ - parte del nitrógeno mineral consumido por el fitoplancton en forma de amonio

$$\chi = \frac{C_{NH_4} \phi}{\phi C_{NH_4} + (1 - \phi) C_{NH_4}}$$

ϕ - coeficiente de preferencia de asimilación del amonio por el fitoplancton en relación con los nitratos.

Nitrógeno de los nitritos, C_{NO_2} [mg/l]. Es la forma intermedia del nitrógeno mineral en el proceso de nitrificación. Se supone, que la variabilidad del contenido de nitritos en el agua totalmente se determina por la correlación de las velocidades de la primera y la segunda estadía de nitrificación.

$$\frac{dC_{NO_2}}{dt} = \epsilon_{ing} (v_{N_1} C_{NH_4} - v_{N_2} C_{NO_2}), \quad (12)$$

v_{N_1} y v_{N_2} - velocidades específicas de la primera y segunda estadías de nitrificación, [h^{-1}], respectivamente.

Nitrógeno de los nitratos, C_{NO_3} [mg/l].

Producto final del proceso de nitrificación del nitrógeno mineral y la más estable de su forma. En un medio marino aerobio el contenido de nitratos se determina por su intensiva absorción del fitoplancton en el proceso de fotosíntesis y la acumulación por acción de la nitrificación. En condiciones marinas anaerobios los nitratos se reducen hasta el nitrógeno molecular como el paso al proceso de desnitrificación.

$$\frac{dC_{NO_3}}{dt} = v_{N_2} \epsilon_{ing} C_{NO_3} - v_{DN} C_{NO_3} - (1 - \chi) \sigma_f (I, C_{PO_4}, C_N) B_f \beta_{N/C} \beta_{m3/L} \quad (13)$$

Aquí v_{DN} - velocidad de disminución de los nitratos [h^{-1}] por acción de la desnitrificación en las capas cercanas al fondo, donde el contenido de oxígeno constantemente es menor de 0.5 ml/l.

Oxígeno disuelto, C_{O_2} [mg/l]. La dinámica del oxígeno disuelto en el medio marino se determina por la intensidad con que ocurren los procesos de la fotosíntesis, intercambio de oxígeno con la atmósfera, consumo de oxígeno por la oxidación bioquímica de la

materia orgánica muerta inestable y la nitrificación en el agua y los sedimentos:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{O_2}}{dt} = & \beta_{O_2/C} \sigma_f (I, C_{PO_4}, C_N) B_f \beta_{m3/L} - \\ & - \epsilon_{org} (\kappa_{DBO} B_{org} + \beta_{O_2/N1} v_{N1} C_{NH_4}) \\ & - \epsilon_{org} (\beta_{O_2/N2} v_{N2} C_{NO_2}) - \\ & - Q_{O_2}^{ant} - (Q_{O_2}^{bot} \pm Q_{O_2}^{atm}) / H \end{aligned} \quad (14)$$

donde $\beta_{O_2/C}$ - coeficiente de recuento de la producción primaria en unidades de oxígeno, [mlO₂/mgC]; $\beta_{O_2/N1}$, $\beta_{O_2/N2}$ - equivalentes oxigenados de la primera y segunda estadías de nitrificación, [mlO₂/mgN]; $Q_{O_2}^{bot}$ - absorción del oxígeno en sedimentos del fondo de una unidad de volumen de agua como resultado de los procesos de oxidación bioquímica y nitrificación, [mgO₂·dm⁻²·h⁻¹]; $Q_{O_2}^{ant}$ - velocidad de disminución del contenido de oxígeno en el volumen unitario de agua por acción de la mezcla con aguas contaminadas que no contienen oxígeno (mlO₂·l⁻¹·h⁻¹); $Q_{O_2}^{atm}$ - flujo de oxígeno por el intercambio de gases con la atmósfera (mgO₂·dm⁻²·h⁻¹).

Como una primera aproximación, la absorción del oxígeno en los sedimentos puede ser estimada con ayuda de las expresiones empíricas, mostradas en (Parsons, Takahashi, 1984), sobre la base del conocimiento del contenido de oxígeno en el agua C_{O_2} :

$$Q_{O_2}^{bot} = a (C_{O_2})^b \quad (15)$$

donde $[Q_{O_2}^{bot}] = \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $[C_{O_2}] = \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, $a = \text{const}$ y $b = 0.66$ - coeficientes empíricos.

El intercambio del oxígeno con la atmósfera se calcula con base en la función del tipo (Lyakhin, 1980):

$$Q_{O_2}^{atm} = \gamma_{e,i} n_v n_t (C_{O_2}^S - C_{O_2}) \quad (16)$$

donde $Q_{O_2}^{atm}$ - ingreso (invasión) o reducción (evasión) del oxígeno ($mg \cdot m^{-2} h^{-1}$); $\gamma_{e,i}$ - coeficiente de invasión (evasión); n_t - coeficiente de temperatura (con $T = 30^{\circ}C$, $S = 30-35 \%$, $n_t = 1.1$), n_v - coeficiente integral de viento:

$$n_v = \begin{cases} 1.0 + 0.27w^2, & \text{para } w \leq 8 \\ -7.4 + 0.4w^2, & \text{para } w > 8 \end{cases} \quad (17)$$

w- velocidad de viento, (m/s); $C_{O_2}^S$ - saturación (con T° y S dadas) de la concentración del oxígeno (mg/l).

4. CALIBRACIÓN DEL BLOQUE QUÍMICO - BIOLÓGICO

En las latitudes trópicas, el ciclo anual de la variabilidad de los parámetros hidrometeorológicos, la cual irrita el ecosistema, se manifiesta muy débilmente y se disimula su variabilidad de corto periodo. Por eso, con suficiente grado de veracidad, se puede concluir que con promedios de los parámetros del ecosistema tropical, medidos en diferentes lapsos de tiempo, se obtienen las características de su formación estacional. Basado en esto, la calibración del modelo matemático en las regiones tropicales se puede realizar con los promedios de los datos de las mediciones realizadas en las diferentes épocas del año, procurando el balance de los procesos de producción - destrucción en lapsos de tiempo diarios.

Para la calibración del modelo, en cuanto a calidad, se utilizaron las mediciones de la variabilidad de los parámetros del ecosistema de la Ciénaga de la Virgen, realizados por:

- 1) CHS - JHRP. Mediciones de la variabilidad diaria del contenido de oxígeno en los diferentes puntos de la cuenca, en el año 1983 (marzo a junio).
- 2) INDERENA. Campos de mediciones en ocho estaciones realizadas una vez al mes durante cinco meses en el año 1984. (febrero - junio) y cuatro meses en 1994 (de abril a octubre).
- 3) HASKONING-CARINSA. Un campo de mediciones en ocho estaciones en octubre de 1995.
- 4) CIOH. Seis campos de mediciones en siete estaciones, en diferentes periodos del año (abril - 1996 a octubre - 1997).

Con base en estos datos se obtuvieron los valores característicos de los componentes del ecosistema de la Ciénaga de Tesca y la parte adyacente del mar, mostrados en la Tabla 1, que corresponden a su estado de equilibrio (balance en los procesos de producción - destrucción).

Los datos sobre las fuentes principales de ingreso de sustancias biogénicas en el agua de la Ciénaga, volúmenes de desagüe de las aguas contaminantes y el contenido en ellas de las sustancias biogénicas se obtuvieron de la base de datos de ACUACAR (Aguas de Cartagena, 1997). Conforme con esto, las fuentes de mayor desagüe de aguas contaminantes en la Ciénaga conforman $69866 \text{ m}^3/\text{dia}$ con un contenido medio en ellas de $DBO_{tot} \approx 440 \text{ mgO/l}$ ($DBO_5 = 300 \text{ mgO/l}$), $NH_4 \approx 10 \text{ mgN/l}$, $PO_4 \approx 9 \text{ mgP/l}$, $NO_3 \approx 12.3 \text{ mgN/l}$.

La estimación preliminar de los parámetros del bloque químico - biológico del modelo se realizó en la versión cero - dimensional (en el sentido de espacio) del modelo con base en las fuentes de datos bibliográficos sobre los valores característicos de los parámetros del modelo en condiciones cercanas a las medidas en la Ciénaga de Tesca (Tuchkovenko, 1999).

TABLA 1. Valores característicos de los parámetros hidrológicos y componentes químico - biológicos del ecosistema de la Ciénaga de Tesca y del mar.

COMPONENTE	CONC. EN LA CIÉNAGA	CONC. EN EL MAR (BORDE)
Temperatura, °C	30.00	29.00
Salinidad, S ⁰ /oo	30.00	35.00
Transparencia, m	0.30	0.80
Biomasa, mg-ClA/m ³	50.00	2.00
Fosfatos (PO ₄), mg/l	0.30	0.02
Amonio (NH ₄), mg/l	0.30	0.20
Nitritos (NO ₂), mg/l	0.005	0.007
Nitratos (NO ₃), mg/l	0.01	0.050
Oxígeno (O ₂), ml/l	4.50	3.50
Materia orgánica muerta, mg/l	25.00	1.50

El objetivo principal de la calibración del modelo fue el establecimiento del paso diario de los parámetros químico-biológicos respecto a los valores característicos de sus magnitudes conocidas a partir de las mediciones (ver la Tabla 1), y también la conservación del balance diario de los procesos de producción - destrucción en el ecosistema con condiciones medias de luminosidad en el transcurso de un año. Para tener en cuenta la contribución de las fuentes antropogénicas en la formación del régimen hidroquímico de los depósitos de agua investigados, se utilizó la dependencia del tipo:

$$\frac{dC}{dt} = Q^{\text{ant}} = \sum_i \frac{q_i}{W_{\text{TOT}}} (C - C_i^{\text{ant}})$$

donde q_i - caudal de la fuente de contaminación antropogénica i (m^3/s); C_i^{ant} , C - concentraciones de la sustancia contaminante en las aguas de desagüe de la fuente i y en las aguas de la cuenca, respectivamente; W_{TOT} - volumen total del agua de la Ciénaga.

El resultado de la calibración del modelo en el transcurso diario del contenido de oxígeno disuelto, sobre la amplitud de la variabilidad diaria del contenido de oxígeno en el agua de mar, con base en los datos del año 1983,

se muestra en la Figura 1. Los valores de las constantes del modelo, como resultado de la calibración, se observan en la Tabla 2.

Para comprobar la aceptabilidad de la calibración del modelo por el paso diario, con el objetivo de la descripción en otras escalas de variabilidad, se realizó el cálculo independiente de la variabilidad de los elementos del ecosistema en el transcurso de dos años (1996-1997), con valores variables de luminosidad calculados con base en las mediciones diarias de humedad del aire y nubosidad, realizadas por el CIOH. El resultado de los cálculos se muestra en la Figura 2.

Los valores modelados de los elementos químicos del ecosistema en los momentos correspondientes se compararon con los valores medios en la cuenca, obtenidos a partir de las mediciones en diferentes épocas, realizadas por el CIOH en 1996-1997. Como se observó en las figuras, el grado de coincidencia del modelo y las magnitudes medidas es suficientemente alto, especialmente si se tiene en cuenta que en este cálculo no se prestó atención al intercambio de agua de la Ciénaga de Tesca con el mar y la variabilidad, por épocas, de los componentes de balance acuático del depósito de agua.

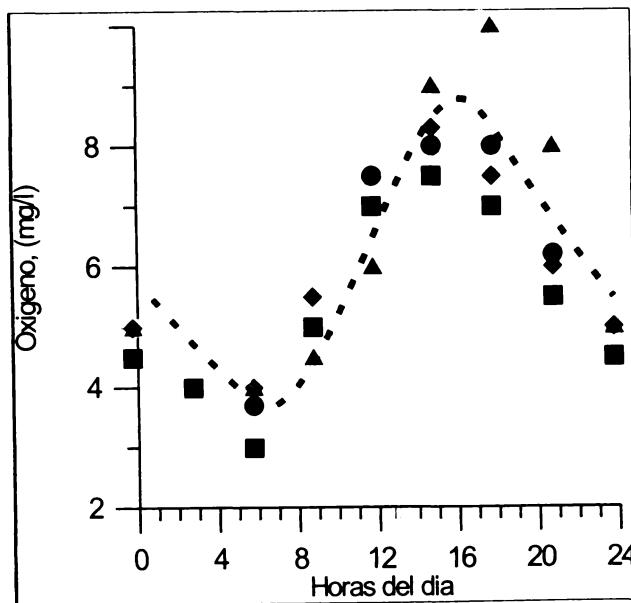


FIGURA 1. Comportamiento diario del contenido de oxígeno en las aguas de la Ciénaga de la Virgen, obtenido a partir de los datos de las mediciones (CHS – JHRP, 1983) en diferentes puntos de la cuenca y el calculado por el modelo (curva).

TABLA 2. Valores de las constantes del modelo de eutrofización de la Ciénaga de Tesca, obtenidos como resultado de su calibración con datos de fuentes bibliográficas y de las mediciones.

SÍMBOLO	VALOR	UNID. DE MEDICIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNID. DE MEDICIÓN
V_f^{\max}	4	dia ⁻¹	Ck_{PO_4}	0.009	mgP·l ⁻¹
Ck_N	0.075	mgN·l ⁻¹	Ck_{O_2}	0.7	ml/l
$\beta_{P/O_2}^{\text{ant}}$	0.0229	MgP· mlO ₂ ⁻¹	$\beta_{N/O_2}^{\text{ant}}$	0.4	MgN· mlO ₂ ⁻¹
β_{P/O_2}	0.01	MgP· mlO ₂ ⁻¹	β_{N/O_2}	0.1	MgN· mlO ₂ ⁻¹
β_{O_2/N_1}	4.57	mlO ₂ ·mgN ⁻¹	β_{O_2/N_2}	1.14	MgO ₂ ·mgN ⁻¹
$\beta_{O_2/C}$	2.6	mlO ₂ ·mgC ⁻¹	$\beta_{P/C}$	0.022	MgP·mgC ⁻¹
$\beta_{N/C}$	0.205	MgN·mgC ⁻¹	β_{C/Cl^*A^*}	50	mgC ·mg-clA ⁻¹
κ_{DBO}	0.36	dia ⁻¹	v_{DN}	1.0	dia ⁻¹
v_{N_1}	0.12	dia ⁻¹	v_{N_2}	8.0	dia ⁻¹
ϕ	0.6	Adim	η	0.9	Adim
I_{opt}	120	W·m ⁻²	w_{gf}	0.8	m·dia ⁻¹
μ_f	0.4	dia ⁻¹	γ_f	0.15	dia ⁻¹
γ_e	22.0	l·m ⁻² h ⁻¹	γ_i	11.5	l·m ⁻² h ⁻¹
$Q_{NH_4}^{\text{sed}}$	0.0	MgN·m ⁻³ ·h ⁻¹	$Q_{PO_4}^{\text{sed}}$	0.0	MgP·m ⁻³ ·h ⁻¹
a	38.0	mlO ₂ ·m ⁻² h ⁻¹	b	0.66	Adim

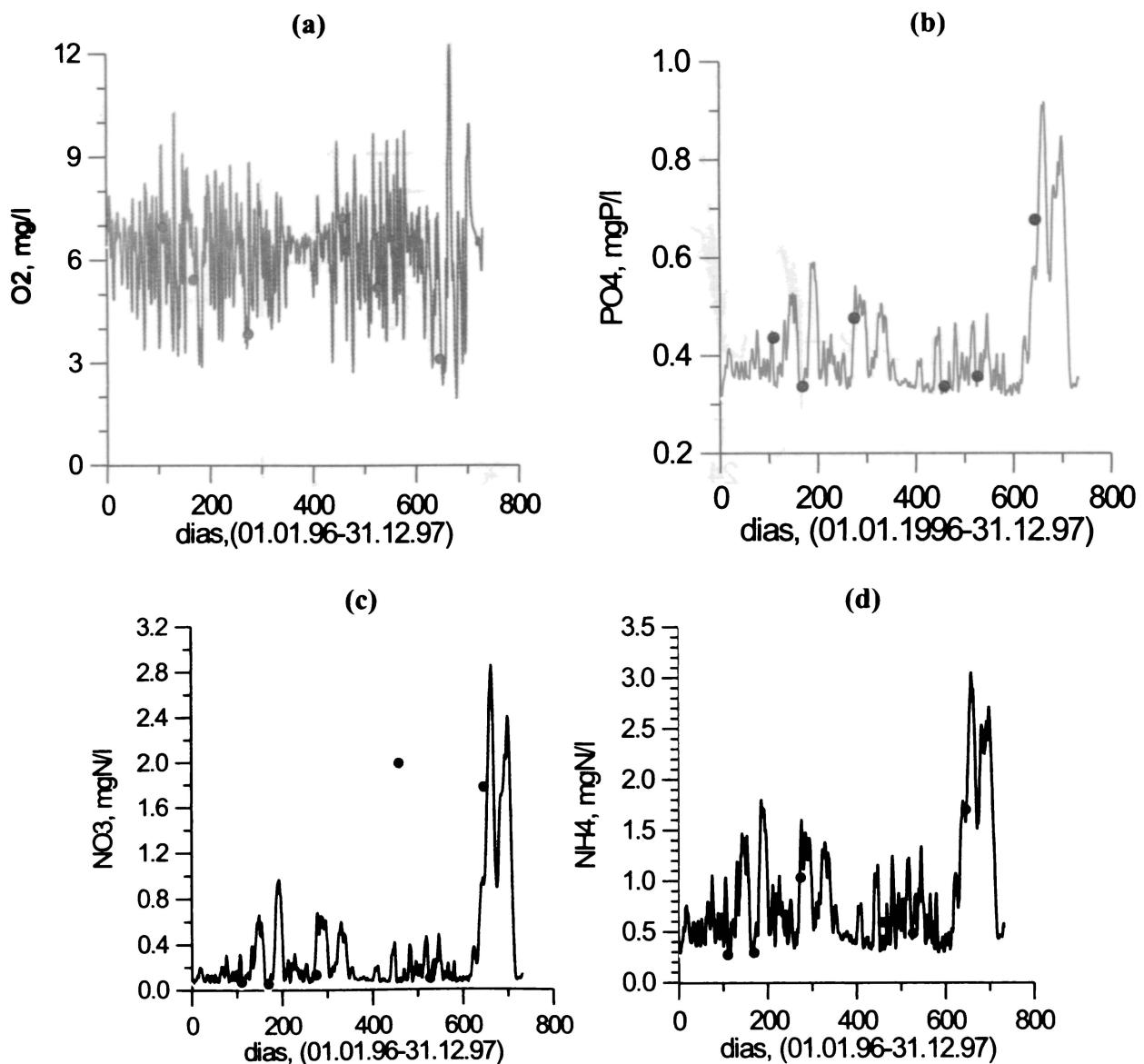


FIGURA 2. Variabilidad del contenido de (a) oxígeno, (b) fosfatos, (c) nitrógeno amoniacial y (d) nitrógeno de los nitratos en la Ciénaga de la Virgen, en el transcurso de dos años, calculada por un modelo puntual a las 12 horas de la mañana de cada día (curva), y por el promedio espacial en los datos de mediciones.

5. RESULTADOS DE CÁLCULO

Se ha aceptado la malla de cálculo de 49 por 111 nodos en el espacio, con un paso de 100 m. El paso temporal para el modelo fue de 10 s. La ubicación de las principales fuentes de contaminación y las características de sus descargas se establecieron según la información de ACUACAR (1997).

Los cálculos numéricos se realizaron tanto para la época seca como para la época humeda del año. Durante el periodo seco (enero-abril) se elimina el intercambio del agua de la cuenca con el mar abierto; por eso, la fuerza de los vientos alisios que provienen del noreste, que son hasta de 8 m/s en esta época, domina la circulación del agua de la Ciénaga de la Virgen (Figura 3).

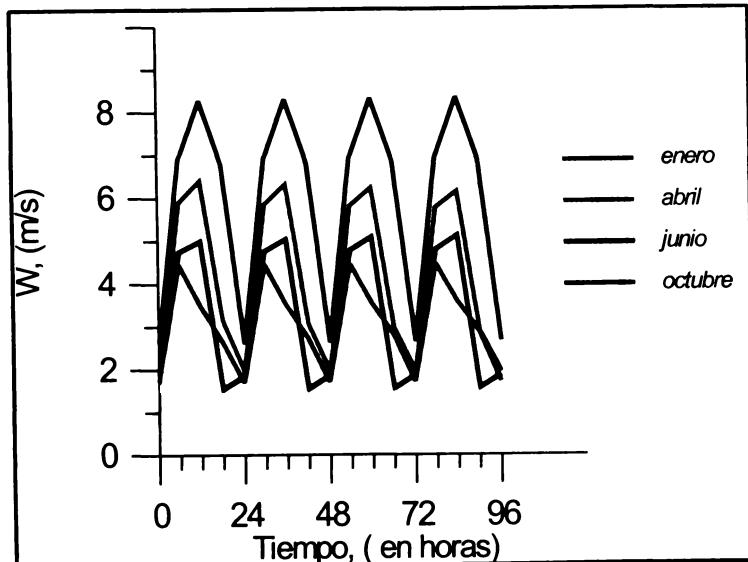


FIGURA 3. Comportamiento diario de la velocidad de viento para distintas épocas de año según los datos climáticos de la estación “Rafael Nuñez”.

En la época húmeda del año, cuando el viento es débil (media diaria de 3 m/s), se abre el intercambio de agua con el mar a través del canal en la parte norte de la cuenca; por esto la circulación del agua en la cuenca resulta influenciada por las oscilaciones de la marea en la frontera abierta con el mar.

Los cálculos numéricos con el modelo, para la época húmeda, se realizaron bajo las siguientes condiciones. En la frontera con el mar, las oscilaciones de la marea se calcularon con base en la información de Kjerfve (1981) sobre las constantes de los principales componentes armónicos de la marea en el puerto de Cartagena. El ancho del canal que une a la Ciénaga de Tesca con el mar se tomó igual a 100 m con profundidad de 1 m. El ciclo diario de la fuerza del viento se tomó de la base de datos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Cartagena para el mes de octubre, por lo cual, la dirección del viento no se varió y siempre se propuso igual a 220°.

En los cálculos para la época seca del año el canal se cerró y por consiguiente, el intercambio de agua con el mar desapareció.

Se tuvo en cuenta la disminución del nivel del agua en la Ciénaga por efecto de la intensa evaporación (≈ 169 mm/mes) y la ausencia de precipitación. Sin considerar el intercambio de agua con el mar, el cálculo estimativo demostró que no ocurre un cambio significativo en el nivel del agua de la cuenca, y que la disminución de agua por acción de la evaporación prácticamente se compensa por la llegada de un volumen de 69866 m³/dia de aguas negras. En esta época del año predominan vientos con dirección de 25° y velocidad máxima hasta 8 m/s.

El cálculo se realizó para tiempo de modelación de 25 días. Como se demostró en los experimentos numéricos, este tiempo es suficiente para que se elimine la variabilidad de los componentes del modelo hasta alcanzar las condiciones estacionarias sin variación en las condiciones externas. En el momento inicial se tomó la distribución espacial homogénea de los componentes químico - biológicos del modelo en la cuenca de acuerdo con la Tabla 1.

La Figura 4 ilustra las corrientes típicas en la Ciénaga para las épocas seca y húmeda.

En la primera de ellas, la bocana está cerrada y el carácter de la circulación depende totalmente de la variación de la

intensidad de viento (se supone que la dirección de los vientos alisios no cambia).

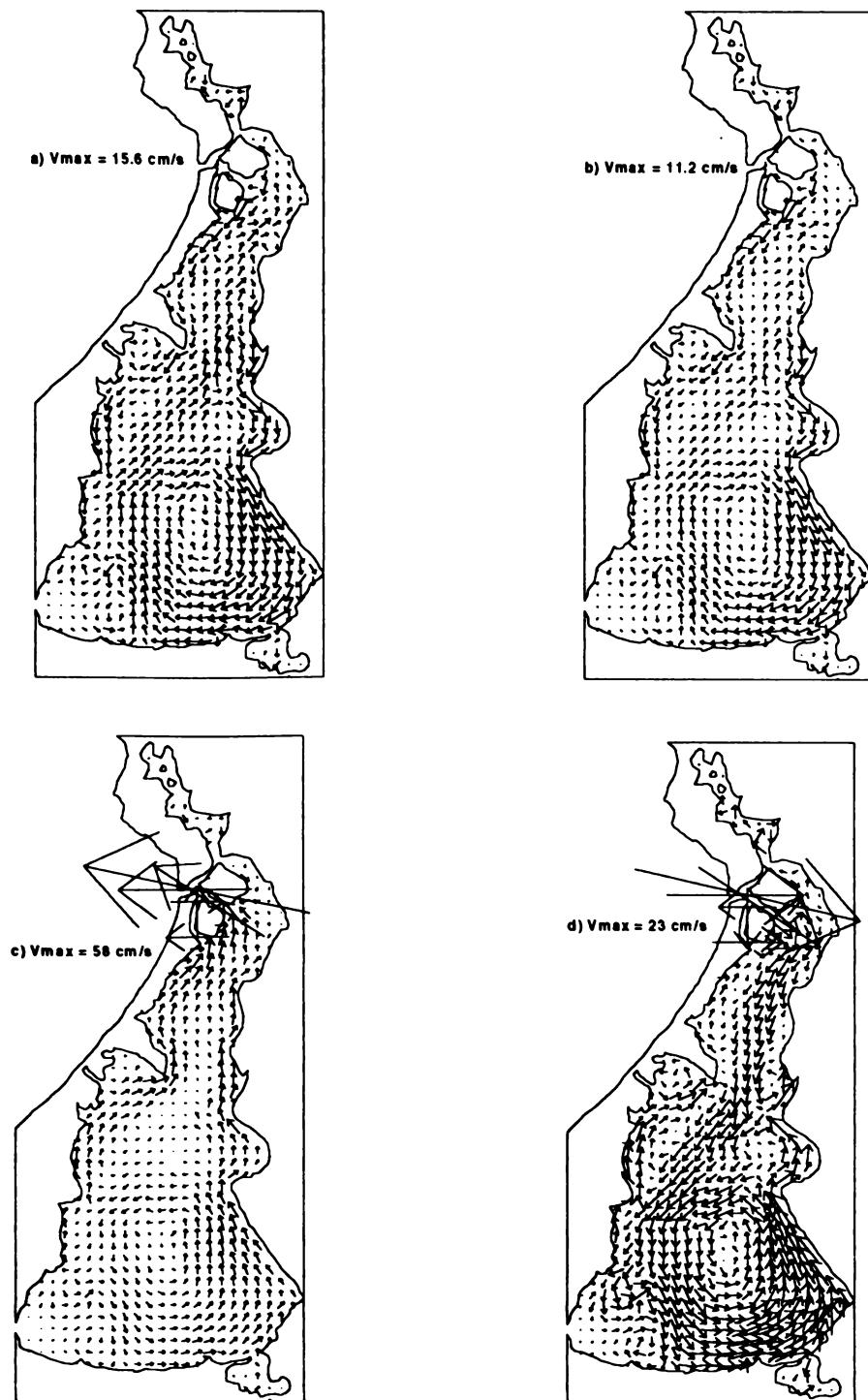


FIGURA 4. Fragmentos de las corrientes para la época seca - la bocana está cerrada- (a) 12 p.m., (b) 12 a.m. y para la húmeda - la bocana está abierta – (c) 12 p.m., (d) 10 a.m.

En el sentido barotrópico para las corrientes promedias en la vertical, la circulación se caracteriza por un flujo de compensación norte – noreste (ver Figura 4a y 4b) en las zonas mas profundas de la cuenca, mientras que en las aguas someras en cercanías de la costa el flujo está dirigido por el viento. La velocidad máxima varía diariamente entre 10 y 20 cm/s debido a que el impulso de viento tiene las oscilaciones naturales diarias. En la parte norte, que es muy angosta, la circulación no es muy pronunciada, mientras que en la zona sur se forma un anticiclón topográfico permanente. Teniendo en cuenta que el tiempo característico para el establecimiento del sistema de circulación en la Ciénaga es muy corto (unas horas) y los vientos alisios son predominantes para la correspondiente época de año, estos resultados son típicos y muy probables para dicha época. Señalamos, que las corrientes en la Figura 4 se presentan con una resolución de 200 metros, después de quitar algunos detalles de la circulación obtenida en el cálculo con una resolución de 100 metros.

En las Figuras 4c y 4d se muestra el sistema de circulación bajo influencia predominante de la marea (la bocana abierta) y poca influencia de los vientos débiles de suroeste. Se ve un flujo intenso a través de la bocana que oscila entre 20 y 60 cm/s. Los últimos valores, por supuesto, dependen de la exactitud de la información batimétrica en los canales de la bocana (sus anchos y profundidades), pero ellos no afectan significativamente los resultados posteriores, debido que la cuenca recibe precisamente aquella cantidad de agua, que le suministra el mar por la marea en la fase de ascenso.

En la época húmeda se invierte el sistema de circulación; aparece un ciclón en la parte sur, el cual se debilita en la fase de descenso (Figura 4c) y se intensifica en la fase de ascenso de la marea (Figura 4d).

En general, dependiendo de la época de año, el sistema de circulación y sus cambios afectan solamente los detalles estructurales de la distribución de las sustancias. Para mostrar la contribución de los procesos abióticos (transporte y difusión) en la distribución de una sustancia conservativa y pasiva se presenta la Figura 5 con las distribuciones típicas de salinidad para las dos épocas del año. Las fuentes de agua dulce son las aguas negras domésticas, ubicadas en la costa sur (la ciudad Cartagena). Para la época seca, el régimen de salinidad depende mucho de la evaporación, debido a que la bocana está cerrada, mientras que para la época húmeda hay una entrada de las aguas saladas del mar y la precipitación es un factor suficientemente pronunciado.

La Figura 5 muestra el régimen de salinidad correspondiente al carácter de la circulación, mostrado en la Figura 4. Como se señaló anteriormente, el aporte de las aguas negras (dulces) prácticamente está balanceado (en términos de volumen) con la tasa de evaporación. Por eso, en la época seca, cuando el agua del mar no entra a la Ciénaga, la salinidad se mantiene en un nivel promedio entre 31 y 32 ppm y, generalmente, no sufren las variaciones bruscas que se presentan en la época húmeda. Durante la última, se ve la entrada de las aguas del mar a través de la bocana y la lengua de las aguas dulces de las fuentes de contaminación se aprecia a lo largo de la costa oriental hacia el norte.

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados de cálculo de las distribuciones típicas de los componentes de ecosistema de la Ciénaga para la hora 12 del día 25 del tiempo de modelaje, en las épocas seca y húmeda. En la época seca, debido a las condiciones favorables de luminosidad, la productividad de fitoplancton y, consecuentemente, la utilización por él de las formas minerales de

nitrogeno y fósforo son mas altas que en la época húmeda. Por eso, el nivel total de los nutrientes para la época húmeda es mas alto, pero el de oxígeno es mas bajo. Debido a la circulación y la ubicación de las fuentes de contaminación, las concentraciones mas altas de nutrientes y materia orgánica se registran en la parte suroccidental de la

cuenca y, tambien, a lo largo de la costa sur y oriental. En la época humeda, debido la aireación débil por la ausencia del proceso de mezclamiento de viento, es probable la disminución del contenido promedio (en la columna vertical) de oxígeno en la parte sur hasta su valor critico de 1 ml/l.

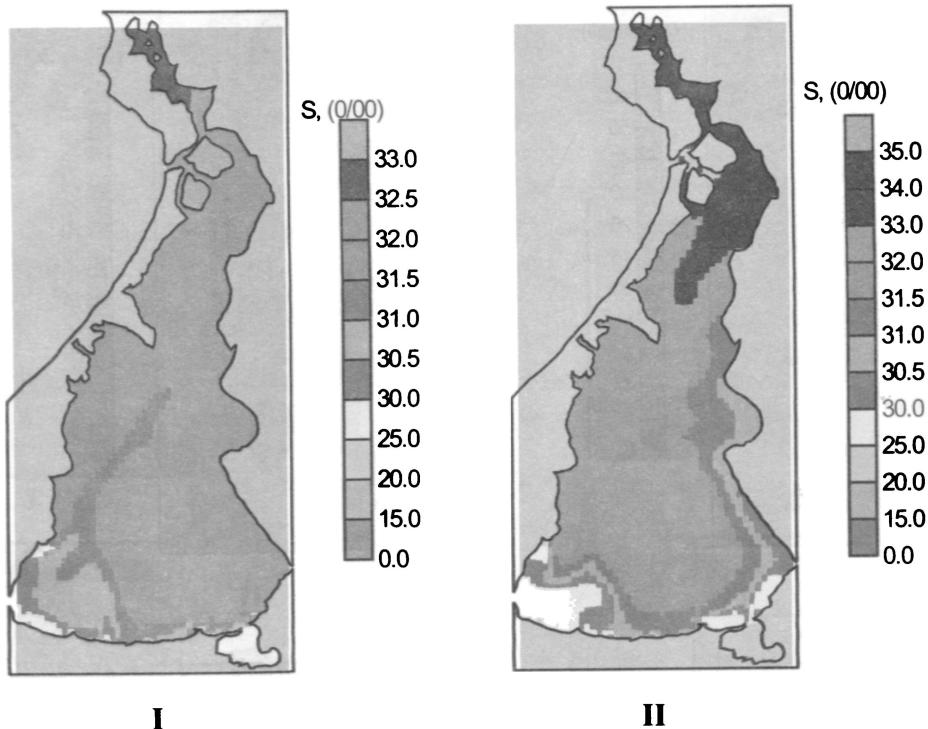


FIGURA 5. Distribución de salinidad para la época seca (I) y la húmeda (II) del año después de 25 horas de cálculo y una salinidad inicial de 33 $^0/00$.

Obviamente, si no toman medidas dirigidas a la normalización de las descargas de aguas negras o a la purificación de la materia orgánica muerta y los nutrientes, entonces, por el crecimiento natural de la ciudad, la contaminación de la Ciénaga por dichos elementos aumentará significativamente y su régimen de oxígeno empeorará.

Usando el modelo escrito anteriormente y las estimaciones sobre el incremento programado de la descarga de aguas negras de la ciudad Cartagena en la Ciénaga (los datos suministrados por AGUACAR, 1997), se puede efectuar un pronóstico del nivel de

contaminación para el año 2025. Algunos resultados de estos cálculos se muestran en la Figura 8. Se ve, por ejemplo, que la concentración de materia orgánica muerta durante el período de pronóstico aumentará desde 6-8 mg/l hasta 10-15 mg/l; el nitrógeno amoniacal, desde 0.4-1.0 mg/l hasta 2.0-2.5 mg/l. Sin considerar la productividad alta de fitoplancton y la aireación intensa de las aguas en la parte sur occidental de la cuenca, también se presentará déficit de oxígeno en la época seca. Así, sin las medidas respectivas el grado trófico del ecosistema de la Ciénaga de Tesca aumentará significativamente en el

futuro y la calidad de sus aguas empeorará hasta el nivel critico, por debajo del cual llegará la degradación completa de la cadena biótica del ecosistema.

Los especialistas del medio ambiente, lo entienden y están planteando las obras

técnicas para no permitir el desarrollo de aquella situación. Una de las medidas más eficientes es la construcción del sistema centralizado de canalización de las aguas negras de Cartagena hacia el mar abierto (Hazen & Sawyer, 1999).



DO, (mg/l)

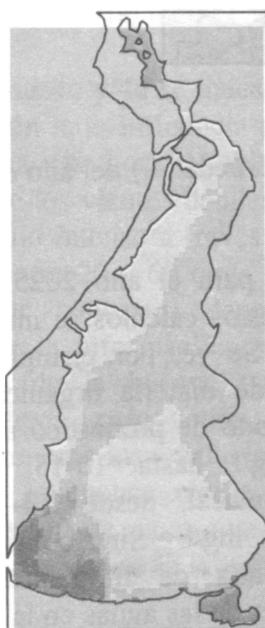
400
50
40
30
20
15
10
8
6
4
2
0



Bf, (mgCIA/m3)

30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0

II



NH4, (mg/l)

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

III



O2, (ml/l)

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

IV

FIGURA 6. Distribuciones de biomasa de fitoplancton (I), materia orgánica muerta (II), amonio (III), oxígeno disuelto (IV), obtenidas por el modelo para la época seca (febrero).

Según este proyecto, se espera que un 80 % de las aguas negras sean conducidas por el Emisario; sin embargo, el 20 % restante proveniente de la parte pobre de la ciudad,

ubicada en el borde sur de la Ciénaga y que no será cubierta por el sistema de canalización, aportará sus aguas contaminadas a la cuenca.

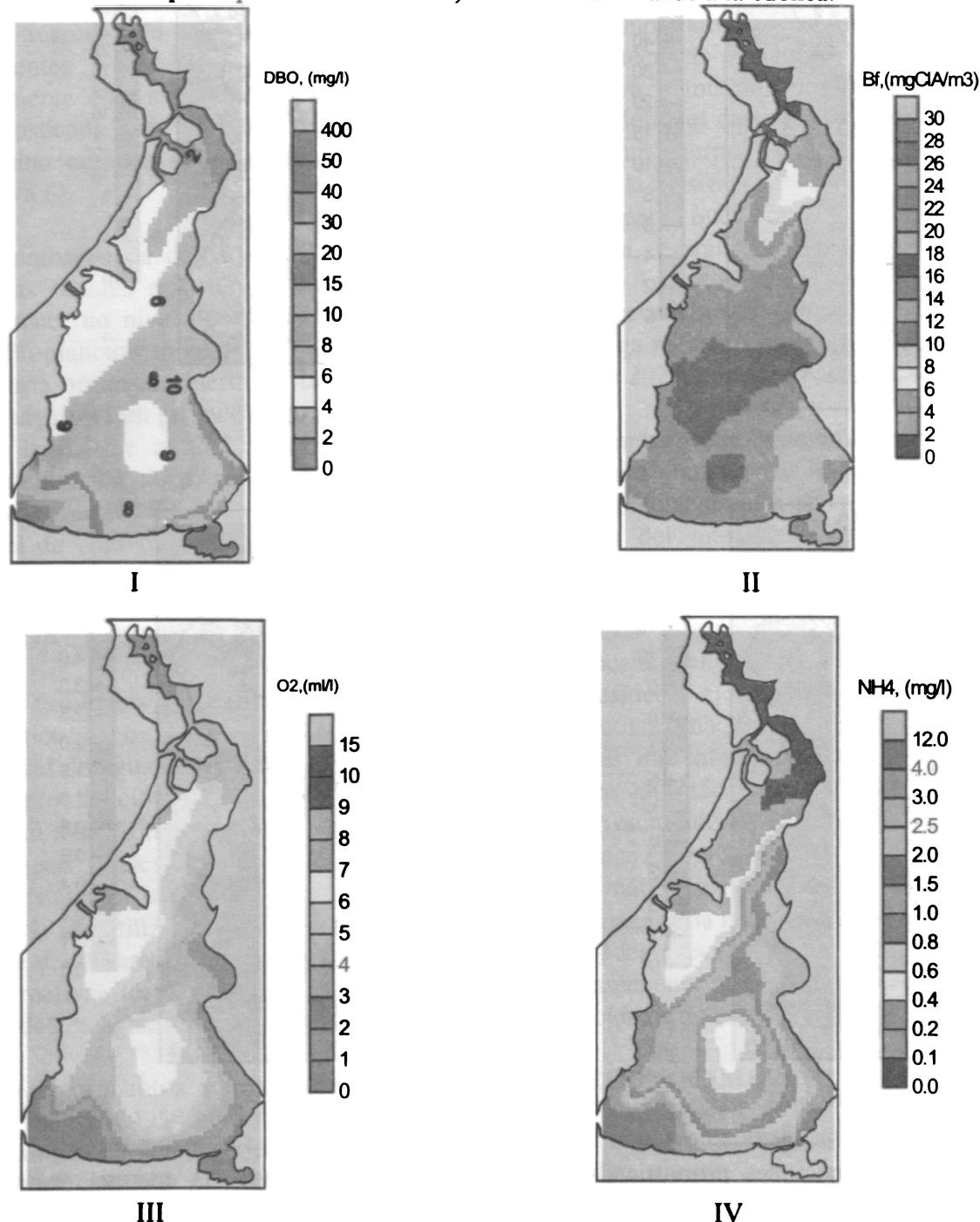


FIGURA 7. Distribuciones de biomasa de fitoplancton (I), materia orgánica muerta (II), amonio (III), oxígeno disuelto (IV), obtenidas por el modelo para la época húmeda (octubre).

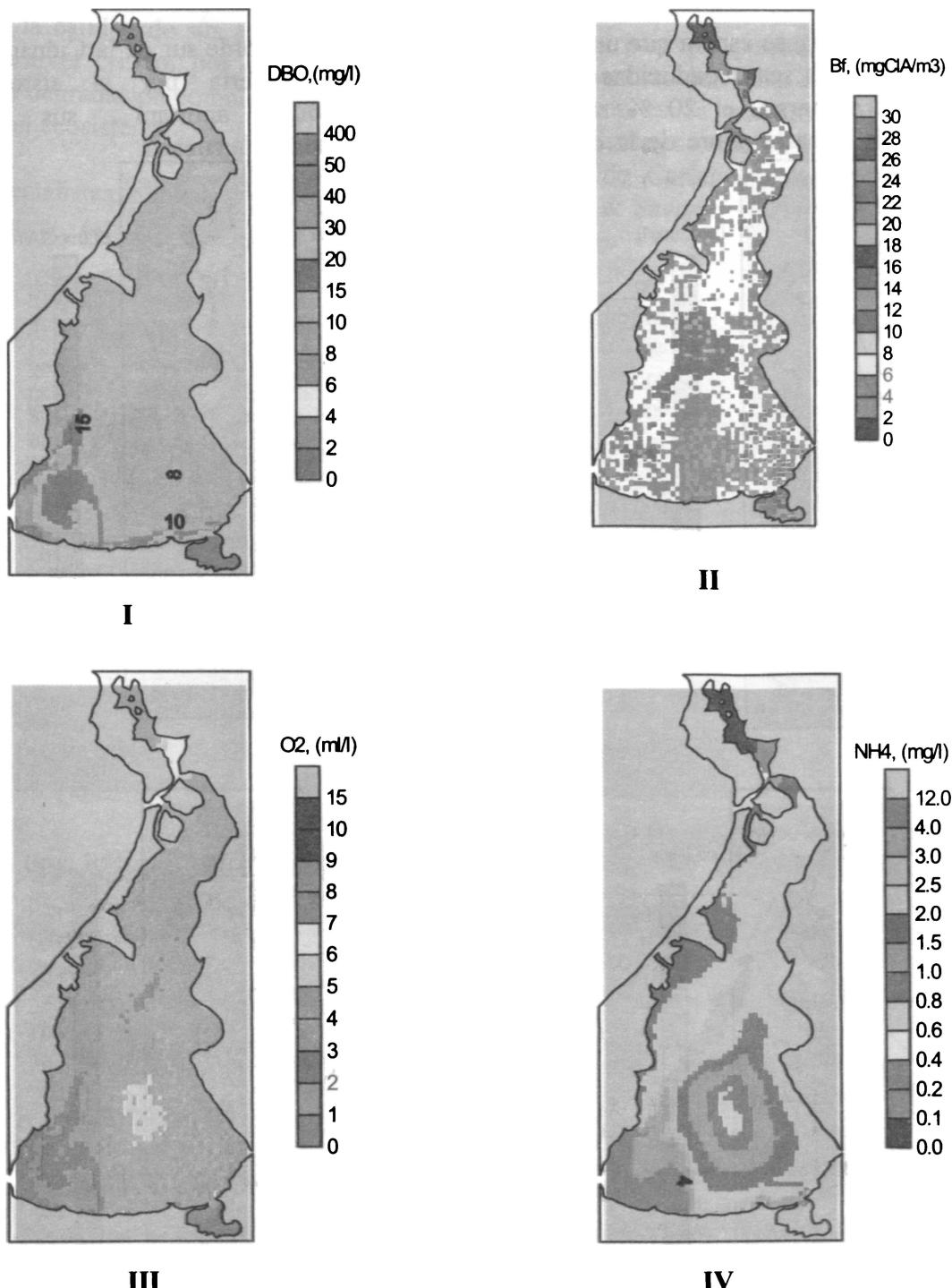


FIGURA 8. Distribuciones pronosticadas de biomasa de fitoplancton (I), materia orgánica muerta (II), amonio (III), oxígeno disuelto (IV), obtenidas por el modelo bajo las condiciones de la época seca para el año 2025.

Aparece un problema, el cual no se resuelve sin apoyo de los métodos de modelación matemática: “¿Será suficiente quitar dicho

80% de la descarga planteada para el año 2025 para un mejoramiento de la situación ecológica en la Ciénaga?”. Los cálculos de

pronóstico para el último escenario demostraron (ver Figura 9) que, gracias a su realización técnica, la calidad de las aguas en la Ciénaga mejorará significativamente, con respecto a la contaminación por nutrientes y materia orgánica muerta, no solamente en comparación con la situación pronosticada para el año 2025 (ver Figura 8), sino también con el estado actual (ver Figura 6).

Sin embargo, la descarga de los nutrientes de las fuentes restantes es suficiente para mantener un nivel alto de la productividad de fitoplancton, por eso el contenido de la materia orgánica muerta en las aguas de la Ciénaga será en promedio para la cuenca de 4-6 mg/l, que es 2-3 veces mayor de la concentración de patrón característico para el mar abierto. También se mantiene un alto nivel de contaminación en las partes sur y suroccidental.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de calibración del bloque químico – biológico del modelo de la calidad de aguas de la Ciénaga de Tesca en la aproximación 0-dimensional mostraron, que el modelo representa adecuadamente los procesos reales químico- biológicos del ecosistema. Consecuentemente, el modelo podría ser utilizado posteriormente como la base del desarrollo y el mejoramiento de las alternativas técnicas sobre el manejo de la calidad de aguas de esta cuenca.

Los experimentos numéricos con la versión 2-dimensional del modelo mostraron, que la dinámica de viento afecta en forma muy pronunciada a la distribución horizontal de los parámetros hidroquímicos en la Ciénaga. Las partes más contaminadas están ubicadas en la zona sur-occidental y a lo largo de las costas del sur y del este. En la época húmeda estas áreas son críticas desde el punto de

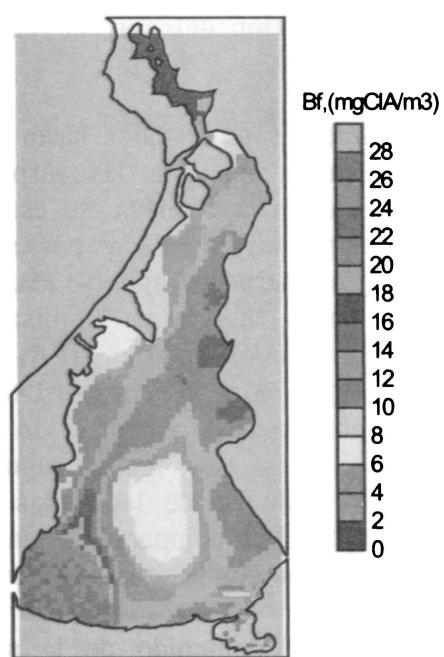
vista la disminución del oxígeno hasta los valores mínimos.

Los experimentos pronósticos hasta el año 2025 mostraron, que sin las respectivas obras técnicas en la Ciénaga, su estado se empeora significativamente y por algunas indicadores el cuerpo de agua se clasificará como un cuerpo “muy sucio” polisaprobió segú la clasificación dada en (IPA, 1982). Se espera que con la construcción del sistema centralizado de canalización de un 80 % de todas las aguas negras de Cartagena, la calidad de las aguas de la Ciénaga mejorará en comparación tanto con el año 2025, como con la situación actual.

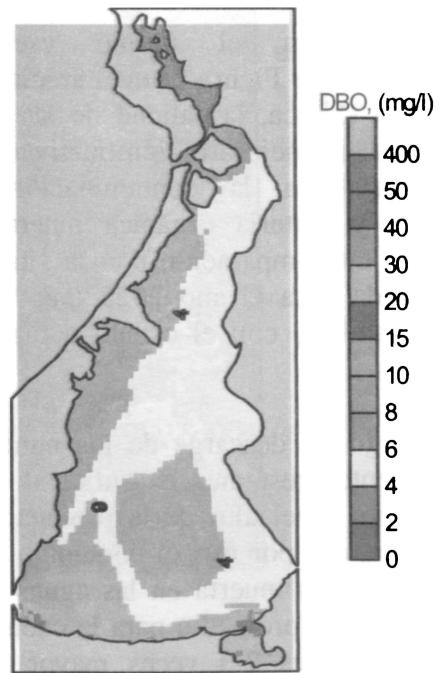
Sin embargo, el contenido de la materia orgánica muerta se dejará en un nivel suficientemente alto en comparación con las aguas del mar abierto (4-6 y 1.5 mg/l, respectivamente). Todavía se conserva un alto nivel de contaminación por nutrientes y materia orgánica en las partes sur y suroccidental. En relación con eso, bajo la necesidad a alcanzar en la Ciénaga el nivel de contaminación correspondiente al nivel en el mar abierto, es factible realizar las obras hidrotécnicas con el fin a mejorar la renovación de las aguas en la parte sur de la cuenca con el agua del mar. Esta alternativa de manejo de la calidad de aguas en la Ciénaga sería más eficiente, pero requiere de grandes recursos financieros y de la consecuente aprobación económica de la eficiencia de esta obra.

RECONOCIMIENTOS

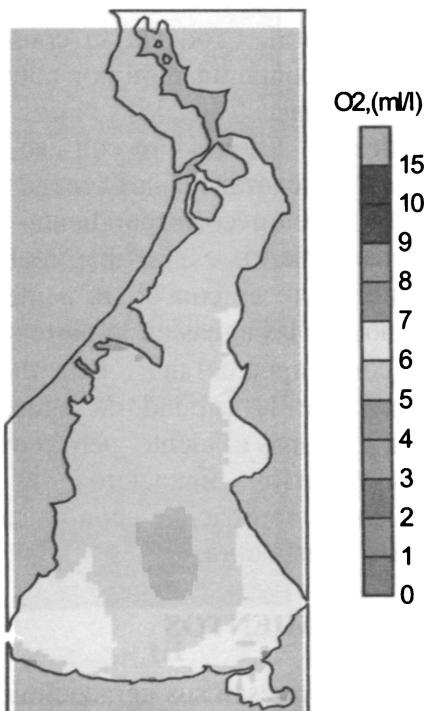
Los autores expresan sus agradecimientos al grupo ejecutivo del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas por los trabajos de campo y personalmente a Jesús Garay Tinoco por su permanente atención en el proyecto. Tenemos el gusto de agradecer a Lilian Posada García por su apoyo para incluir este artículo en la revista.



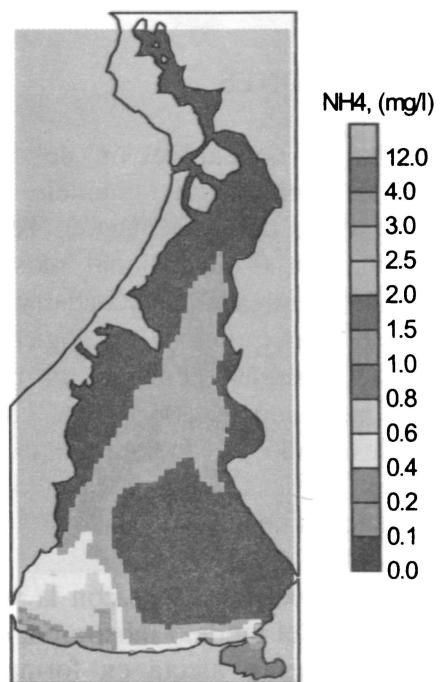
I



II



III



IV

FIGURA 9. Distribuciones pronosticadas para el año 2025 de biomasa de fitoplancton (I), materia orgánica muerta (II), amonio (III), oxígeno disuelto (IV), obtenidas por el modelo para las la época seca, en el caso de eliminación del 80 % de las descargas de aguas negras.

BIBLIOGRAFIA

AGUACAR - Aguas de Cartagena. Estimación de caudales y calidad de agua vertida a la Ciénaga de la Virgen desde el alcantarillado de Cartagena. Cartagena, Colombia, 1997, p.1-27.

BORIS, J. P. and Book, D. L. Methods Comput. Phys., 16, 1976, p. 85-129.

HAZEN & SAWYER. EIA (resumen). Emisario Submarino de Cartagena. Banco Mundial – Acuacar. Enero 1999.

HASKONING - CARINSA. Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen: Diagnóstico ambiental de alternativas. Cartagena, Colombia, 1996, 125 p.

HASKONING - CARINSA. Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen: Estudio impacto ambiental suplemento-anexos. Cartagena, Colombia, 1996, 56 p.

IPA - Instituto de los Problemas Acuáticos de la Academia de las Ciencias de la URSS. Las bases de pronóstico de la calidad de aguas superficiales. Moscú, Nauka, 1982, p. 6-21.

KJERFVE, B. Tides of the Caribbean Sea. En: Journal of Geophys. Res., Vol. 86, N. C5, 1981, p. 4243-4247.

LONIN, S.A. Modelo Hidrodinámico del CIOH y Cálculo de Transparencia para la Bahía de Cartagena. En: Boletín Científico CIOH, N.18, 1997, p. 85-92.

LYAKHIN, Y. I. Sobre la intensidad de intercambio de oxígeno entre el océano y la atmósfera. En: Oceanologia, Vol. 18, N. 6, Moscú, 1980, p.1014-1021.

PARSONS, T. R., TAKAHASHI, M. And HARGRAVE, H. Biological oceanographic processes. Oxford, New York, Pergamon Press, 1984, 324 p.

SOBEY, R. J. Finite-difference schemes compared for wave-deformation characteristics in mathematical modeling of two-dimensional long-wave propagation. U.S. Army Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center Techn. Mem., 32, 1970, 29 p.

TUCHKOVENKO, Y. S. Un modelo de eutroficación para la Ciénaga de la Virgen. En: Boletín Científico CIOH, N19, Cartagena, 1999 (en presa).

Mesosaprobio – nivel de contaminación del medio acuático según el índice saprobio (clasificación biológica de la calidad de aguas).

Hipoxia – exceso del contenido del oxígeno disuelto en la capa fótica, causado por un alto nivel de productividad de fitoplancton. Se encuentra en las cuencas eutroficas. El evento de hipoxia en la capa superficial usualmente se acompaña con anoxia en la capa del fondo, bajo la descomposición de la materia orgánica.

