

Circulación de las Aguas en la Ciénaga de la Virgen (Tesca) y Formulación de un Modelo de su Calidad

SERGUEI LONIN Ph.D, Oceanólogo, LUIS GIRALDO, Ing. Oceanólogo

*División de Estudios Ambientales Marinos, Centro de Investigaciones Oceanográficas
e Hidrográficas, Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia*

RESUMEN

Para la formulación del modelo de calidad de aguas se emplea como base el utilizado por Lonin y Tuchkovenko, (1990) para el estudio del cuerpo de aguas del lago Sasyk, en Ucrania. El modelo obtenido está formado por un componente hidrodinámico y otro bioquímico, que en conjunto permiten simular la evolución de las aguas en términos de corrientes y de variación de las concentraciones de contaminantes. Se tienen en cuenta las cargas de las fuentes que puedan existir en los bordes de la zona estudiada.

Se presenta el esquema numérico empleado para la realización del modelo y los resultados de los experimentos numéricos efectuados para el acoplamiento del modelo hidrodinámico con un modelo de canales, necesario para estudiar el efecto del intercambio a través de La Boquilla, y para la simulación de las corrientes en la ciénaga durante la época de los vientos Alisios.

Se discute el desarrollo posterior del modelo, que deberá tener en cuenta la formación de un medio estratificado debido a la disminución de la salinidad durante la época húmeda.

ABSTRACT

The water quality model is based upon the one, used by Lonin and Tuchkovenko (1990) for the study of the Sasyk lake in Ucrania. Model has an hydrodynamical and a biochemical coupled components, which allow to simulate the evolution of the water currents and variations of the pollutant concentrations. The magnitud of the coastal sources is included in the analysis.

The numerical scheme, used for the model realization and the results of the numerical experiments to create the channel and hydrodynamical model, which is necessary in order to study the water changes through La Boquilla, and to simulate the currents during the trade winds, are introduced.

The future development of the model with the inclusion of the stratification, formed by the fresh water in the humid season, is discussed.

1. INTRODUCCION

El avance de los problemas de deterioro de los cuerpos de agua costeros, como consecuencia de la acción antropogénica, le han dado una relevancia definitiva al problema de su calidad en lo referente a las posibilidades de su uso, tanto por el hombre como por las comunidades faunísticas y florísticas que en ellos se desarrollan. Asimismo, es evidente la influencia negativa que un cuerpo de agua altamente contaminado ejerce sobre todo el medio que lo rodea, donde es difícil elaborar una escala de niveles en cuanto a grados de afección se refiere. Si para una comunidad animal cualquiera la degradación de su medio puede significar su muerte, en el caso del hombre en particular debe establecerse una lista de áreas afectadas, tales como la industria pesquera, la recreación, el transporte, la salud y muchas más.

La solución de los problemas de calidad de aguas en cuerpos costeros es un problema que debe enfocarse en forma integral. Uno de los mayores aportes en la búsqueda de tal solución se logra mediante el estudio de las características físicas del sistema de

interés y de las propiedades de las sustancias que están participando en el proceso de deterioro. En la actualidad, la aplicación de la modelación numérica en este sentido es una de las metodologías de más avanzada por el nivel práctico de los resultados que produce.

El principio de aplicación de tal metodología sigue una secuencia determinada, en la que el análisis inicial del movimiento de las aguas se efectúa mediante el uso de un modelo hidrodinámico. Sus resultados sobre el carácter de la circulación de las aguas será forzante de un bloque de transporte de sustancia independiente, donde el objeto de estudio es el componente químico de la zona de interés.

En el caso de la ciénaga de La Virgen, como en la mayoría de los cuerpos de agua costeros, además de las corrientes y la evolución del componente químico, se debe tener en cuenta el intercambio y posible renovación de las aguas a través de canales naturales en la mayoría de los casos. Una forma objetiva de solucionar este problema es la implementación de un modelo individual de circulación para el canal. En el documento se dan los conceptos

básicos de la formulación de los modelos de circulación y los resultados del estudio de las corrientes en la ciénaga, así como los principales conceptos teóricos del sistema de ecuaciones empleados. Finalmente, se efectúa una introducción al problema de la estratificación que en la zona forma el aumento del flujo de agua dulce durante la época húmeda.

2. MODELOS HIDRODINAMICO Y DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Como base del modelo de calidad de agua se tomó el de *Lonin y Tuchkovenko*, (1990a), utilizado para el estudio de las variaciones de los balances de agua y de sal en el lago Sasyk, ubicado en el sistema de esteros y lagunas del río Danubio, en el sector noroeste del mar Negro. El modelo está basado en la teoría de aguas someras con las ecuaciones aproximadas en dos dimensiones (*Voltzinger*, 1985), la cual es adecuada para el modelamiento de sistemas someros.

De tal manera que las ecuaciones del modelo son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_{bx} - \tau_{sx}}{\rho H} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_{by} - \tau_{sy}}{\rho H} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = P - E, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(C_i U)}{\partial x} + \frac{\partial(C_i V)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[HA_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[HA_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right] + F_i, \quad (4)$$

donde U y V - velocidades de las corrientes en los ejes x y y , respectivamente, promedias en la vertical; f - parámetro de Coriolis; t - tiempo; ρ - densidad del agua ($\rho = const$); H - profundidad total, es decir $H = h + \xi$; h - profundidad con agua en reposo; ξ - profundidad en caso de perturbación del nivel; $\tau_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ y $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ - vectores de la tensión tangencial del rozamiento del viento y del rozamiento en el fondo, respectivamente; P - tasa de precipitación; E - evaporación; C_i - concentración del componente i (es decir, de una sustancia química o biológica) en el modelo de calidad del agua; F_i - función de las fuentes y sumideros "locales", originados por la transformación bioquímica de los componentes del sistema estudiado.

La función F_i representa el componente bioquímico del problema, cuyos elementos están sometidos a una transformación ocasionada por los ciclos bioquímicos de las sustancias, así como por su redistribución espacio - temporal por la acción de los

factores abióticos del medio, en este caso la difusión turbulenta y las corrientes.

El bloque local del modelo de calidad de aguas puede ser presentado como un sistema de ecuaciones diferenciales, de la forma

$$\frac{dC_i}{dt} = F_i(C_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

para un número N de componentes bioquímicos.

La diferencia entre un modelo del tipo (5) en una versión 0-dimensional (modelo de una celda) o 0.5 - dimensional (modelo de múltiples celdas) y el propuesto en el presente trabajo, consiste que el sistema (5) se utiliza en cada nodo de la malla de diferencias finitas que se emplea para cálculo del problema hidrodinámico.

En la solución conjunta de los sistemas (1) - (4) y (5), es posible aplicar el método de disgregación, teniendo en cuenta que el único criterio que posee esta teoría, como problema teórico de los métodos numéricos, es el siguiente: Se parte de una posible formulación del problema de transporte, expresado por la ecuación (4), en la forma

$$BC_i + LC_i = F_i, \quad (6)$$

entonces, la disgregación puede llevarse a cabo tanto para los procesos físicos, como para las coordenadas (*Marchuk*, 1980), siempre y cuando se mantengan las propiedades conservativas de los operadores de la disgregación. Si, de acuerdo con (4), en la ecuación (6)

$$B = \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{y} \quad L = \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[HA_H \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[HA_H \frac{\partial}{\partial y} \right],$$

entonces la disgregación del operador L en K partes, es decir:

$$L = \sum_k L_k,$$

no deberá conducir a la aparición de fuentes falsas (en el sentido numérico) de energía, que no sean propias de la formulación original de (6). Esta condición de estabilidad del sistema de disgregación, parte del criterio de que puede ser adoptada la semideterminación de las partes disgregadas, la cual es:

$$(L_k C_i, C_i) \geq 0, \quad (7)$$

donde los paréntesis están señalando un producto escalar de dos vectores - funciones en el sentido de Lagrange en el espacio de Gilbert del sistema.

Dado que la parte derecha de la ecuación (6) está libre de limitaciones de este tipo, este sistema puede ser llevado a la forma

$$BC_i + LC_i = 0, \quad \frac{dC_i}{dt} = F_i. \quad (8)$$

En este trabajo no se tuvo en cuenta la segunda ecuación en el sistema (8), dado que ella representa un bloque independiente en el modelo de calidad de agua. Debido a que esta ecuación representa en sí un sistema de ecuaciones diferenciales, su solución puede encontrarse empleando métodos numéricos de gran exactitud, tales como el método de Runge - Kutta. De manera que, en adelante se estudia la parte hidrodinámica del problema, es decir, del sistema (1) - (3) con la primera ecuación del sistema (8).

Para la formulación del problema que se está siguiendo en este trabajo, es necesario dar condiciones de contorno en las orillas, en los canales que unen la Ciénaga de La Virgen con el mar y, finalmente, en los puntos de descarga de sustancias contaminantes, ubicados también en las orillas.

En las costas de la ciénaga la condición lógica que debe darse es el filtramiento y penetración nulos de la sustancia

$$\frac{\partial C_i}{\partial \bar{N}} = 0, \quad (\bar{V}\bar{N}) = 0, \quad (9)$$

donde \bar{N} - vector normal a la orilla; $\bar{V} = (U, V)$.

En los lugares de descarga de contaminante y de intercambio de agua con el mar es necesario determinar los flujos de agua y sustancia

$$(\bar{V}\bar{N}) = Q, \quad (10)$$

$$-(\bar{V}\bar{N})C_i + A_H \frac{\partial C_i}{\partial \bar{N}} = f_i,$$

donde Q y f_i - flujos de agua y sustancia, respectivamente, a través de una unidad de sección y de profundidad. Si, en el caso de las fuentes de contaminación, los valores de Q y f_i deben ser conocidos, en el caso de canales de comunicación de la ciénaga con el mar (ejemplo, La Boquilla), las condiciones de contorno dependen, tanto de los parámetros externos (variaciones del nivel del mar y concentraciones C_i en el extremo del canal más próximo al mar), como del régimen dinámico. Esto significa que en La Boquilla las condiciones "marinas" de contorno no pueden ser dadas directamente en el punto de unión con la ciénaga.

Este aspecto se analiza con mayor profundidad a medida que avanza la presente discusión, mientras tanto, se formula el problema general de las condiciones de contorno en los extremos del canal de La Boquilla (en adelante se denominará simplemente La Boquilla), como un problema de modelación acoplada del sistema mar - canal - ciénaga. Para esto, se considera que sobre la dinámica de la ciénaga la principal influencia es ejercida por las mareas. En otras palabras, las condiciones en el extremo marino de La Boquilla (occidental) serán determinadas por las variaciones periódicas del nivel del mar, mientras que las componentes C_i podrán ser iguales a cero o tomarán valores de fondo conocidos.

En el otro extremo de La Boquilla, en contacto con la Ciénaga de La Virgen, son calculadas las variaciones del nivel y las concentraciones C_i mediante la solución del problema hidrodinámico en la ciénaga. De tal manera que, para considerar el problema cerrado, las ecuaciones de la dinámica del canal de La Boquilla, a partir de las cuales se obtienen los valores de Q y f_i , son asimiladas en el contexto del problema de la calidad de las aguas de la Ciénaga de la Virgen.

De acuerdo con lo planteado en el trabajo de Lonin y Tuchkovenko (1995b), las ecuaciones para el submodelo de los canales presentan la forma

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = -g \frac{\partial \xi}{\partial s} - r|Q|Q,$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial s} + \frac{\partial(QH)}{\partial s} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Hf_i}{\partial s} + \frac{\partial(QHf_i)}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(A_H H \frac{\partial f_i}{\partial s} \right),$$

donde s - eje a lo largo del canal; r - coeficiente de rozamiento efectivo.

Y así, en cada paso en el tiempo, al tener dadas las condiciones externas en el extremo marino de La Boquilla, así como los valores del nivel del mar ξ , calculados a partir del modelo (1) - (3) y de las concentraciones C_i en el extremo oriental del canal (próximo a la ciénaga), con base en el sistema (11) se determinan las corrientes en el canal, así como las concentraciones de sustancia, que pasarán a ser condiciones de borde para el problema (1) - (4).

Resta señalar que, en calidad de condiciones iniciales se da un estado de reposo desde el punto de vista dinámico y una distribución inicial de las concentraciones C_i , conocidas, por ejemplo, a partir de mediciones.

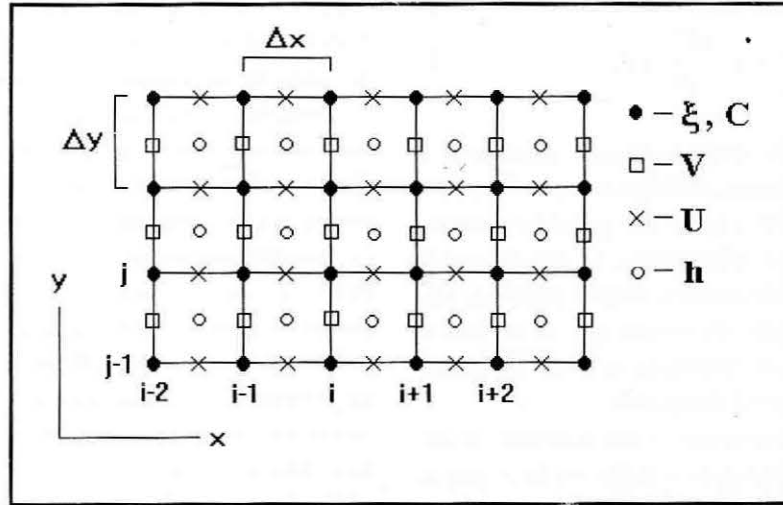


Fig. 1. Fragmento de la malla "C" de Arakawa de diferencias finitas con la ubicación de los nodos para el cálculo de las diferentes variables. Los nodos de borde se ubican en los puntos "h".

son asimiladas en el contexto del problema de la calidad de las aguas de la Ciénaga de la Virgen.

De acuerdo con lo planteado en el trabajo de Lonin y Tuchkovenko (1995b), las ecuaciones para el submodelo de los canales presentan la forma

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial s} - r|Q|Q,$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(QH)}{\partial s} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Hf_i}{\partial t} + \frac{\partial(QHf_i)}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(A_H H \frac{\partial f_i}{\partial s} \right),$$

donde s - eje a lo largo del canal; r - coeficiente de rozamiento efectivo.

Y así, en cada paso en el tiempo, al tener dadas las condiciones externas en el extremo marino de La Boquilla, así como los valores del nivel del mar ξ , calculados a partir del modelo (1) - (3) y de las concentraciones C_i en el extremo oriental del canal (próximo a la ciénaga), con base en el sistema (11) se determinan las corrientes en el canal, así como las concentraciones de sustancia, que pasarán a ser condiciones de borde para el problema (1) - (4).

Resta señalar que, en calidad de condiciones iniciales se da un estado de reposo desde el punto de vista dinámico y una distribución inicial de las concentraciones C_i , conocidas, por ejemplo, a partir de mediciones.

3. REALIZACION NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DEL MODELO

La parte hidrodinámica del problema (1) - (4) se realiza con base en el método de diferencias finitas de direcciones variables, de acuerdo con el esquema de Lindertse y Liu, (1978). La solución se divide en dos intervalos de tiempo $[0, n+1/2]$ y $[n+1/2, n+1]$ con paso en el tiempo de $\Delta t/2$, de la siguiente forma:

En el momento n

$$\delta_t U - f\bar{V} + U_x \bar{\delta}_x U_x^- + \bar{V} \delta_y U_y^- + g \bar{\delta}_x \xi + \frac{\tau_{bx} - \tau_{sx}}{\rho(\bar{h}^x + \xi^x)} = 0, \quad (12)$$

para los nodos $i + 1/2, j$ de la malla de diferencias finitas que se observa en la Figura 1.

$$\delta_{+1/2t} \xi + \delta_x \left[(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x) U_+ \right] + \delta_y \left[(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y) V_+ \right] = 0, \quad (12'')$$

para los nodos i, j .

En el momento $[n+1/2, n+1]$

$$\delta_t V + f\bar{U} + \bar{U} \delta_x V_x^- + V \delta_y V_y^- + g \bar{\delta}_y \xi + \frac{\tau_{by} - \tau_{sy}}{\rho(\bar{h}^y + \xi^y)} = 0, \quad (13)$$

para los nodos $i, j+1/2$

$$\delta_{+1/2t} \xi + \delta_x \left[(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x) U \right] + \delta_y \left[(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y) V_+ \right] = 0, \quad (13'')$$

para los nodos i, j .

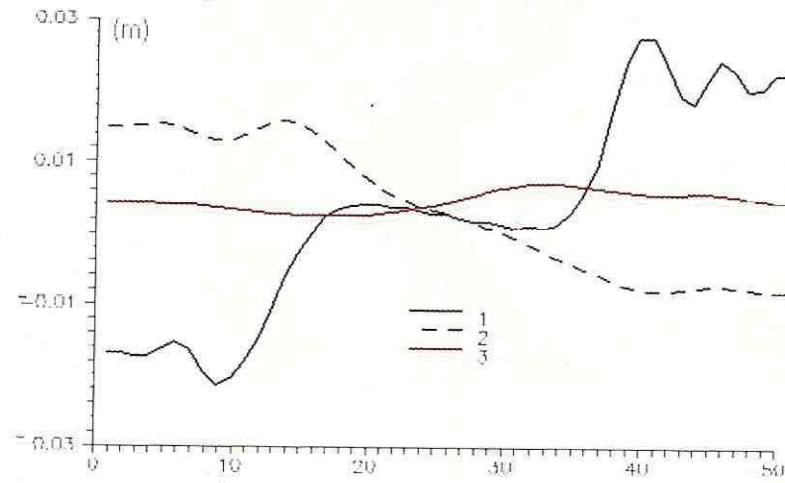


Fig. 2. Distribución del aumento del nivel a lo largo del canal de comunicación con el mar para tres momentos del tiempo: 1) 1000 seg., 2) 5000 seg., 3) 9000 seg. Paso espacial de 50 metros y en el tiempo 1 segundo.

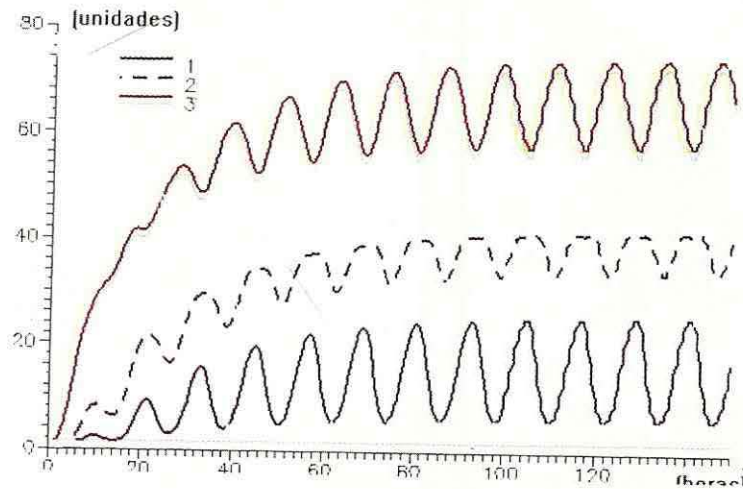


Fig. 3. Variación temporal de la concentración en el canal en los siguientes puntos: 1) del lado del mar, 2) en el centro, 3) del lado de la Ciénaga para la onda de marea M_2 . Del lado de la ciénaga se dieron concentraciones iniciales de 100 unidades y en el mar 0.

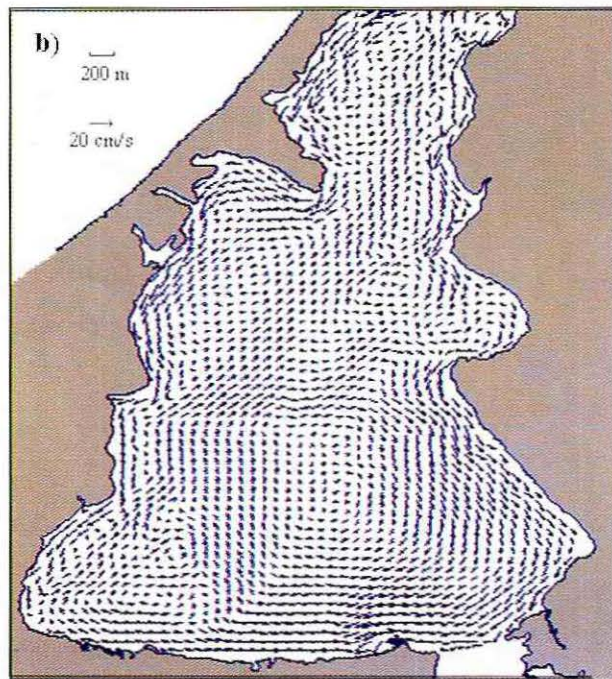
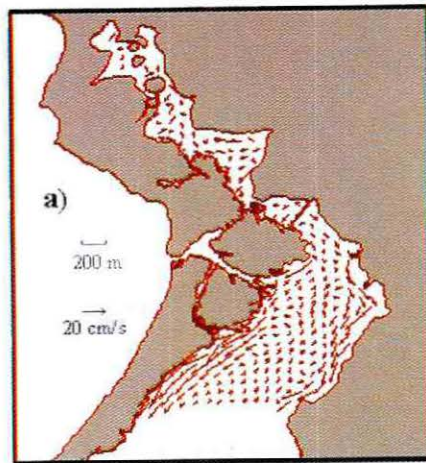


Fig. 4. Corrientes estacionarias generadas por mareas y vientos alisios para los sectores norte a) y sur b) de la Ciénaga.

Los resultados obtenidos en la primera parte de los trabajos, presentados en las Figuras 2 y 3, demuestran la importancia de incluir un modelo de canales, dada la necesidad de considerar en los cálculos la renovación de las aguas de la Ciénaga por intercambio con el mar. Con base en el modelo (11), dando las respectivas condiciones de contorno, se efectuaron experimentos numéricos sobre la distribución de una sustancia contaminante, de carácter conservativo, a lo largo de La Boquilla.

En la Figura 2 se presenta la variación del nivel del mar a lo largo del eje de La Boquilla en tres momentos del tiempo. Esta Figura demuestra el comportamiento del sistema luego de la aparición de una onda en uno de los extremos del canal. Se puede señalar que, en un período de 2 - 3 horas, luego de la variación del nivel del mar, ocurre un acomodamiento del sistema a la perturbación originada. El período de 2 - 3 horas es bastante cercano al característico para la acción de la marea (en términos de fase). Es decir, el transporte de sustancia contaminante a lo largo del canal está definido, en gran medida, por la fase de la marea, por lo que no es de esperarse una distribución uniforme de las concentraciones a lo largo del eje del mismo.

Para apoyar esta afirmación basta recordar que en el mar las concentraciones disminuyen, alcanzando las normas mínimas preestablecidas, en forma rápida, debido al gran volumen de agua disponible para el mezclamiento, mientras que si la fuente de contaminación se encuentra del lado de la ciénaga, un intervalo de tiempo equivalente a una fase de marea no es suficiente para ese mezclamiento, debido a que el proceso de transporte a lo largo del eje de La Boquilla es mucho más lento que la escala temporal característica para los procesos de mezcla en el mar.

En la Figura 3 se presentan los resultados de los cálculos de la variación temporal de las concentraciones en el canal bajo la acción externa de la onda M_2 y condiciones de viento en calma. Para esto se consideró que en el momento inicial, tanto en La Boquilla como en el mar, la concentración de sustancia fue igual a cero, mientras que en la ciénaga de La Virgen fue de 100 unidades. Se observó que con el avance del tiempo, el mezclamiento de sustancia no ocurre en forma uniforme, es decir, en un intervalo de 5 - 6 días, las concentraciones en los puntos analizados en el canal se diferencian en, aproximadamente, 50 - 60 unidades.

El segundo grupo de experimentos presentó resultados sobre el movimiento de las aguas en la ciénaga de La Virgen. Se tomaron como principales factores de forzamiento las mareas, que actúan a través de La Boquilla y el viento.

En la Figura 4 se presentan las corrientes en la Ciénaga bajo la acción de los vientos alisios. Las velocidades máximas obtenidas fueron de 20 cm/s en la parte somera costera y en la zona del canal. El sistema de circulación en la parte norte resultó bastante débil, mientras que en el sur se observan varios sistemas generados por las variaciones de la topografía submarina.

Cabe resaltar la dirección en contra del viento en la parte central de la Ciénaga, además de la formación de vórtices de circulación en el mismo sector, debido a la influencia de las variaciones de la profundidad. En las costas, como se describiera anteriormente, las corrientes se intensifican en sentido sur.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha formulado el modelo y los principales conceptos empleados para el estudio del transporte de contaminantes, mediante el acoplamiento de un modelo para la ciénaga y otro para La Boquilla. Como principal conclusión se extrae la necesidad de considerar las variaciones temporales de las concentraciones de sustancias contaminantes a lo largo del canal de comunicación con el mar. Así, disponiendo de información sobre el contenido de contaminante en el mar y de las fuentes en el interior de la Ciénaga, es posible plantear en forma correcta el problema sobre el cálculo del transporte y transformación de sustancias, con base en un modelo acoplado hidrodinámico y bioquímico.

Se puede demostrar que el sistema de la Ciénaga tiene dos forzantes principales del movimiento de sus aguas, como son las mareas y el viento. El carácter de la circulación en la ciénaga, con profundidades del orden de un metro, presenta una distribución prácticamente uniforme en la vertical. Sin embargo, no debe dejarse de tenerse presente, que precipitaciones significativas sobre el área pueden provocar la formación de una estratificación en dos capas, debido a los efectos de la boyancia. La capa dulce superficial puede tener una concentración de contaminantes diferente a la inferior. En la componente dinámica del problema, dado que esta capa superficial es muy delgada, su movimiento resulta prácticamente simultáneo con el de la capa ubicada debajo. Desde el punto de vista hidroquímico, es posible que sea necesario tener en cuenta la formación periódica de tales capas dulces. Por tal razón, debemos llamar la atención sobre el hecho de que el agua dulce puede llegar a la ciénaga no sólo en forma directa por las lluvias, sino también por las escorrentías a través de sus costas. En lo referente a la descripción matemática, la formación de dos capas puede desarrollarse en forma análoga al proceso de *entrainment* (participación de la termoclina del océano en el mezclamiento).

La siguiente etapa del trabajo consiste en el acoplamiento del modelo hidrodinámico con el bioquímico.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con el apoyo y co-financiación de Colciencias dentro del Proyecto: "Modelación Numérica de la Circulación Costera y su Aplicación al Estudio de los Procesos de Transporte de Sustancias Contaminantes en el Litoral Caribe Colombiano" (Cod. 0140-09-347-95).

BIBLIOGRAFIA

Lonin, S.A., y Y.S. Tuchkovenko, "Water Exchange between the liman of Sasyk and the Black Sea". *Water Resources*, vol. 22, No. 4, pp. 470 - 476, 1995a.

Lonin, S.A., y Y.S., Tuchkovenko, "Estimación de la Influencia de las Cargas de Complejos Civiles, en la Contaminación del Estero "Sukhoy". En: "*Análisis de la Zona Costera de la Cuenca de los Mares Negro y de Azov*". MGI-Sebastopol, pp. 141 -146, 1995b.

Marchuk, G.I., "*Methods of Computational Mathematics*". Moscow. Nauka. 1980.

Voltzinger, N.E., "*Long waves on shallow water*", Leningrad. Gidrometeoizdat, 1985.

Leendertse J.J., y S. Liu., "Multidimensional Numerical Modeling of Estuaries and Coastal Seas". *Adv. Hydrosci.* 11, pp., 95 - 164, 1978.

S. Lonin, Giraldo L., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982, Tel +57-56-694465, Fax 694390, E-mail: cioh@sirius.enap.edu.co