



ARTÍCULO

## Salinización de la Ciénaga de Juan Polo

### Salt increasing in the Juan Polo coastal lagoon

Fecha recepción: 2008-08-09 Fecha aceptación: 2008-09-11

Serguei Lonin, slonin@costa.net.co

Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

#### Resumen

La Ciénaga de Juan Polo es una laguna costera ubicada al norte de Cartagena de Indias, Colombia, comunicada con la Ciénaga de Tesca y el mar, anteriormente mediante una boca natural, pero desde el principio de este siglo, a través de una Bocana Estabilizada de marea, cuya función es renovar el agua contaminada del complejo lagunar. Controlándose casi exclusivamente por la marea, las zonas alejadas de la Bocana, especialmente la Ciénaga de Juan Polo, sufren el proceso de salinización durante la época seca, lo que daña el manglar y deteriora el ecosistema. En el presente artículo se estudia el proceso de salinización y sus factores principales por medio de la modelación hidrodinámica tridimensional y luego empleando el análisis analítico del balance de sal. Se encuentran tres escalas de tiempo, correspondientes a los tres procesos: la marea, la evaporación local y la difusión turbulenta de sal. El último proceso resulta ser el factor importante de estabilización del sistema en su estado actual. Se recomienda una alternativa de solución del problema de salinización mediante la apertura de una segunda bocana, restaurando un caño que funcionaba antes de los años 60 del siglo pasado.

**Palabras claves:** Laguna costera, difusión de sal, renovación del agua.

#### Abstract

*La Ciénaga de Juan Polo* is a coastal lagoon, located at the north of Cartagena de Indias, Colombia, connected with *La Ciénaga de Tesca* lagoon and the Caribbean, through a natural mouth in the past, but implementing tidal-regulated gates (*Bocana Estabilizada*) from the present century. The *Bocana's* function is the renewal of polluted lagoon waters. Being controlled almost exclusively by tides, some zones far from the *Bocana*, especially, *Ciénaga de Juan Polo*, suffer an increase in salinity during the dry season of year, together with mangrove mortality and ecosystem deterioration. The process of increase in salinity and its principal factors are studied in the present paper, applying 3D hydrodynamic modelling and analytical mathematical analysis of the salt budget. Three time scales have been found, corresponding on the three processes: tides, local evaporation and turbulent salt diffusion. The last one results to be important to stabilize the system in its actual state. An alternative is

recommended for the solution of the increase in salinity, with the opening of a second *Bocana*, re-establishing an existing channel which functioned before 1960's.

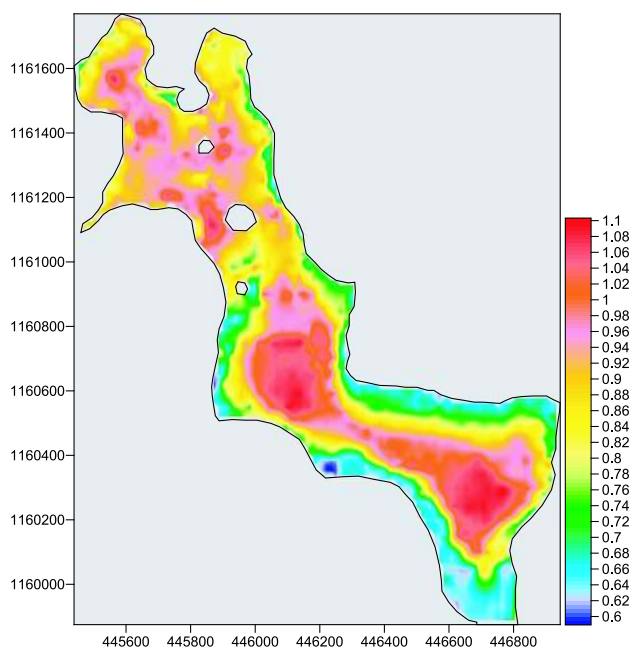
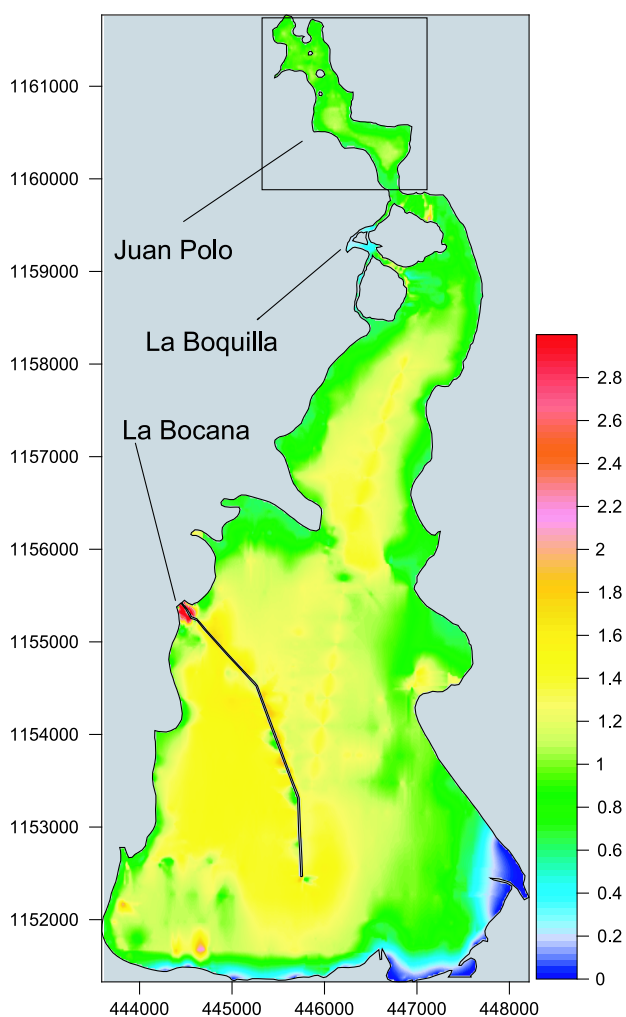
**Key words:** Coastal lagoon, salt diffusion, water renewal.

## Introducción

La Ciénaga de Juan Polo es una laguna costera (figura 1), ubicada al norte de la Ciénaga de Tesca (de La Virgen); las dos están separadas del mar por una barra de sedimentos de la deriva litoral. Las ciénagas tienen una comunicación restringida entre sí mediante unos caños angostos y someros. La profundidad característica de la Ciénaga de Tesca es de 1.5 m, mientras que la de Juan Polo es de 1 m. Los caños

tienen entre 60 y 90 cm de profundidad en la parte más profunda.

Antes de la construcción de la Bocana Estabilizada (figura 1) al final del siglo pasado, la Ciénaga de Tesca tuvo una comunicación estacional con el mar Caribe a través de una boca natural (La Boquilla), cuya apertura en la época húmeda del año dependió del balance hídrico del cuerpo lagunar: la escorrentía y precipitación sobre el cuerpo de aguas, más el aporte de aguas servidas de la ciudad de Cartagena superaban la evaporación desde el espejo del agua, provocando la rotura de la barrera arenosa y abriendo el canal de la Boquilla. Al contrario, durante la época seca del año, una fuerte deriva litoral y el balance hídrico negativo favorecieron el aislamiento de la ciénaga de la influencia del mar.



**Figura 1.** Batimetría (en m) de las dos ciénagas (izquierda) y de Juan Polo en detalle (derecha). Coordenadas de referencia: 10°26'30"N; 75°29'44"W. Aquí y adelante en los ejes se presentan las coordenadas planas UTM.

La Bocana Estabilizada fue construida con el fin de renovar las aguas de la Ciénaga de Tesca mediante un sistema hidráulico de compuertas, separadas por un dique direccional, mostrado en la figura 1. El agua entra y sale dependiendo de la fase de la marea; la compuerta sur se abre cuando la marea está en ascenso y se cierra en el descenso. La compuerta norte, funciona en el modo contrario, produciendo así un movimiento de las aguas alrededor del dique con una evacuación de las impurezas hacia el mar. Por supuesto, dichas obras controlan el balance de la ciénaga, dependiendo casi en absoluto del efecto de la marea, haciendo poco relevante el balance natural que existió antes de la obra. La boca de La Boquilla ya no se abre de manera natural y la parte norte de la Ciénaga de Tesca y, en especial, la Ciénaga de Juan Polo tienen un régimen limitado de recambio de sus aguas.

Esta circunstancia se demuestra en el presente trabajo con la aplicación de herramientas de modelación, conduce a un estancamiento de las aguas de Juan Polo, un aumento de su salinidad y mortandad del manglar, poco tolerable a altas concentraciones de sal. Las mediciones del laboratorio de Cardique (comunicación privada) realizadas en el mes de enero del año 2009 (la época seca del año) mostraron una elevada salinidad en la Ciénaga de Juan Polo con los valores superiores a 44.

Las mediciones realizadas por nosotros el día 22 de febrero del 2009 en el cuerpo de Juan Polo confirmaron altos valores de salinidad, entre 44 y 48, lo que fue el motivo de efectuar el presente estudio, cuyo objetivo fue analizar los procesos de salinización y mecanismos de equilibrio del balance de sal en estos cuerpos cenagosos, específicamente durante la época seca del año, cuando se presenta el déficit de aguas dulces en el sistema. Puesto que las observaciones visuales confirman la presencia de manglar seco dentro de la ciénaga, se requieren ciertas medidas de mitigación del proceso de mortandad de la vegetación y restauración de condiciones ambientales aptas para el funcionamiento del ecosistema del pasado.

Para poder proponer estas medidas, fue necesario aplicar un modelo hidrodinámico 3D, cuya breve descripción se encuentra en el siguiente apartado. Luego se presentan los resultados de modelación, que imitan la salinización del agua durante un período largo de corrida del modelo sin el ingreso de aguas

dulces, lo que corresponde a la época seca del año. En el apartado de Discusión se analiza analíticamente el comportamiento del sistema para determinar los procesos que forman el régimen de salinidad; se determina que el ingreso de aguas por la marea no regula el proceso de salinización, sino la importancia tiene la difusión turbulenta de sal. Por ser un proceso mucho más lento, eso conlleva a un incremento significativo de la salinidad. Finalmente, se presenta una alternativa viable de recuperación del sistema antiguo, mediante un canal que existió en la Ciénaga de Juan Polo antes de los años 60 del siglo pasado.

## Metodología

El modelo hidrodinámico empleado es un modelo 3D con la termodinámica completa [1]. Las ecuaciones gobernantes del modelo son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\alpha_0 \frac{\partial P}{\partial x} + fv + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_h \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\alpha_0 \frac{\partial P}{\partial y} - fu + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_h \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + F_p(S, T)], \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial R}{\partial z}, \quad (7)$$

donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  son componentes de corrientes en las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente;  $t$  – tiempo;  $f$  – parámetro de Coriolis;  $P$  – presión;  $g$  – gravedad;  $\rho$  – densidad del agua;  $\rho_0$  – volumen específico ( $\rho_0 = 1/\rho$ );  $A_h$  y  $A_z$  son coeficientes de turbulencia y  $D_h$ ,  $D_z$  – difusión turbulenta en la horizontal y vertical, respectivamente;  $T$  es temperatura y  $S$  es salinidad del agua;  $R$  – radiación solar penetrada a través de la superficie del mar (fuente interna de calor).

El sistema (1)-(7) requiere las condiciones de contorno. En la superficie del mar ( $z = 0$ ) se dan las condiciones dinámicas para las tensiones del viento ( $\tau_{sx}$ ,  $\tau_{sy}$ ), se calculan flujos de calor  $Q_T$  y de sal  $Q_S$  a través de los datos meteorológicos, se establece la condición cinemática para la frontera libre y la presión atmosférica  $P_a$ , es decir,

$$\begin{aligned} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) &= \rho A_v \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right); \\ D_v \left( \frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) &= \left( \frac{Q_T}{\rho C_p}, Q_S \right); \quad w = \frac{d\eta}{dt}; \quad P = P_{atm}, \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $\eta$  es nivel de mar,  $C_p$  capacidad específica de calor.

En el fondo ( $z = H$ ) se utiliza la parametrización de la capa de flujos constantes ( $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ ) o se aplica la condición de “no-deslizamiento” y los valores de los flujos de calor y de sal se suponen iguales a cero, es decir,

$$\begin{aligned} (\tau_{bx}, \tau_{by}) &= \rho A_v \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad \mathbf{o} \quad \mathbf{u} = \mathbf{v} = \mathbf{0}; \quad \mathbf{y} \\ D_v \left( \frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) &= (0, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

El flujo de calor  $Q_T$  en (8) se determina como la parte de pérdida en el balance superficial de calor, es decir,

$$Q_T = Q_L + Q_B + Q_E + Q_H, \quad (10)$$

donde  $Q_L$  – radiación de onda larga desde la atmósfera hacia el mar;  $Q_B$  – radiación negativa del “cuerpo negro” de la superficie del mar;  $Q_E$  – flujo de calor por evaporación (flujo latente de calor);  $Q_H$  – flujo turbulento de calor (flujo sensible).

Estos términos tienen sus respectivas expresiones dadas por:

$$Q_L = C_{SB} T_a^4 (1 - 0.26 \exp[-0.000777(273 - T_a)^2]),$$

donde  $C_{SB}$  – constante de Stefan-Boltzman;  $T_a$  – temperatura del aire ( $^{\circ}\text{K}$ );

$$Q_B = -0.97 C_{SB} T_0^4,$$

donde  $T_0$  – temperatura de superficie del agua;

$$Q_E = -0.00175 \rho_a L_v W_{10} (\rho_{10} - \rho_0),$$

donde  $\rho_a$  – densidad de aire;  $L_v$  – calor latente de vaporización;  $W_{10}$  – velocidad de viento en la altura estándar de 10 metros;  $\rho_{10}$  – humedad específica de aire correspondiente a la presión de vapor  $e_v$  en la altura de 10 metros;  $\rho_0$  – humedad específica en la superficie, correspondiente a la presión saturada de vapor del agua  $E_s$ . En esta fórmula  $\rho_0 = 0.622 e_v / [P_{atm} - (1 - 0.622)e_v]$ ; la presión de vapor se calcula a través de la siguiente expresión:

$$E_v = R_h E_s(T), \quad (11)$$

donde  $E_s(T) = 611 \cdot 10^{[7.5T - 273.16]/(T - 35.86)}$ ;  $R_h$  es humedad relativa del aire.

El flujo turbulento de calor  $Q_H$  se calcula como

$$Q_H = 0.00175 C_p W_{10} (T_{10} - T_0),$$

donde  $T_{10}$  y  $T_0$  –temperatura en el aire a 10 metros de altura y en la superficie del agua, respectivamente.

La divergencia del flujo de la radiación solar en la fórmula (7) se determina a través de la radiación  $Q_l$  absorbida en la superficie y la transparencia de agua  $D_{10}$  (profundidad hasta que alcance un 10 % de la radiación solar superficial):

$$R/z = (Q_l / C_p) [exp\{2.3z_d/D_{10}\} - exp\{2.3z_b/D_{10}\}] (z_b - z_a), \quad (12)$$

donde  $z_b$  y  $z_a$  son contornos (profundidad inferior y superior) de cada celda de cálculo en la vertical.

A su vez, el flujo  $Q_l$  de la radiación solar que penetra a través de la superficie del mar depende del flujo superficial  $Q_{ss}$  que llega bajo las condiciones de cielo despejado, albedo  $A_{lb}$  de la superficie y nubosidad total  $N_c$ :

$$Q_l = Q_{ss} (1 - A_{lb}) F(N_c),$$

donde  $Q_{ss} = C_{sol} \cos^2(\theta) / [0.1 + 1.085 \cos(\theta) + 10^5 \{ \cos(\theta) + 2.7 \} e^{-\theta}]$ ;  $C_{sol}$  – constante solar (1353 W/m<sup>2</sup>);  $\theta$  – ángulo de zenit, que se define como  $\cos(\theta) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\alpha)$ ;  $\phi$  – latitud geográfica;  $\delta$  – declinación ( $\delta = 23.44^\circ \cos(2\pi [172 - N_d]/365)$ );  $N_d$  – día de año;  $\alpha$  – ángulo de hora ( $\alpha = 2\pi [12 - \text{hora solar}]/24$ ).

La presión de vapor se calcula a través de (11); la función de nubosidad  $F(N_c)$  se define por una fórmula empírica, por ejemplo,

$$F(N_c) = 1 - 0.8N_c.$$

Flujo de sal  $Q_s$ , que participa en fórmula (8) y afecta el régimen de salinidad, es posible definir como la diferencia entre la tasa de evaporación  $Q_E/L_v$  y precipitación  $I$ , es decir,

$$Q_s = Q_E/L_v - I. \quad (13)$$

Para el caso de una frontera sólida se aplican las condiciones cinemáticas de flujo cuando, bajo la presencia de una pared, el flujo normal a esta pared se especifica igual a cero. En forma similar, para los flujos de calor y sal, la condición en la pared pre-establece no-penetración de estos flujos. Las fronteras líquidas se consideran como los canales abiertos. En el caso dado de la Bocana Estabilizada, el nivel del mar se define durante la marea entrante en la sección de las compuertas abiertas (y sólo cuando éstas están abiertas):

$$\eta = \eta_m(t), \quad (14a)$$

mientras que el flujo saliente se define por

$$\eta = \eta_m(t) + U_n / \sqrt{gH}, \quad (14b)$$

donde,  $\eta_m$  –el nivel del mar especificado en el tiempo;  $U_n$  –flujo normal de agua hacia la frontera.

Para la temperatura y salinidad en las fronteras, cuando el agua entra (velocidad de flujo hacia la normal externa  $U_n < 0$ ) se dan los perfiles  $T^*(z)$  y  $S^*(z)$  conocidos desde las mediciones, mientras que cuando  $U_n > 0$ , entonces se utilizan las condiciones de Orlandy-Zommerfeld:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = -U_n \frac{\partial T}{\partial n}; \quad \frac{\partial S^*}{\partial t} = -U_n \frac{\partial S}{\partial n}. \quad (15)$$

Las condiciones iniciales son

$$u = v = w = 0 \text{ para } t = 0 \text{ y } T(x, y, z, t = 0) = \text{Const}; S(x, y, z, t = 0) = \text{Const}. \quad (16)$$

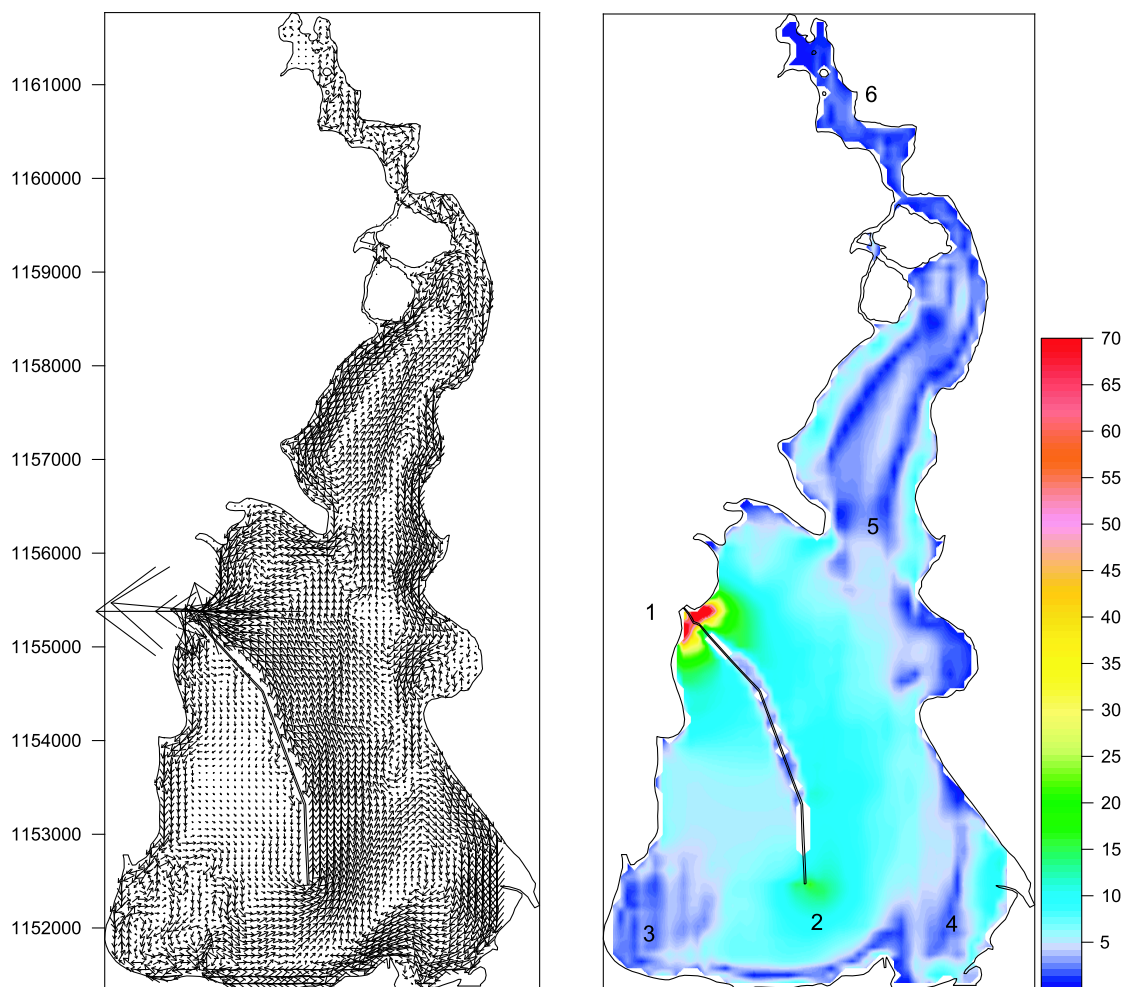
La salinidad en el mar, igual al valor inicial del campo de salinidad en las ciénagas fue establecida igual a 35, el valor medido en la salida de campo; la temperatura del agua inicial fue de 29°C.

El modelo se aplicó para el cuerpo de dos ciénagas con una malla de 75 metros de resolución espacial y 10 niveles en la vertical. Para el caso de la Ciénaga de Juan Polo la resolución del modelo fue de 14 metros, lo que permitió observar con alto nivel de detalle el comportamiento hidrodinámico de la ciénaga. Durante el proceso de calibración, fue estimada la circulación del agua en las ciénagas. La figura 2

muestra un ejemplo de la dinámica del agua. Se observa que las corrientes tienen mayor intensidad en la vecindad del canal de la Bocana (orden de 70 cm/s). También, en el extremo del dique direccional (punto 2 en la figura 2 derecha) las corrientes alcanzan unos 20 cm/s, mientras que las áreas a lo largo de la costa están estancadas. El nivel de estancamiento aumenta hacia el norte (puntos 5 y 6) llegando a las zonas con el movimiento débil de las aguas (inferior a 1-5 cm/s) dentro de la Ciénaga de Juan Polo. Se puede concluir que el efecto de la Bocana Estabilizada está reducido solamente dentro de la parte sur de la Ciénaga de Tesca y no alcanza para la parte norte. Para mayor detalle sobre la dinámica de la Ciénaga de Tesca sin y con los

efectos de la Bocana se puede referir a los trabajos [2-6]. En el trabajo [2] se presenta la dinámica de las aguas en su estado antiguo; en [3], en su estado actual del funcionamiento de la obra de la Bocana y en [4] se estudió el efecto de la última sobre la disminución de la contaminación en la parte sur de la Ciénaga. En los trabajos citados se consideró el impacto de la obra sobre el cuerpo de la Ciénaga de Tesca, pero no se enfocó en el posible efecto de salinización y estancamiento del agua en la Ciénaga de Juan Polo.

Con el fin de calibrar el modelo numérico, durante el levantamiento batimétrico (24 al 25 de septiembre de 2008) se midió el nivel de la ciénaga en el puente de



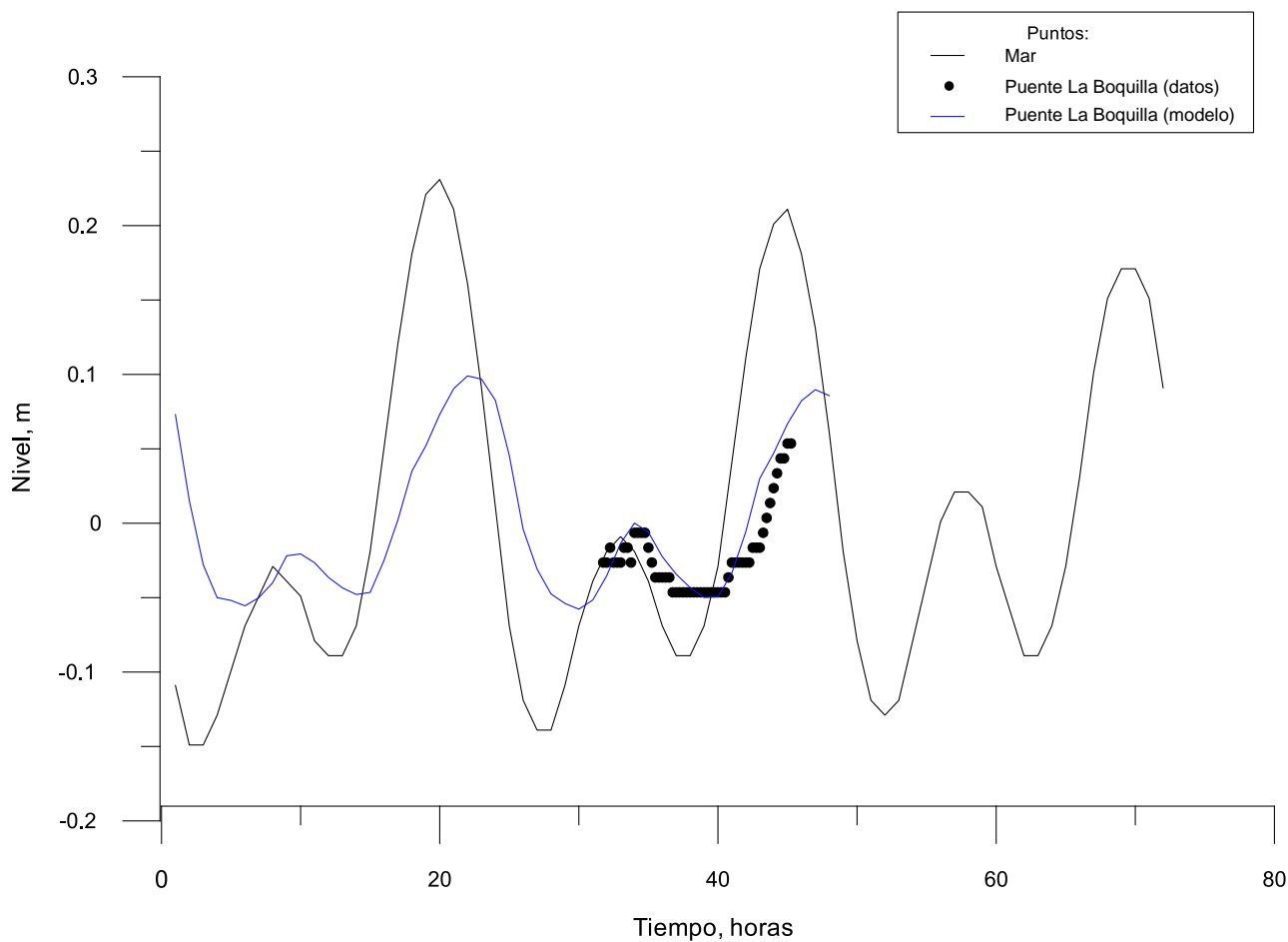
**Figura 2.** Ejemplo del campo de corrientes en la fase de la marea saliente. En el panel de la derecha: la velocidad de corrientes (en cm/s) correspondiente al campo de izquierda. Zonas: 1 – alta velocidad; 2 – el extremo del dique; 3, 4 y 5 – baja velocidad; 6 – aguas estancadas.



Juan Polo con el propósito de observar la oscilación de la marea lejos de la Bocana, comparando este comportamiento con el nivel del mar predicho para estas fechas para el puerto de Cartagena por el Servicio Hidrográfico francés (disponible desde la página [www.shom.fr](http://www.shom.fr)). La figura 3 muestra esta comparación luego de calibrar el modelo. En el proceso de calibración fueron escogidos los parámetros más sensibles del modelo (es decir, previamente se efectuó el estudio de sensibilidad del modelo): parámetro de rugosidad del fondo, coeficiente de arrastre en el fondo y lateral (en los canales) y el ancho de estos canales. El estudio demostró que el modelo responde de manera más sensible a la variación del ancho de los canales, lo que en nuestro caso significa el ancho eficiente de las

compuertas de la Bocana. El ancho eficiente fue seleccionado en el sentido de tal anchura de paso del agua (en comparación con la malla fija del modelo) en las compuertas que garantizan el comportamiento de la marea en el lugar de observaciones, se menciona al principio en la figura 3.

La comparación de mediciones del nivel y sus respectivos cálculos bajo las mismas condiciones del momento, muestra que la coincidencia entre el modelo y los datos es satisfactoria. También en la figura 3 se observa que existe un retardo de culminación de la marea de unas dos horas para el puente Juan Polo y que el rango de la marea en este sitio es de 10 cm, aproximadamente, cuando en el mar es del orden de 30-35 cm.



**Figura 3.** Marea en el mar para los días 24-25 de septiembre de 2008 en comparación con la marea calculada y medida en el puente Juan Polo. Se observa un retardo de culminación de la marea de 2 horas, aprox. y la reducción de su rango.

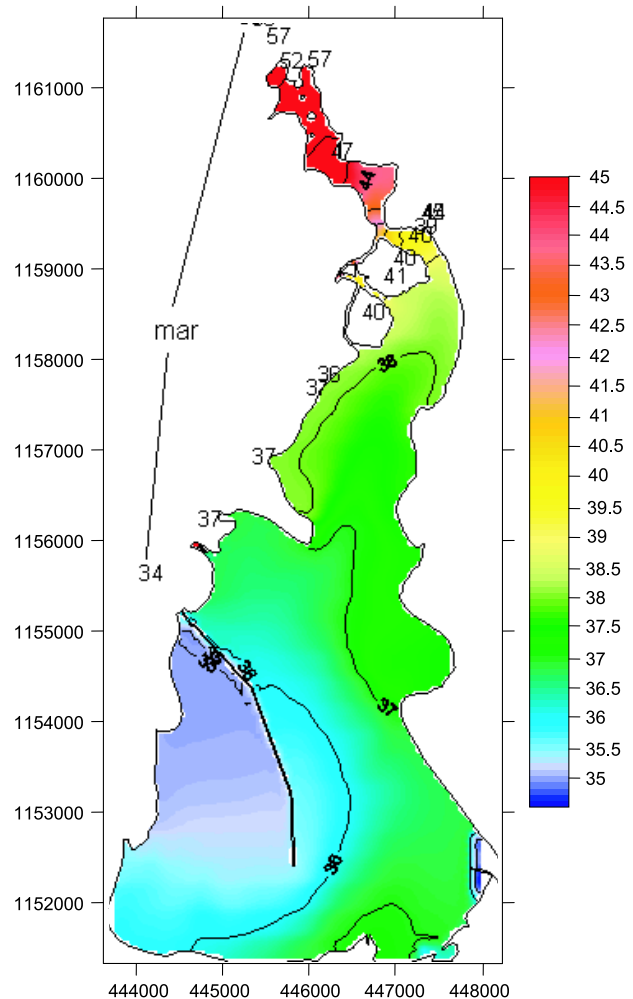
Para estimar el tiempo necesario de simulación, se estableció el valor característico del flujo latente de calor  $Q_E = -200 \text{ W/m}^2$ , la densidad del agua se asumió igual a  $10^3 \text{ kg/m}^3$  y con el calor latente de vaporización  $L_v = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ , la tasa de evaporación  $Q_E/L_v = -1 \text{ cm/día}$ , así que para llegar de la salinidad inicial de 35 a la esperada de 45, se requiere entre 25 y 30 días de simulación. Sin embargo, teniendo en cuenta que la ciénaga no está completamente aislada y existe una comunicación con el mar, se requiere mayor tiempo y esta estimación indica solamente el orden de magnitud del tiempo necesario. El tiempo de simulación para “salinizar” la Ciénaga Juan Polo hasta los valores mencionados se estimó entre 36 y 48 días, durante la época seca del año, con los vientos Alisios permanentes alrededor de 7-10 m/s de velocidad.

## Resultados

El resultado de la modelación de distribución de salinidad en las ciénagas después de 1152 horas (48 días) de simulación a partir del valor homogéneo de salinidad de 35, se demuestra en la figura 4. La figura 5 compara la tasa de acumulación de sal debido a la evaporación del agua y un acceso débil del agua a la Ciénaga de Tesca para distintas velocidades del viento. Además, en la figura 4 se hace una comparación entre la modelación y las mediciones de la salinidad a lo largo del borde occidental de las ciénagas y en el mar abierto.

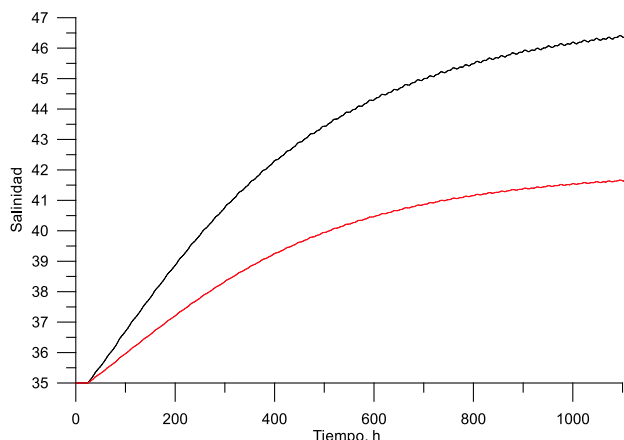
La primera figura muestra una buena correspondencia de la salinidad medida y calculada, aunque ciertos valores medidos estaban por encima de 50-57, en algunos casos se registraban hasta 70 (!). Estos casos no se demuestran en la figura, puesto que corresponden a unos “charcos” de agua, bien aislados por el manglar de la Ciénaga de Juan Polo. Anteriormente fue mencionado que las mediciones sobre el espejo de aguas abiertas registraban los valores entre 44 y 48, lo que coincide con la modelación en las mallas con la resolución entre 14 y 75 m. Por supuesto, en las zonas aisladas en la parte infra-litoral la salinidad aun es mayor, lo que presenta una amenaza a la vegetación de los terrenos de bajamar.

La figura 5 indica que la salinización es un proceso muy sensible a la velocidad del viento, reflejada en la expresión para el flujo  $Q_E$ . Otra observación indica que el efecto de la marea es poco pronunciado en forma de pequeñas ruidosas oscilaciones a lo largo de las curvas con el período de la marea. El efecto es tan despreciable que la imagen de distribución de salinidad, mostrada en la figura 4, prácticamente no se cambia entre las fases de ascenso y descenso de la marea. Una tercera observación se relaciona con el carácter de las curvas: el aumento de la salinidad es asintótico, la tasa de crecimiento de la concentración de sal disminuye con el tiempo. Este fenómeno se analiza en detalle en el próximo apartado.



**Figura 4.** Campo de salinidad calculado por el modelo (colores) y los datos de mediciones (cifras a lo largo de la orilla) durante el día 25 de marzo de 2009 (09:52-12:53).

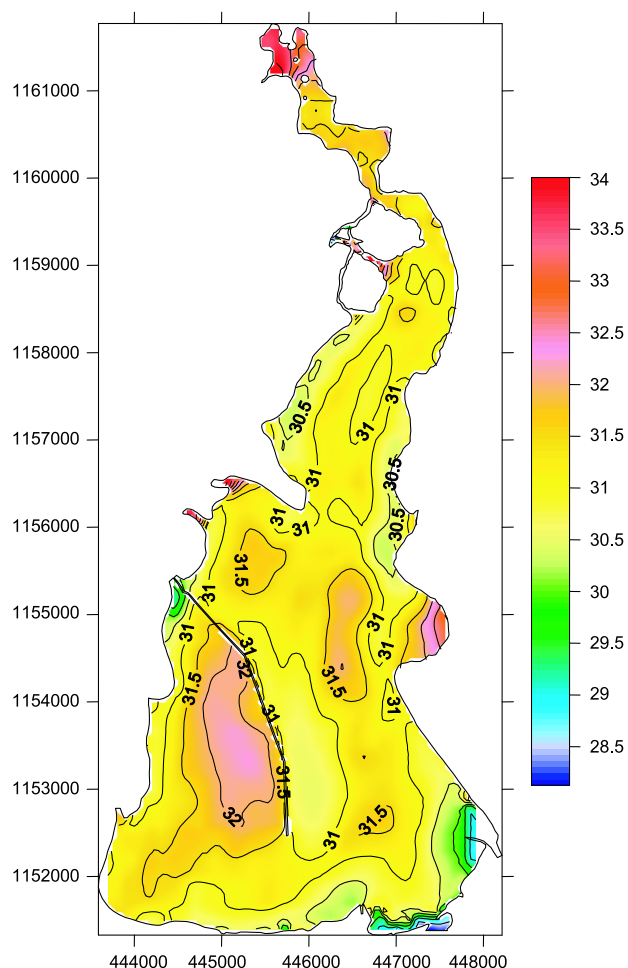




**Figura 5.** La salinización de la Ciénaga de Juan Polo en comparación entre los casos de vientos Alisios de 10 m/s (línea negra) versus los vientos 7 m/s (línea roja). El “ruido” poco apreciable a lo largo de las curvas indica el efecto de la marea. Ilustración para un punto en el norte de la ciénaga.

El proceso de aumento de salinidad de la Ciénaga Juan Polo fue examinado desde otra perspectiva también. Aunque está claro que el principal mecanismo es la evaporación del agua desde una cuenca semi-cerrada con débil intercambio de sus aguas, existe también otro fenómeno, relacionando con poca transparencia de las aguas (10 cm según las mediciones del laboratorio CARDIQUE y nuestras estimaciones): una turbidez elevada favorece a la acumulación de la energía solar en la capa superficial del agua, lo que incrementa la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire en la capa próxima de la atmósfera, aumentando los flujos sensible y latente de calor, por ende aumentando la evaporación. La figura 6 demuestra que en el norte de la Ciénaga de Juan Polo la temperatura del agua alcanza valores de 34°C, mientras que en promedio la ciénaga de Tesca (en el mismo instante!) posee 30-32°C y el agua del mar tiene 28-29°C.

Según nuestras estimaciones, este fenómeno puede causar un aumento doble de los flujos turbulentos de calor en la superficie del mar. Teniendo en cuenta que la dirección del flujo latente  $Q_E$  es siempre hacia la atmósfera y, durante el calentamiento diurno, el flujo sensible  $Q_H$  también tiene esta misma dirección, se puede considerar importante la participación de la transparencia del agua en el proceso de salinización de la Ciénaga de Juan Polo.



**Figura 6.** Campo de temperatura de la superficie del agua (en °C). Se observa un recalentamiento en las zonas someras y en el norte de Juan Polo.

## Discusión y conclusiones

Para el análisis de resultados, vamos a emplear los métodos analíticos. Con el fin de simplificar el sistema, consideremos únicamente las ecuaciones (4) y (6), integradas en la vertical y transversalmente a lo largo de la Ciénaga de Juan Polo. Dirigimos el eje  $x$  a lo largo de la ciénaga, considerándola como un canal del ancho uniforme con el extremo sur ( $x = 0$ ) conectado con la Ciénaga de Tesca y con el extremo norte ( $x = L$ ) actualmente impermeable. Para la profundidad total  $H(x, t)$  y el flujo a lo largo de la ciénaga  $U(x, t)$ , las ecuaciones del análisis son las siguientes:

$$\frac{\partial(SH)}{\partial t} + \frac{\partial(UHS)}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} = \frac{Q_E}{L_v \rho} \quad (18)$$

con  $Q_E < 0$ .

En el caso hipotético, sin el intercambio del agua ( $U = 0$ ),  $H \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{SQ_E}{L_v \rho} = 0$ , la solución de (17)-(18) es

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{Q_E}{HL_v \rho} t\right), \quad (19)$$

de donde se puede estimar la escala de tiempo ( $T_l$ ) de salinización local:  $T_l = \frac{HL_v \rho}{|Q_E|} = 2.5 \cdot 10^7 \text{ s} \approx 289 \text{ días}$  (asumiendo la profundidad  $H = 1 \text{ m}$ ).

Transformando (17) y (18),

$$H \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{SQ_E}{L_v \rho} + UH \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

se puede integrar (20) a lo largo de la ciénaga en los límites  $0 = x = L$  y, aplicando las siguientes condiciones de contorno:

$SU(x=0) = S_m U_m \cos(\omega t)$ ; [ $S_m$  y  $U_m$  son valores de salinidad y velocidad de flujo de marea en la frontera abierta ( $x=0$ );  $\omega$  es la frecuencia de la marea predominante];

$U(x=L) = 0$  (frontera impermeable en  $x=L$ ),

la ecuación para la salinidad promedio  $\bar{S}$  será la siguiente:

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \alpha \bar{S} = f, \quad (21)$$

donde  $\alpha = \frac{Q_E}{L_v \rho H} < 0$ ;  $f = \frac{U_m S_m}{L} \cos(\omega t) = f_0 \cos(\omega t)$  y, debido a que  $Q_E < 0$ , generalmente  $S_m \leq \bar{S}$

Nuevamente, si  $f_0 = 0$  (sin el intercambio de aguas) llegamos al resultado (19) y la salinidad tendría que

incrementar en el tiempo exponencialmente con la escala del tiempo  $T_1 = 1/|\alpha|$  aunque según la figura 5 esto no sucede de acuerdo con el modelo numérico.

La ecuación (21) con la condición inicial  $\bar{S}(t=0) = \bar{S}_0$  tiene la siguiente solución:

$$\bar{S} = \frac{f_0}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t) - \alpha \exp(-\alpha t)] + \bar{S}_0 \exp(-\alpha t) \quad (22)$$

Es evidente que la ecuación (22) tiene dos escalas de tiempo: una “lenta” ( $T_l$ ) y otra “rápida” ( $T_r$ ), relacionada con la marea,  $T_r = 2/\omega$ . Teniendo en cuenta que  $\omega \gg |\alpha|$ , podemos hacer ciertas simplificaciones en (22), con las cuales finalmente tenemos:

$$\bar{S} = \frac{U_m S_m}{L \omega} \sin(\omega t) + \left( \bar{S}_0 + \frac{|\alpha| U_m S_m}{L \omega^2} \right) \exp(-|\alpha| t) \quad (23)$$

La solución (23) no cumple con exactitud la condición inicial dada, pero asumiendo que  $O(S_0) = O(S_m)$  y  $\frac{|\alpha| U_m}{L \omega^2} \ll 1$ , sigue siendo  $\bar{S}(t=0) \approx \bar{S}_0$ .

El primer término en (23) se representa en la figura 5 en forma de un “ruido” oscilatorio insignificante, lo que implica que la marea (bajo las circunstancias actuales) no es un factor importante para la renovación de aguas de la Ciénaga de Juan Polo. El segundo término es similar a (19) con una pequeña corrección, implicando, igual como y antes, un incremento exponencial de la salinidad en los tiempos  $T_l$ .

Teniendo en cuenta los resultados de la modelación, los procesos considerados en esta discusión, entonces, no son suficientes para explicar el comportamiento temporal de la salinidad. La escala  $T_l$  es demasiado lenta y es concluyente que entre las dos escalas ( $T_l$  y  $T_r$ ) debe existir una tercera,  $T_3$ , supuestamente así:  $T_2 \ll T_3 \ll T_l$ .

Para encontrar esta tercera escala se requiere incluir en el análisis el fenómeno de difusión turbulenta de sal. La ecuación de advección-difusión (6), promedio en la vertical y a lo largo del eje transversal es

$$\frac{\partial(SH)}{\partial t} + \frac{\partial(UHS)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( HD_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) , \quad (24)$$

cuya solución, según [7], debe ser proporcional a  $\exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_s^2}\right)$ , donde  $\sigma_s^2 = 2D_h t$ .

La figura 7 demuestra la solución numérica del modelo y su aproximación mediante una curva de ajuste  $\tilde{S} = A \exp(B/t) + C$ , con los parámetros  $A = 8.36$ ,  $B = -306.9$  y  $C = 35.4$ . Se observa una aproximación satisfactoria a la solución numérica, lo que explica que el principal mecanismo para nivelar la evaporación en la ciénaga es la difusión turbulenta de sal en el sentido horizontal.

Para estimar la escala del proceso ( $T_3$ ), se requiere integrar la solución

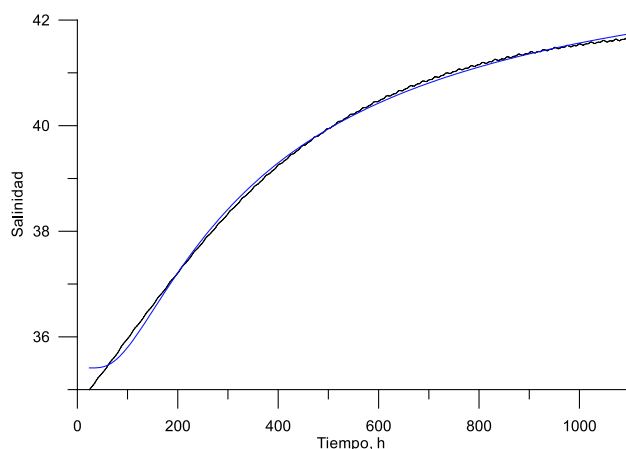
$$\bar{S} \propto \frac{1}{L} \int_0^L \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_s^2}\right) dx . \quad (25)$$

El último integral, suponiendo  $L$  es una función del tiempo  $\frac{\Gamma(1/2)}{2a^{1/2}}$ , donde es la función “gama” de Euler y  $a = [2D_h t]^{1/2}$ .

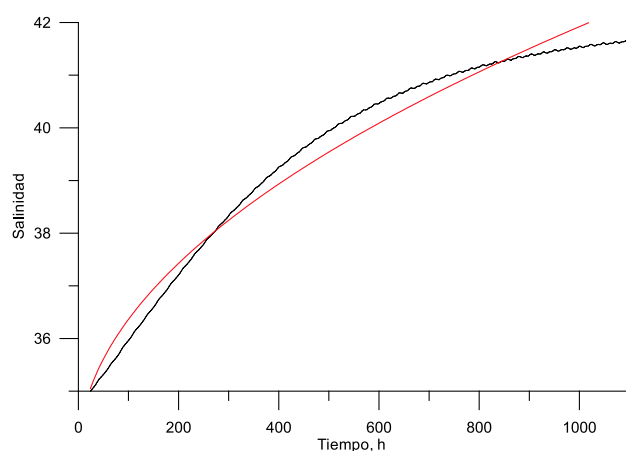
Esta solución se aproximó con la ecuación  $\tilde{S} = 33.8 + \sqrt{0.066t}$  (tiempo  $t$  en horas). La figura 8 muestra su comportamiento. Desde la última ecuación semi-empírica, se puede hallar que para duplicar el valor de salinidad se requiere un tiempo de  $35/0.066 \approx 22$  días, lo que resulta ser la escala de difusión espacial  $T_3$ . Teniendo en cuenta que el proceso de difusión no tiene ninguna dirección característica, la expresión sobre la “duplicación del valor de salinidad” equivale a la interpretación de que la difusión turbulenta hace mezclar (durante el tiempo  $T_3$ ) las masas del agua, sujetas a la salinización por la evaporación y a la renovación por la entrada de aguas menos saladas desde los caños que comunican con la Ciénaga de Tesca.

Ahora bien, los efectos de salinización, obviamente negativos desde el punto de vista del ecosistema de la Ciénaga de Juan Polo, manifestados en la mortandad de manglar, escaso nivel de oxígeno disuelto, alta

turbidez y desaparición de los peces, se pueden mitigar mediante las obras de ingeniería. Recordando que antes de los años 60, existió una comunicación natural entre la Ciénaga de Juan Polo y el mar, mediante un caño, mostrado en la figura 9, el reestablecer la comunicación mediante un canal semejante, podría resolver el problema.



**Figura 7.** La salinización de la Ciénaga de Juan Polo durante la época de vientos Alisios moderados (línea negra muestra el cálculo por el modelo) y su ajuste con la ley de difusión  $\tilde{S} = A \exp(B/t) + C$  (línea azul). La correlación de ajuste  $R^2 = 0.998$ .



**Figura 8.** La salinización de la Ciénaga de Juan Polo durante la época de vientos alisios moderados (línea negra muestra el cálculo por el modelo); línea roja es una proyección por el polinomio de ajuste  $\tilde{S} = 33.8 + \sqrt{0.066t}$ . La correlación de ajuste  $R^2 = 0.97$  es menor que en la figura 7, debido a que la función semi-empírica corresponde a la salinidad no puntual, promedio para toda la ciénaga.

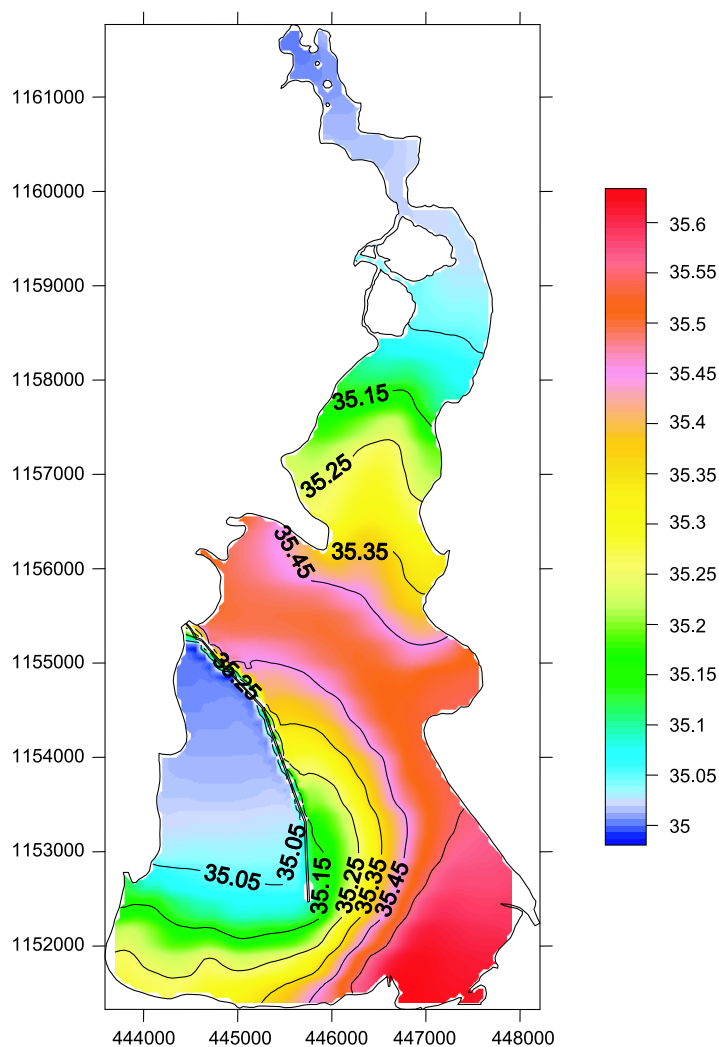


**Figura 9.** Cartografía Defense Mapping Agency (D.M.A.) de 1960 aproximadamente, en círculo rojo se encuentra el canal que en tal época comunicaba la Ciénaga de Juan Polo con el mar Caribe.

La figura 10 muestra el efecto de la apertura de la “segunda bocana” (con el flujo no regulado) en el norte de la Ciénaga de Juan Polo. El efecto de apertura de la segunda bocana produce un mejoramiento definitivo de la calidad de las aguas, con un régimen de la salinidad oscilando entre 35 y 36. Simultáneamente, profundizando la ciénaga, se aplicaría el concepto de “canales de la marea”, donde

la velocidad del flujo y renovación del agua incrementa órdenes de magnitud con respecto a lo actual.

Con la obra propuesta, el efecto de renovación de las aguas de Juan Polo va a ser mucho más eficiente, actuando en la escala del tiempo  $T_1$  y no la de  $T_3$ , lo que está sucediendo actualmente.



**Figura 10.** Campo de salinidad del agua con la obra de la segunda bocana.

## Bibliografía

[1] Hess KW. (1989). MECCA Programs Documentation. NESDIS, NOAA.

[2] Lonin S, Giraldo L. Circulación de las aguas en la Ciénaga de la Virgen (Tesca) y Formulación de un modelo de su calidad. Boletín Científico CIOH 1996; (17):65-72.

[3] Lonin S, Tuchkovenko Yu. Water quality modelling for the ecosystem of the Ciénaga de Tesca coastal lagoon. *Ecological Modelling*, 2001; 144 (2-3): 279-293.

[4] Tuchkovenko Yu, Lonin S, Calero L. Alternativas de solución

para el problema de eutroficación en la Ciénaga de Tesca. Boletín Científico CIOH 2001; (19): 23-37.

[5] Lonin S, Tuchkovenko Yu. Water quality model of ecosystem of Cienaga de Tesca lagoon. *Meteorology, Hydrology and Climatology* 1999; (39):274-290.

[6] Tuchkovenko Yu, Lonin S. Un modelo de eutroficación de la Ciénaga de Tesca con algunas aplicaciones prácticas. *Avances en Recursos Hidráulicos* 1999; (6):1-22.

[7] Monin A, Yaglom A. *Statistical Fluid Mechanics*. MIT Press, Cambridge 1971;1-696.