

Alternativas de Solución para el Problema de Eutroficación en la Ciénaga de Tesca

YURIY S. TUCKOVENKO¹, SERGUEI A. LONIN² y LUIS A. CALERO³

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es determinar la eficiencia de distintas obras de ingeniería en la ciénaga de Tesca, que permitan la disminución del nivel de eutroficación y mejorar la calidad de agua de la misma.

El trabajo desarrolla el componente hidrodinámico de la ciénaga para obtener las distribuciones espaciales y el transporte de las sustancias del componente químico - biológico, aplicadas a las dos épocas del año. Con base en los resultados de los experimentos numéricos efectuados mediante la aplicación de un modelo bidimensional (2D) de eutroficación se realizó el análisis de la eficiencia de diferentes propuestas de ingeniería encontrando que las obras hidrotécnicas no representan una alternativa de solución integral sin el retiro del 80% de los vertimientos de aguas servidas a la ciénaga⁴.

ABSTRACT

The work involves the hydrodynamic component for the Ciénaga to

obtain the spatial distributions and transport of the substances of the chemical-biological component, applying to the dry and wet seasons of year.

Based on the results of the numerical experiments with a 2-D eutrofication model the analysis of different engineering alternatives has been done. Those are derived to the eutrofication level diminishing and to the improvement of the water quality of the Ciénaga de Tesca.

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 un ancho máximo 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 de 0.85 m, aproximadamente, la máxima llega hasta de 1.6 m. La ciénaga se comunica con el mar en forma intermitente por la boca ubicada en la Boquilla, que 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.

En la actualidad la Ciénaga de Tesca se puede calificar como una cuenca fuertemente contaminada (α -mesasaprobio) debido a que los indicadores de calidad del agua (contenido de DBO, PO₄), presentan todos los síntomas de eutroficación. La principal fuente de contaminación proviene de la descarga del 60 % de aguas servidas sin ningún tipo de tratamiento de la ciudad de Cartagena, a través de canales abiertos y alcantarillas, ubicados en la zona Sur de la Ciénaga (ver Figura 1).

Durante los últimos años la situación ecológica en la ciénaga ha empeorado bruscamente y se necesita urgentemente comenzar a ejecutar diferentes acciones de protección de la naturaleza para mejorar esta situación. La eficacia

¹ Ing. Oceanólogo, Ph.D., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, E-mail: slonin@sinus.enap.edu.co

² Ing. Oceanólogo, Ph.D., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, E-mail: slonin@sinus.enap.edu.co

³ Biólogo Marino, Capitan de Fragata, MSc., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, E-mail: lach1@starmedia.com

⁴ Estudio y artículo elaborado durante el año de 1.998.

de diferentes escenarios en el manejo de la calidad de las aguas puede ser estimada sólo con base en los resultados de los cálculos, realizados por medio de los modelos matemáticos.

Lo expuesto anteriormente ha

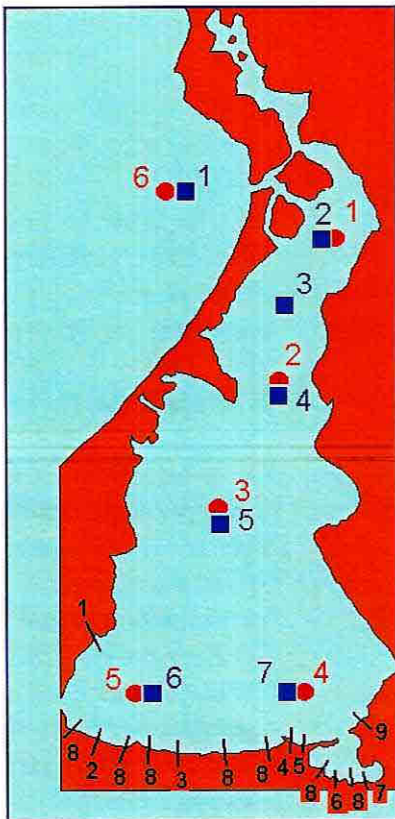


Fig. 1 Esquema de localización en la cuenca de la Ciénaga de Tesca de los puntos de monitoreo del CIOH (color rojo) e INDERENA - CARINSA (color azul), y también de las fuentes de contaminación: 1 - Estación el Oro, 2 - Colector P. Romero, 3 - Colector Tabu, 4,5 - Colector Blaz de Lezo, 6 - Colector Ternera-El Recreo, 7 - Colector Chapacua, 8 - canales de Zona Sur Oriental.

modificado el uso del cuerpo de agua de la ciénaga, convirtiéndolo prácticamente en una laguna de oxidación. Teniendo en cuenta la necesidad de recuperar este cuerpo de agua hasta el nivel permisible de contacto primario, se hace necesario ejecutar diferentes acciones basadas en la eficacia de diferentes escenarios en el manejo de la calidad de las aguas.

La descripción detallada de la estructura del modelo 0-D de eutroficación de la Ciénaga de Tesca y los resultados de su calibración con base en los datos de mediciones se muestran en Tuchkovenko y Castro (1999). Dándole aquí continuidad mediante el traspaso del modelo 0-D al 2-D, el último además se complementó con el bloque hidrodinámico para obtener las distribuciones espaciales y el transporte de las sustancias por el factor hidrodinámico.

El modelo 2-D de eutroficación contiene un bloque hidrodinámico y uno químico-biológico. En el último bloque se describen los flujos de la sustancia y la energía por las reacciones químicas y biológicas, mientras que el factor hidrodinámico permite realizar el transporte de estas sustancias y energía en el espacio por las corrientes y difusión.

El bloque químico-biológico contiene siete elementos principales basados en el uso, regeneración de los nutrientes en el ecosistema y el régimen de oxígeno en el

cuerpo de agua: fitoplancton, materia orgánica muerta inestable, fosfatos, amonio, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto. La descripción detallada del bloque está en Tuchkovenko y Castro (1999).

El objetivo del estudio está encaminado a determinar la eficiencia de distintas obras de ingeniería dirigidas a la disminución del nivel de eutroficación y mejoramiento de la calidad de aguas en la Ciénaga.

MODELO HIDRODINÁMICO

Debido a que la Ciénaga de Tesca es un cuerpo de aguas someras (la profundidad promedio es de un metro aproximadamente), para definir su comportamiento, es factible aplicar las siguientes ecuaciones básicas:

$$(HU)_t + (H\theta_{uu}UU)_x + (H\theta_{uv}UV)_y = -gHh_x - \alpha_0 HP_{a,x} + fHV + (2A_h HU_x)_x + (A_h H[V_x + U_y])_y + \tau_{xx} - \tau_{yx} \quad (1)$$

$$(HV)_t + (H\theta_{vv}VV)_x + (H\theta_{uv}UV)_y = -gHh_y - \alpha_0 HP_{a,y} - fHU + (2A_h HV_x)_x + (A_h H[V_x + U_y])_y + \tau_{yy} - \tau_{xy} \quad (2)$$

$$h_t + (HU)_x + (HV)_y = I - E \quad (3)$$

donde U y V son componentes de corrientes promedias en la vertical para las direcciones x e y, respectivamente; H es profundidad total, es decir $H = d + h$; d es profundidad local; h es nivel de agua; t es tiempo; f es parámetro de Coriolis; P_a es presión atmosférica; g es gravedad;

a_0 es volumen específico de agua; A_h es 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; l y E son tasas de precipitación y evaporación, correspondientemente. Los índices 'x', 'y' y 't' significan las respectivas derivadas.

Los términos

$$\theta_{uu} = \int_{-1}^0 (uu/UV) d\sigma,$$

$$\theta_{uv} = \int_{-1}^0 (uv/UV) d\sigma,$$

$$\theta_{vv} = \int_{-1}^0 (vv/VV) d\sigma$$

salen de la integración de las ecuaciones básicas tridimensionales para los componentes 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:

$$\begin{aligned} (CH)_{,t} + (HuC - HD_h C_{,x})_{,x} \\ + (HvC - HD_h C_{,y})_{,y} = Q_0 - Q_H + F, \end{aligned} \quad (4)$$

donde D_h es difusión turbulenta en horizontal; Q_0 y Q_H son flujos de sustancia a través de la superficie y el fondo; F es fuentes internas de la sustancia C , relacionadas con las reacciones físico-químicas o biológicas en el sistema.

Las ecuaciones (1)-(4) se han promediado también para el ancho de flujo en caso de la presencia de los canales angostos, es decir, cuando el dominio de cálculo es de la escala de malla, entonces se utilizan directamente las ecuaciones (1)-(4) y, cuando el dominio es de la subgrilla, se aplican las ecuaciones integradas por el ancho variable. Para la Ciénaga de Tesca esta condición es necesaria, debido a que en la parte norte están ubicados los canales estrechos entre las islas de manglar y el canal, conectado con el mar en algunos periodos de año.

El sistema (1)-(4) requiere las condiciones de contorno, para lo cual en las fronteras del mar abierto se definen los patrones de los campos oceanográficos si el flujo esta entrando al dominio de cálculo; se utilizan las condiciones de cálculo en el caso inverso. Se ha preestablecido el comportamiento del nivel del mar, relacionado con el régimen de mareas y otras ondas largas, entrantes y salientes:

$$C = \begin{cases} C_*, & \text{cuando } \bar{v}\bar{n} \leq 0 \\ f(C), & \text{cuando } \bar{v}\bar{n} > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$h = h_0 + \bar{v}\bar{n} \sqrt{\frac{H}{g}},$$

donde C_* es el patrón oceánico de la sustancia C ; la función $f(C)$ es una función de interpolación numérica desde el dominio de calculo hacia la frontera; \bar{n} es el vector unitario de la normal para

la frontera con el vector \bar{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:

$$\begin{aligned} U &= Q_r / (HB_x(\Delta L)) \text{ o} \\ V &= Q_r / (HB_y(\Delta L)); \\ (Vn)C + D_h \partial C / \partial n &= Q_C. \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

El área de la Ciénaga de Tesca se aproximó por una malla de 49x111 nodos de 100 m de resolución. El paso por el tiempo lo componen 10 seg. La distribución de las principales fuentes de contaminación (Figura 1)



Nombre del Efluente	Caudal Actual m ³ día ⁻¹	PARAMETROS DE LAS FUENTES					
		Caudal en año 2025 m ³ día ⁻¹	DBO ₅ mg l ⁻¹	PO ₄ mg l ⁻¹	NH ₄ mg l ⁻¹	NO ₂ mg l ⁻¹	NO ₃ mg l ⁻¹
Estación el Oro	15278	38209	313.4	9.27	10.7	0.027	12.4
Colector Pedro Romeo	6927	7048	358.58	9.27	10.4	0.027	12.4
Colector Tabu	4573	6478	405.3	9.27	10.8	0.027	13.0
Colector Blas de Lezo izquierdo	18096	10081	223.0	9.27	1.56	0.027	12.4
Colector Blas de Lezo derecho	1696	2868	223.0	9.27	1.56	0.027	12.4
Colector Chapacua	2160	2160	366.6	9.27	10.4	0.027	12.4
Colector Ternera							
-El recreo	3440	6581	313.4	9.27	10.4	0.027	12.4
Zona Sur			311.9	9.27	18.5	0.027	11.8
Oriental							
Elevadoras	6357	6357					
La esperanza	1911	1911					
Barcelona	1845	1845					
El Libano	860	860					
El Tancon	1500	1500					
Otras canales	1500	1500					
	1364	1364					
Zona del Pozon	2237	6581	311.9	9.27	0.027	0.027	11.8

Tabla 1. Información de Aguas de Cartagena sobre los caudales de las principales fuentes de contaminación en la Ciénaga de Tesca y el contenido de sustancias contaminantes en las aguas de desagüe.

y las características de su desagüe se obtuvo con base en información de Aguas de Cartagena (1997) (ver Tabla.1).

El coeficiente de difusión en horizontal D_h se propone igual a $0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Este valor es el promedio del valor calculado según la fórmula de Okubo: $D_h = 0.0103L^{1.15}$ ($[D_h] = \text{cm}^2\text{s}^{-1}$; $[L] = \text{cm}$) para los procesos con una escala espacial $L = 200 \text{ m}$ (doble paso de la malla) y obtenido de acuerdo a Joseph,

Sendner (1958): $D_h = AL/2$ ($[D_h] = \text{cm}^2\text{s}^{-1}$; $[L] = \text{cm}$), donde A es "la velocidad" de la difusión aceptada como 1.0 cm s^{-1} para estuarios medianos (GOIN, 1983).

Los cálculos numéricos se realizaron con dos variantes: bajo las condiciones de la época seca y húmeda del año. Durante el periodo seco (enero - abril) se elimina el intercambio del agua de la cuenca con el mar abierto; en esta época la circulación del agua

de la Ciénaga de Tesca se muestra influenciada por la fuerza de los vientos alisios, que provienen del Noreste, hasta de 8 ms^{-1} . Por el contrario, en la época húmeda del año, el viento es débil (en medias por día de 3 ms^{-1}), se abre el intercambio de agua con el mar a través del canal en la parte norte de la cuenca, la circulación del agua en la cuenca se encuentra 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 se mantienen oscilaciones de la marea, calculadas con base en la información de Kjerfve (1981) sobre las constantes de los principales componentes armónicos de la marea en el puerto de Cartagena (Tabla 2). El ancho del canal, que une a la Ciénaga de Tesca con el mar se tomó igual a 100 m con una profundidad de 1 m . El ciclo diario de la fuerza del viento para la época húmeda se tomó de la base de datos climáticos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Cartagena para el mes de octubre, la dirección del viento no varió manteniéndose igual a 220° .



En los cálculos para la época seca del año, el canal se cerró, 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 evaporación intensiva ($\approx 169 \text{ mm mes}^{-1}$) y ausencia de la precipitación. El cálculo estimativo demostró, que sin mirar la ausencia del intercambio de agua con el mar, no ocurre un cambio significativo en el nivel del agua de la cuenca, así como la disminución del agua por acción de la evaporación prácticamente se compensa por la llegada de las aguas negras de volumen igual a $69866 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. En este periodo del año predomina el viento en dirección de 25° y la velocidad máxima hasta 8 ms^{-1} .

El cálculo se realizó para un periodo de 30 días del tiempo de modelación, este tiempo es suficiente para que la variabilidad de los componentes del modelo se elimine hasta alcanzar las condiciones estacionarias sin alteración en las condiciones externas. En el momento inicial de tiempo se tomó la distribución espacial homogénea de los componentes químico-biológicos del modelo en la cuenca, de acuerdo con la Tabla 3.

SITUACION ACTUAL CIENAGA DE TESCA

La Figura 2 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). En el sentido barotrópico para las corrientes promedias en la vertical, la circulación se caracteriza por un flujo de compensación hacia norte - noreste (Figuras 2a y 2b) en las zonas más 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 está variando diariamente entre 10 y 20 cms^{-1} , debido que el impulso del viento tiene las oscilaciones naturales diarias. En la parte norte, la cual 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. Las corrientes en la Figura 2 se presentan con una resolución de 200 metros, eliminando algunos detalles de la circulación, obtenida en el cálculo con una resolución de 100 metros.

Las Figuras 2c y 2d muestran el sistema de circulación bajo la influencia predominante de la marea (la bocana abierta) y poca

Constante	Amplitud (SM)	Fase (Grados)
M_2	7.7	137
S_2	1.6	47
N_2	2.4	112
K_1	9.7	240
O_1	5.9	240

Tabla 2. Constantes armónicas de los componentes de la pleamar para el puerto de Cartagena, Kjerfve (1981).

Componente	Cond. en la Ciénaga	Cond. en el Mar (Borde)
Temperatura, $^\circ\text{C}$	30	29
Salinidad, S°oo	30	35
Transparencia, m	0.3	0.8
Fitopl. mgCIA m^{-3}	80-130	2
Fosfatos (PO_4), mg l^{-1}	0.3-0.5	0.02
Amonio (NH_4), mg l^{-1}	0.3-0.5	0.2
Nitritos (NO_2), mg l^{-1}	0.005	0.007
Nitratos (NO_3),	0.01	0.05
Oxígeno (O_2), ml l^{-1}	4.5	3.5
Materia Orgánica muerta, $\text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$	20-25	1.5

Tabla 3. Valores característicos de los parámetros hidrológicos y componentes químico - biológicos del ecosistema de la Ciénaga de Tesca y en el mar.

influencia de los vientos débiles de suroeste. Se ve un flujo intenso a través de la bocana que oscila entre 20 y 60 cms^{-1} . 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 a

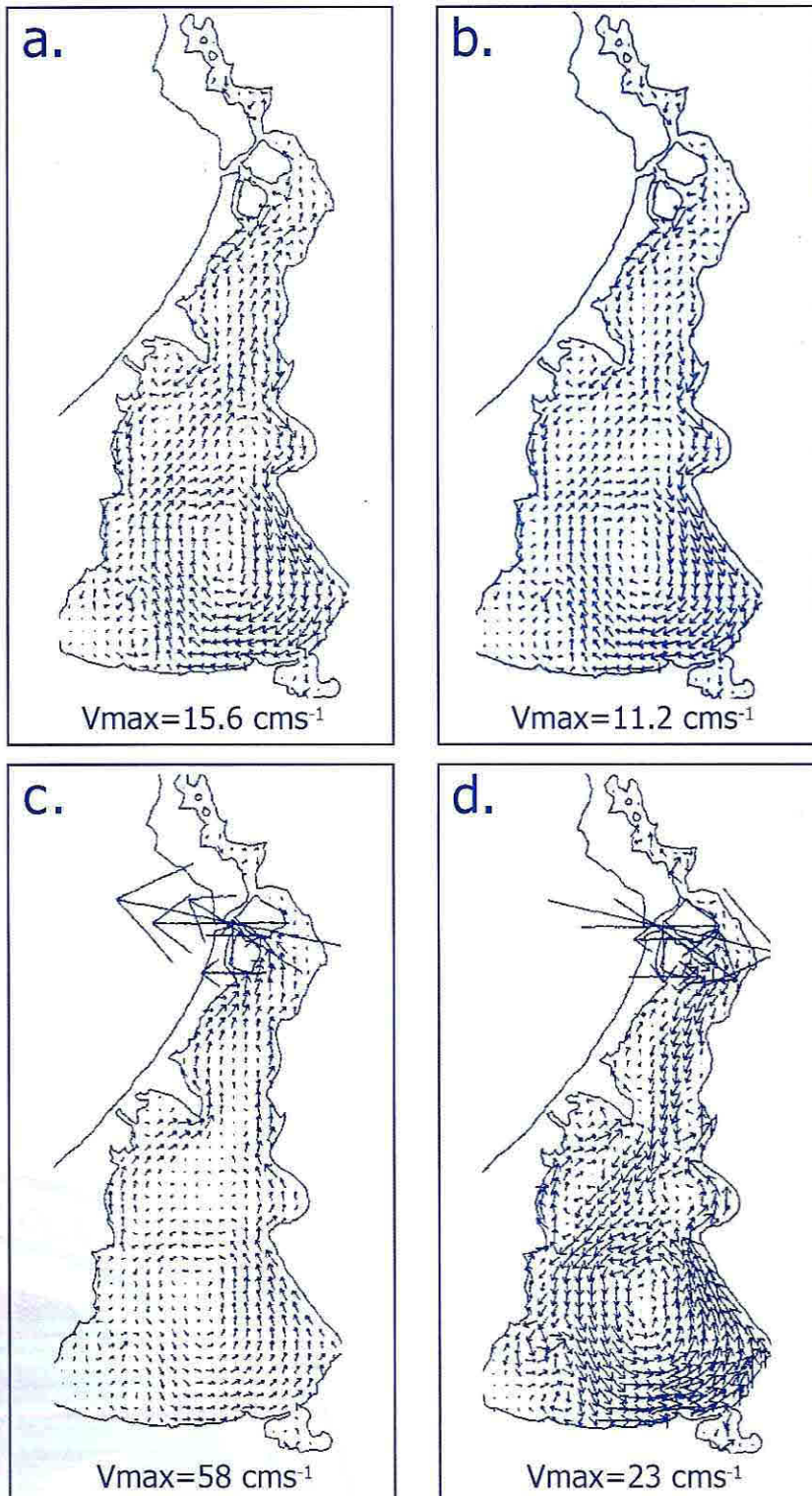


Fig. 2 Fragmentos de las corrientes para la época seca (la bocana esta cerrada; a - 12 p.m., b - 12 a.m.) y la húmeda (la bocana esta abierta; c - 12 p.m., d - 10 a.m.).

que la cuenca recibe precisamente aquella cantidad de agua, que le suministra el mar por la marea en la fase de ascenso.

El sistema de circulación para la época húmeda, es inverso. Aparece un ciclón en la parte sur, el cual se debilita en la fase de descenso (Figura 2c) y se intensifica en la fase de ascenso de la marea (Figura 2d).

Los resultados de cálculo de las distribuciones típicas de algunos componentes del ecosistema de la Ciénaga para las 12 horas del día 30 del tiempo de modelaje en las épocas seca y húmeda se muestran en la Figura 3. En la época seca la productividad de fitoplancton es más alta, que en la época húmeda, debido a las condiciones favorables de luz y al incremento de uso por él fitoplancton de las formas minerales de nitrógeno y fósforo. Para la época húmeda las condiciones son inversas siendo el nivel total de nutrientes más alto.

En la época seca del año, las máximas biomásas del fitoplancton, las concentraciones de los elementos biogénicos y de la sustancia orgánica muerta se observan en la parte sur-occidental de la cuenca de la Ciénaga. La distribución espacial de las formas minerales del nitrógeno y del fósforo se caracteriza por la presencia de la pluma con el incremento de las concentraciones, la cual se extiende desde el sur-occidente hasta el sur-oriente de la cuenca.

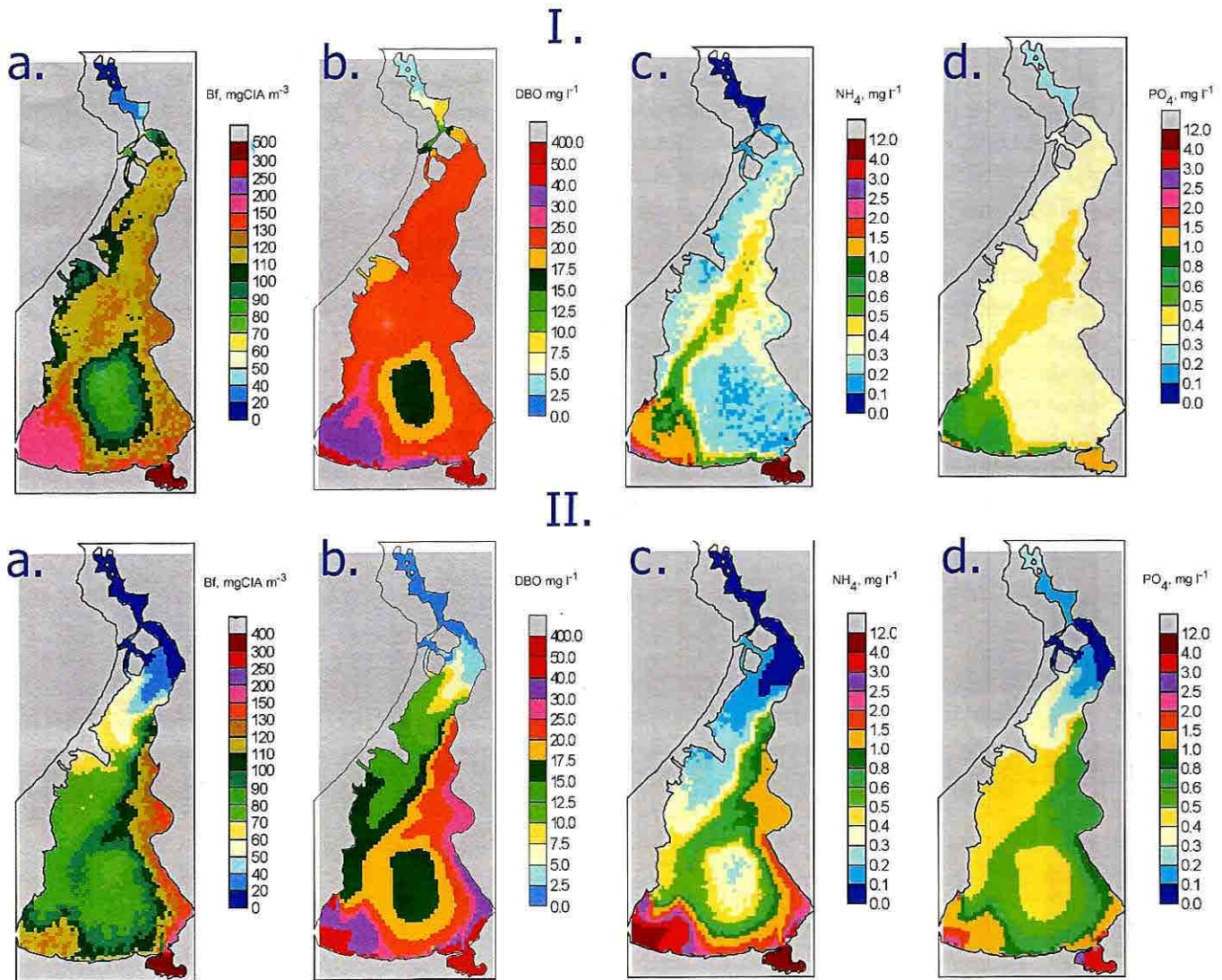


Fig. 3 Distribución de biomasa de fitoplancton (a), materia orgánica muerta (b), amonio (c), fosfatos (d) obtenidas por el modelo bajo las condiciones de la época seca (I) y de la época húmeda (II).

En la época húmeda, debido a la influencia de los vientos y al intercambio de aguas de la ciénaga con las del mar, varían el sistema de corrientes y la presencia de contaminación. Altos niveles de contaminación en este periodo del año se observan a lo largo de las costas del sur y del oriente de la Ciénaga. Aguas marinas relativamente limpias se extienden desde el norte a lo largo de la

orilla occidental de la Ciénaga.

Los cálculos de la situación actual para las épocas seca y húmeda del año muestran que, las concentraciones características de elementos obtenidas por el modelo de eutroficación del ecosistema de la Ciénaga de Tesca y de sus distribuciones espaciales, están de acuerdo con los datos de observaciones (Tabla 3).

CIENAGA DE TESCA EN EL AÑO 2025

Con base en el modelo 2-D fue realizado el pronóstico del grado de contaminación de aguas de la Ciénaga de Tesca para el año 2025. Para este pronóstico se utilizaron las estimaciones de incremento de la cantidad de ingreso las aguas servidas hasta de $95,343\text{m}^3\text{ dia}^{-1}$, correspondiente

al crecimiento proyectado de la población de la ciudad de Cartagena (los datos suministrados por ACUACAR, 1997, ver Tabla 1). Se variaron sólo los caudales de las fuentes de contaminación. Se considero que el contenido de las sustancias contaminantes en las aguas servidas que se vierten al cuerpo de agua permanecen iguales. Los caudales de las fuentes, las cuales no poseen información de pronóstico (por ejemplo, Zona Sur Oriental) se suponen iguales a las cantidades

actuales. Los experimentos numéricos mostraron (Figura 4.I), que sin las medidas de protección ambiental, la situación ecológica para el año 2025 en la Ciénaga de Tesca se empeorará drásticamente. Por ejemplo, la biomasa de fitoplancton durante el periodo pronostico se aumentará desde 110-130mgCl⁻¹A⁻¹m⁻³ hasta 150-200mgCl⁻¹A⁻¹m⁻³, concentración de la materia orgánica muerta desde 20-25mgO₂l⁻¹ hasta 30-40mgO₂l⁻¹, el nitrógeno amoniacal - desde 0.4-0.6mgN l⁻¹ hasta

0.8-1.5mgN l⁻¹, de tal forma que sin las acciones respectivas, el grado trófico del ecosistema de la Ciénaga de Tesca se incrementara significativamente en el futuro, llegando la calidad de las aguas a niveles críticos, generado por la degradación completa de la cadena biótica del ecosistema.

Por supuesto, los especialistas del medio ambiente lo entienden y están planteando las obras técnicas de ingeniería para no permitir el desarrollo de dicha situación. Una

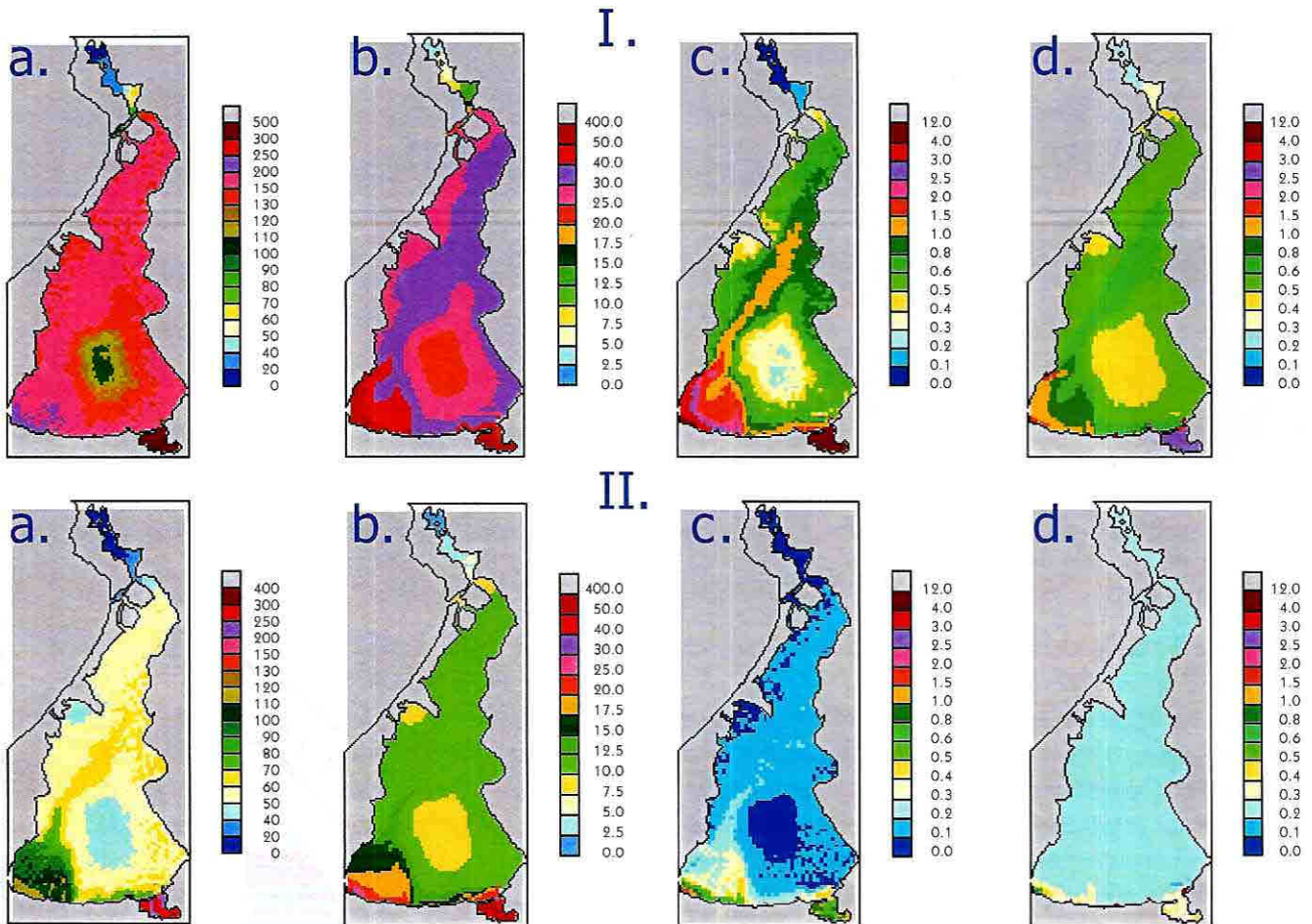


Fig. 4 Pronóstico de distribución de biomasa de fitoplancton (a), materia orgánica muerta (b), amonio (c), fosfatos (d), obtenidas por el modelo bajo las condiciones de la época seca para el año 2025 sin (I) y con (II) eliminación de 80 % de las descargas de las aguas servidas.

de las medidas propuestas es la construcción del sistema centralizado de canalización de las aguas servidas de Cartagena hacia el mar abierto (Hazen & Sawyer, 1999). Según este proyecto se espera que un 80 % de las aguas servidas se vaya por el emisario, sin embargo el 20 % restante corresponde a desagües directos de los habitantes ubicados en el borde sur de la Ciénaga y esta cantidad de aguas negras no será cubierta aun por el sistema de canalización. Se presenta el siguiente interrogante, el cual no se resuelve sin apoyo de los métodos de modelación numérica: "¿Será suficiente eliminar el 80% de la descarga de aguas servidas proyectada para el año 2025, para conseguir mejorar la situación ecológica en la Ciénaga?"

Se parte del supuesto de que al sistema de canalización no se le incluyeron todas las fuentes de la Zona Sur Oriental y de la Zona del Pozón, el caudal total de los cuales representa un 20 % del pronostico para el año 2025 del volumen común del desagüe de las aguas contaminantes (Tabla 1).

Los cálculos de pronóstico para el último escenario demostraron (Figura 4.11), que la eliminación del 80% de la carga de las aguas servidas a la ciénaga, mejorará significativamente la calidad del agua; no solamente en comparación con la situación de pronóstico para el año 2025 (Figura 4.1), sino también con el estado actual (Figura 3) al respecto de la contaminación

por los nutrientes y la materia orgánica muerta. 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 $10-11 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, que es muchas veces mayor que la concentración de patrón característico para el mar abierto (Tabla 3). También se mantiene un alto nivel de contaminación en las partes sur y sur-occidental. En relación con eso, bajo la necesidad a alcanzar el nivel de contaminación en la ciénaga correspondiente al nivel en el mar abierto, es factible a realizar obras hidrotécnicas con el fin a mejorar la renovación de las aguas en la parte sur de la cuenca con el agua del mar.

Diferentes variantes de medidas hidrotécnicas, encaminadas al refuerzo del lavado hidrodinámico de la Ciénaga de Tesca con las aguas marinas relativamente limpias, se presentan ampliamente en el trabajo de las compañías Haskoning - Carinsa (1996). La variante de construir en la región central de la ciénaga un canal de unión con el mar y de un dique dirigido del canal desde el norte al sur, el cual dividiría la parte sur de la cuenca de la ciénaga en las mitades oriental y occidental (Figura 5-7), ha sido reconocida como la más eficiente. El canal por si mismo también se divide por el dique en dos entradas - salidas, una de las cuales une el mar con la parte

occidental de la cuenca, y la segunda, con la parte oriental. Se supone un régimen dirigido de trabajo de entradas - salidas del canal, por lo cual el agua marina entra a la parte oriental de la cuenca a través de la entrada sur, y las aguas contaminadas de la ciénaga llegan al mar de la parte occidental a través de la salida norte.

En los cálculos presentados por Haskoning - Carinsa para el proyecto de la Bocana estabiliza se encuentra lo siguiente:

1. No se tuvo en cuenta la influencia de los vientos en la circulación de las aguas y de las oscilaciones del nivel en la Ciénaga de Tesca.
2. Los cálculos se efectuaron sólo para las condiciones de la época húmeda del año, cuando el estrecho está abierto y los vientos son débiles.
3. En el bloque químico-biológico del modelo no se tuvo en cuenta la dependencia de la productividad del fitoplancton del abastecimiento con elementos biogénicos y de las condiciones de luz, y no se consideró la sustancia orgánica de procedencia autóctona.



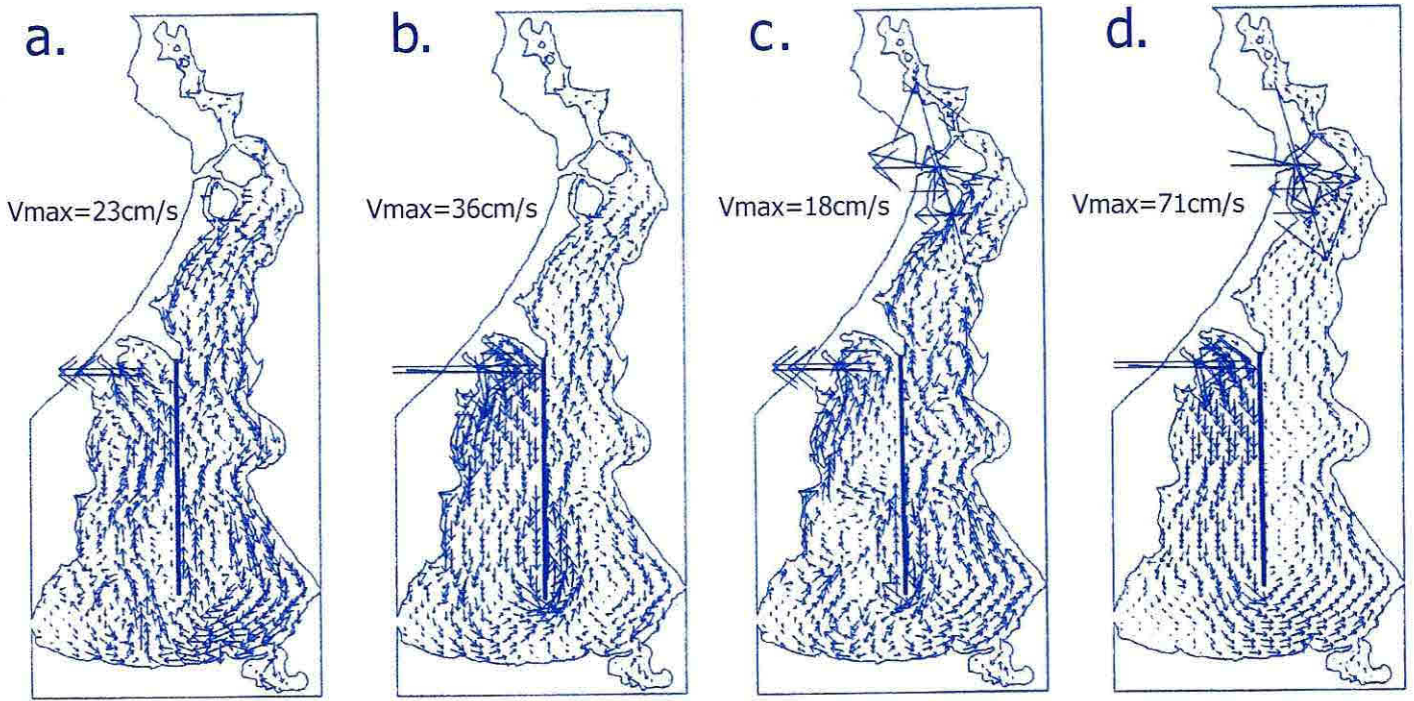


Fig. 5 Circulación de las aguas de la Ciénaga de Tesca para la época seca (a-3 a.m., b-12 a.m.) y la húmeda (c-3 a.m., d-12 a.m.) bajo la realización de la alternativa 1.

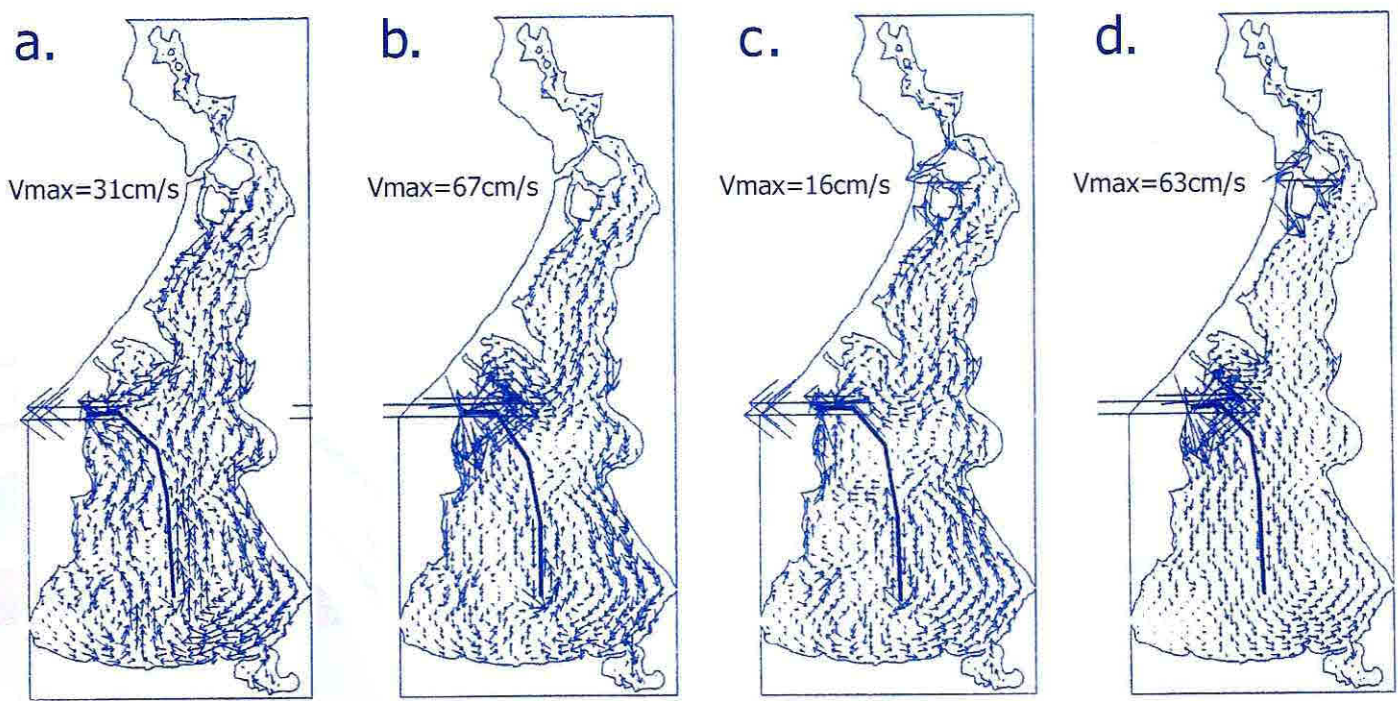


Fig. 6 Circulación de las aguas de la Ciénaga de Tesca para la época seca (a-3 a.m., b-12 a.m.) y la húmeda (c-3 a.m., d-12 a.m.) bajo la realización de la alternativa 2.

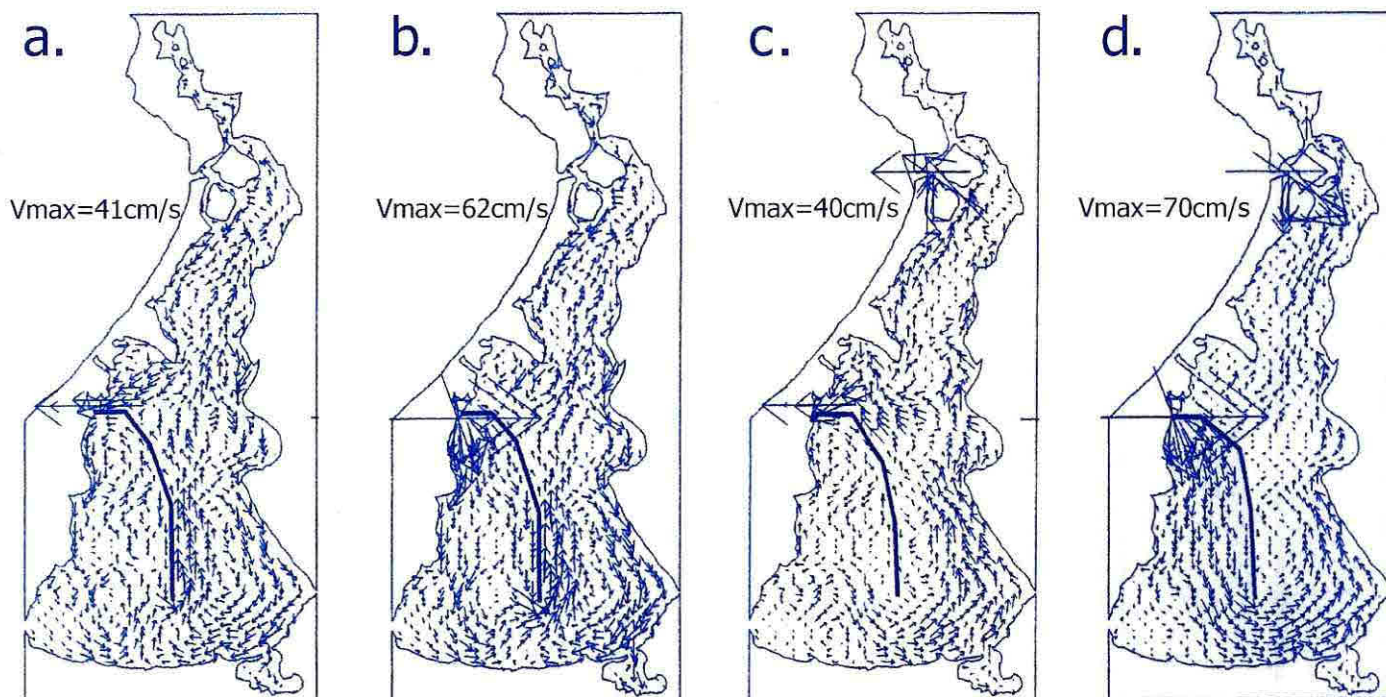


Fig. 7 Circulación de las aguas de la Ciénaga de Tesca para la época seca (a-3 a.m., b-12 a.m.) y la húmeda (c-3 a.m., d-12 a.m.) bajo la realización de la alternativa 3.

Además, después de la realización del trabajo de Haskoning - Carinsa, se obtuvieron datos de volúmenes de desagüe de aguas contaminadas por las fuentes y del contenido en ellas de sustancias contaminantes. Por esto resultó interesante realizar cálculos adicionales en base al modelo anteriormente descrito con el objetivo de analizar la efectividad del funcionamiento de las construcciones de ingeniería supuestas.

Se consideraron tres variantes de construcción del dique y del canal de unión:

1. Un canal de 200 m de ancho y 1 m de profundidad con un régimen de trabajo no dirigido. Un dique dirigido meridionalmente que empieza desde el cabo que divide la cuenca

de la Ciénaga en las partes norte y central. (Figura 5).

2. Dos canales de 100 m de ancho y 1 m de profundidad. Un dique dirigido meridionalmente, el cual se localizaría entre los canales. El canal sur conecta el mar con la parte occidental de la Ciénaga, el del norte con la parte oriental. Régimen de trabajo de los canales, no dirigido (Figura. 6).

3. Otra alternativa, variante 2, con un régimen de trabajo de los canales, dirigido. El canal sur (esclusa) se abriría, cuando la marca del nivel del mar supere la marca del nivel del agua en la Ciénaga (marea alta) y el norte, en forma contraria, cuando la marca del nivel del mar es menor que la marca del

nivel del agua en la Ciénaga (marea baja) (Figura 7).

Como se observa de las Figuras 5-7, la construcción del canal y del dique en principio cambia el sistema de circulación de las aguas en la Ciénaga. La estructura de las corrientes y del intercambio de aguas entre las partes de la cuenca oriental y occidental, divididas por el dique, varía de una manera compleja durante el transcurso del día, de acuerdo a las oscilaciones diarias de la velocidad del viento y de las oscilaciones de marea en la frontera marina. Se destaca, teniendo en cuenta la acción del viento del sistema de corrientes, que el intercambio de masa y de aguas entre las diferentes partes de la Ciénaga posee un carácter mucho más complejo, teniendo

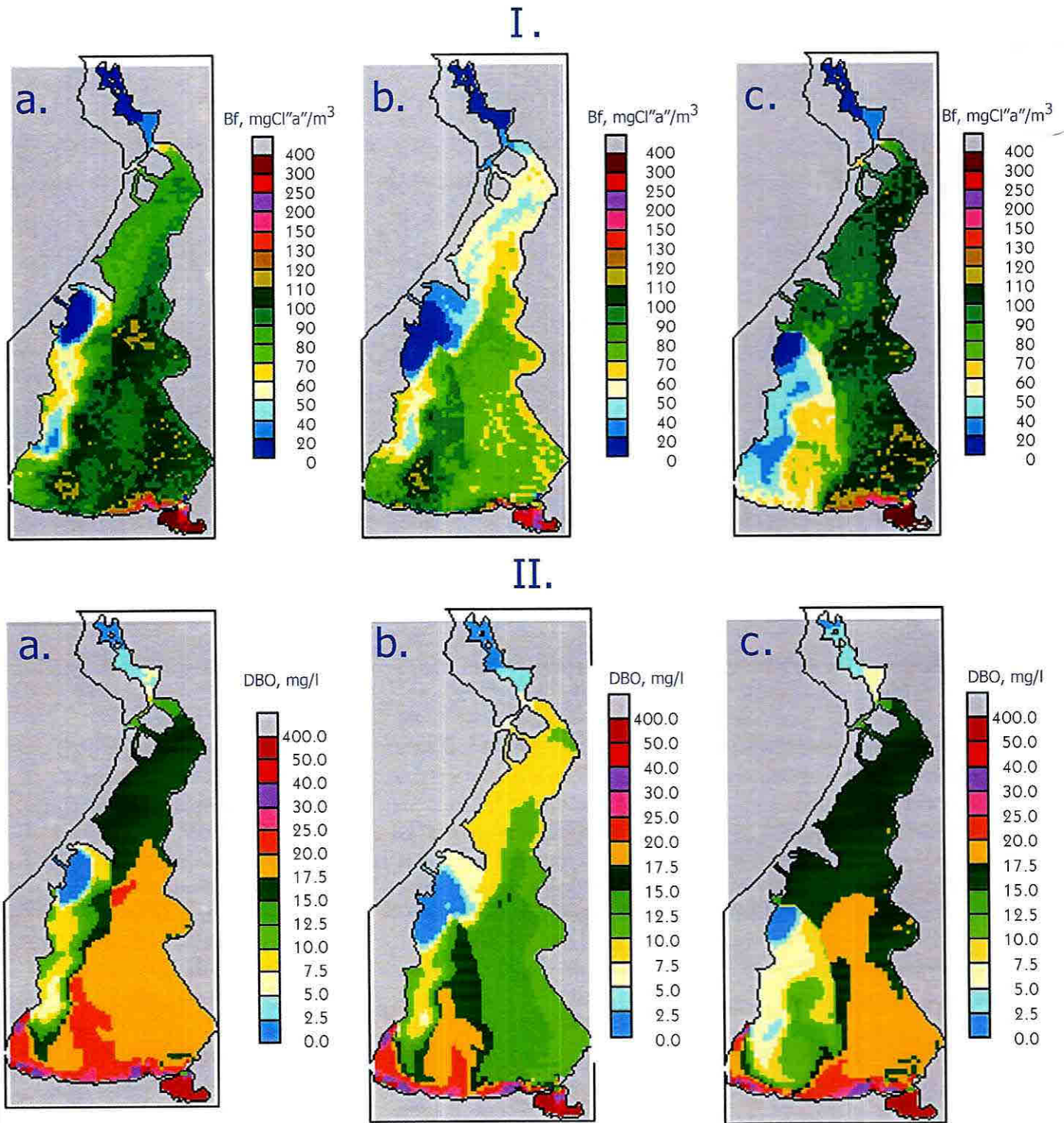


Fig. 8 Pronóstico de distribución de biomasa de fitoplancton (I) y DBO (II), obtenidas por el modelo bajo las condiciones de la época seca con realización de diferentes variantes de las obras de ingeniería: a) alternativa 1, b) alternativa 2, c) alternativa 3.

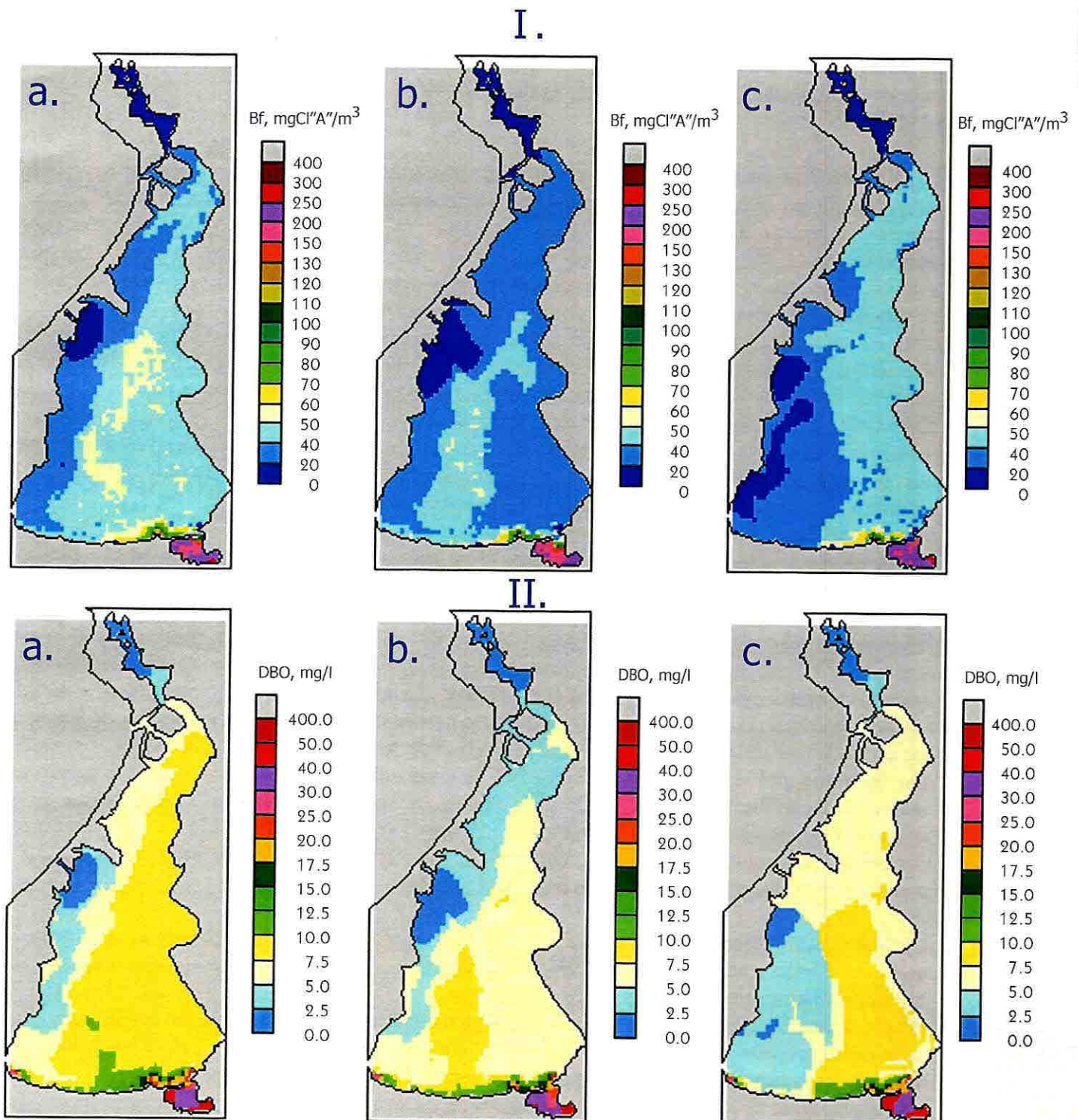


Fig. 9 Pronóstico de distribución de biomasa de fitoplancton (I) y DBO (II), obtenidas por el modelo bajo las condiciones de la época seca para el año 2025 en el caso de eliminación de 80 % de las descargas de las aguas negras y realización de diferentes variantes de las obras de ingeniería: a) alternativa 1, b) alternativa 2, c) alternativa 3.

en cuenta solamente las corrientes de marea, como fue hecho en el trabajo de Haskoning - Carinsa (1996).

En la Figura 8 se presentan los resultados de los cálculos de la distribución espacial de biomasa de fitoplancton y DBO, obtenidos para volúmenes actuales de desagüe de sustancias contaminantes, en el caso de la realización de las alternativas de ingeniería arriba señaladas. Sin la eliminación del 80% de los vertimientos de aguas servidas a la ciénaga se encuentra que la construcción de obras hidrotécnicas aunque mejoran la situación ecológica en la Ciénaga de Tesca, pero no la cambia en forma general.

El pronóstico de distribución de la clorofila "A", de la sustancia orgánica muerta y del nitrógeno amonio, obtenidos por el modelo con las condiciones del año 2025, con un retiro del 80 % del vertimiento de las fuentes y de la realización de los proyectos de ingeniería arriba estudiados, se presentan en la Figura 9.

El análisis de los resultados certifica que el efecto máximo de autodepurificación de las aguas debido al lavado hidrodinámico de la cuenca puede ser obtenido realizando las variantes 2 y 3. Con esto, el contenido de clorofila "A" en el año 2025 se reducirá en promedio hasta $30 \text{mgCl}^{\text{A}} \text{m}^{-3}$ (y más, debido a que se incrementa la relación $[\text{mgC}]/[\text{mgCl}^{\text{A}}]$ en las células del fitoplancton), de la

sustancia orgánica muerta hasta $7 \text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, las concentraciones de NH_4 es de menos de 0.1mgN l^{-1} .

Se consideraron tres variantes de construcción y funcionamiento del sistema "bocanas - dique direccional". Se recomienda para su realización la variante de la obra de dos canales (esclusas) de 100 m de ancho y 1 m de profundidad, en conjunto con el dique de dirección meridional, el comienzo del cual se localizaría entre los canales. El canal sur conecta el mar con la parte occidental de la ciénaga, el del norte con la parte oriental. El régimen de trabajo de los canales, es no dirigido en la sesión de los vientos alisios en la época seca (variante 2) y es dirigido (variante 3), durante la ausencia de vientos significativos en la época húmeda. La realización de este proyecto permite disminuir en el año 2025 el contenido de clorofila "A" en promedio hasta $30 \text{mgCl}^{\text{A}} \text{m}^{-3}$, de sustancia orgánica muerta hasta $7 \text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, la concentración de NH_4 sería menos de 0.1mgN l^{-1} .

CONCLUSIONES

Los experimentos numéricos con la versión 2-dimensional del modelo mostraron, que la dinámica de viento afecta en forma muy pronunciada 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.

Los pronósticos de los experimentos hasta el año 2025 mostraron, que sin las respectivas obras técnicas en la Ciénaga, su estado alcanzara niveles críticos, la biomasa de fitoplancton durante el periodo de pronóstico aumentará desde $110-130 \text{mgCl}^{\text{A}} \text{m}^{-3}$ hasta $150-200 \text{mgCl}^{\text{A}} \text{m}^{-3}$, la concentración de la materia orgánica muerta desde $20-25 \text{mg l}^{-1}$ hasta $30-40 \text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, el nitrógeno amoniacal - desde $0.4-0.6 \text{mgN l}^{-1}$ hasta $0.8-1.5 \text{mgN l}^{-1}$.

La eliminación del 80 % de aguas servidas de Cartagena que se vierten a la ciénaga, mejorará la calidad de las aguas de la misma en comparación tanto con el año 2025, como con la situación actual. La biomasa de fitoplancton disminuye hasta de $50-60 \text{mgCl}^{\text{A}} \text{m}^{-3}$, el contenido de la materia orgánica hasta de $10-11 \text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, el nitrógeno de amonio hasta de $0.1 - 0.2 \text{mgN l}^{-1}$.

Sin embargo, el contenido de la materia orgánica muerta quedará en un nivel suficientemente alto en comparación con las aguas del mar abierto ($10-11$ y $1.5 \text{mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, respectivamente). Todavía se conserva un alto nivel de la contaminación por los nutrientes y la materia orgánica en las partes sur y sur-occidental. El mejoramiento posterior de la calidad de las aguas de la Ciénaga

de Tesca puede ser obtenido a través de la realización de construcción de diferentes obras hidrotécnicas, con el objetivo de mejorar el lavado hidrodinámico del territorio de aguas con agua marina limpia.

Debido a que la variante 2 es lo más económico, se puede recomendar el uso del régimen de trabajo no dirigido de las esclusas (variante 2) durante el periodo seco del año, cuando se observan vientos fuertes y no hay intercambio de aguas naturales con el mar, el cual a estas condiciones da los mejores resultados, y en ausencia de vientos y en la época húmeda del año utilizar la variante 3.

Los cálculos mostraron que la construcción de obras hidrotécnicas no representa una alternativa de solución integral, sin el retiro del 80 % del vertimiento de aguas servidas que llegan a la ciénaga, pronosticado para el año 2025, debido a que da un efecto mucho menor.

BIBLIOGRAFÍA

• Aguas de Cartagena - ACUACAR. Informe preliminar sobre vertimientos de aguas servidas urbanas de la Ciudad de Cartagena a la Bahía de Cartagena y la Ciénaga de la Virgen. Sin publicar. Cartagena. 1996.

• Aguas de Cartagena - ACUACAR. 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.

• Haskoning-Carinsa. Bocana estabilizada en la Ciénaga de la Virgen: Diagnostico ambiental de alternativas. Cartagena, Colombia, 1996, 125 p.

• Hazen & Sawyer. EIA (resumen). Emisario Submarino de Cartagena. Banco Mundial - Acuar. Enero 1999.

• Instituto oceanográfico gubernamental - GOIN. Investigación de los procesos las salidas de desagüe al mar, 1983, 160 p. (en Ruso)

• Joseph J., Sendner H. *Uber die horizontale Diffusion in Meer.-Deutsch. Hydr.Z.*, Bd.11, N2, 1958, p. 49-77.

• Kjerfve, B. Tides of the Caribbean Sea, *Journal of Geophys. Res.*, Vol. 86, No. C5, 1981, p. 4243-4247.

• Lonin, S.A. Modelo Hidrodinámico del CIOH y Cálculo de Transparencia para la Bahía de Cartagena, *Boletín Científico CIOH*, No.18, 1997, p. 85-92.

• Sobey, R.J. Finite-difference schemes compared for wave-deformation characteristics in

mathematical modelling of two-dimensional long-wave propagation. *U.S. Army Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center Techn. Mem.*, 32, 1970, 29 p.

• Tuchkovenko, Yu. S., Castro, L. A. S. Un modelo de eutroficación para la Ciénaga de Tesca, *Boletín Científico CIOH*, No.19, Cartagena, Colombia, 1999.

