

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA CON APOYO SATELITAL DE LA CIRCULACIÓN EN LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Corral M. \*, Pozzi C. \*, Plencovich G. \*, Hillman G. \*, Pagot M. \*, Rodríguez A. \*, Oroná C. \*

\* Inst. Sup. de Rec. Hídricos y Laboratorio de Hidráulica  
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina  
Dirección: Av. Hipólito Irigoyen 162, CP: 5000. Córdoba, Argentina.  
Teléfono (Fax): 54 351 433-4446. E-mail: mcorral@com.uncor.edu

**Key words:** hidrodinámica, Mar Chiquita, imágenes satelitales.

**Abstract.** *El sistema hidrológico constituido por la Laguna de Mar Chiquita (6000 km<sup>2</sup>) y los Bañados del Río Dulce constituyen el más complejo y mayor sistema cerrado de lago salado de América del Sur. Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los factores meteorológicos como el viento y en menor medida los fenómenos fluviales, a través del régimen de crecidas. Debido a sus características geométricas (120 Km en dirección E-O y 100 Km en dirección N-S, con una profundidad media de 8 m), la acción del viento puede llegar a ser dominante en la circulación y el intercambio de masas de agua. En este trabajo se presentan los resultados de la circulación obtenidos por simulación tridimensional con el modelo COHERENS y bidimensional integrado en la dirección vertical con RMA2. Estos patrones de circulación se han contrastado cualitativamente con los observados en imágenes satelitales.*

## 1 INTRODUCCIÓN

La laguna de Mar Chiquita o Mar de Ansenusa (Figura 1, der.), es el sistema endorreico más importante de la República Argentina con una extensión de aproximadamente 6000 km<sup>2</sup>. El sistema hidrológico constituido por la Laguna de Mar Chiquita y los Bañados del Río Dulce constituyen el más complejo y mayor sistema cerrado de lago salado de América del Sur, declarado “humedal de importancia internacional” por la convención RAMSAR debido a su gran biodiversidad ecológica<sup>11</sup>. Sin embargo a pesar de su importancia, su grado de estudio o nivel de conocimiento es muy inferior al compararlo a la Laguna de los Patos<sup>22</sup>.

La profundidad de la Laguna de Mar Chiquita (alrededor de 8 m) tiene marcadas variaciones, dependiendo fundamentalmente del caudal del río Dulce y de los demás tributarios en menor proporción (Ríos Suquía y Xanaes), como así también de los procesos de precipitación y evaporación en el espejo de agua<sup>11, 21</sup>.

Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los fenómenos fluviales, a través del régimen de crecidas y los factores meteorológicos como el viento. Debido a la geometría de la laguna (120 Km en dirección E-O y 100 Km en dirección N-S, con una profundidad media de 8 m) la acción del viento puede llegar a ser dominante en la circulación y el intercambio de masas de agua.

Los vientos predominantes son del Norte (16,4%) seguidos por la dirección Sudeste (16,0%), con intensidades observadas de hasta 70 km/h que generan una sobreelevación (setup) cercana a 1 m (UNC, 2003). El viento tiene una influencia notable en las variaciones de nivel de la laguna, haciendo descender la cota en las costas de Miramar para vientos del N, NE o NO, siendo frecuentes oscilaciones (wind setup o marea meteorológica) de medio metro, de acuerdo a los trabajos más recientes<sup>27</sup>.

La calidad del agua en este sistema merece especial interés debido a su importancia como recurso ambiental y económico, dado que las actividades que sustentan la región son principalmente la pesca y el turismo. Sus características hidroquímicas presentan importantes variaciones espaciales y temporales<sup>12, 4, 17, 22</sup>. Las variables ambientales presentes en la zona afectan la circulación en esta región condicionando los requerimientos de la calidad del agua necesarios para el desarrollo de las actividades típicas de la región<sup>26</sup>.

El objetivo es representar la circulación debido a la acción hidrodinámica del viento, particularmente para vientos típicos de la región, con el apoyo de simulación numérica. Para la simulación numérica se ha utilizado el modelo tridimensional COHERENS<sup>15</sup> y el bidimensional integrado en vertical RMA2<sup>28</sup>. Los resultados se han contrastado cualitativamente con los observados en imágenes satelitales.

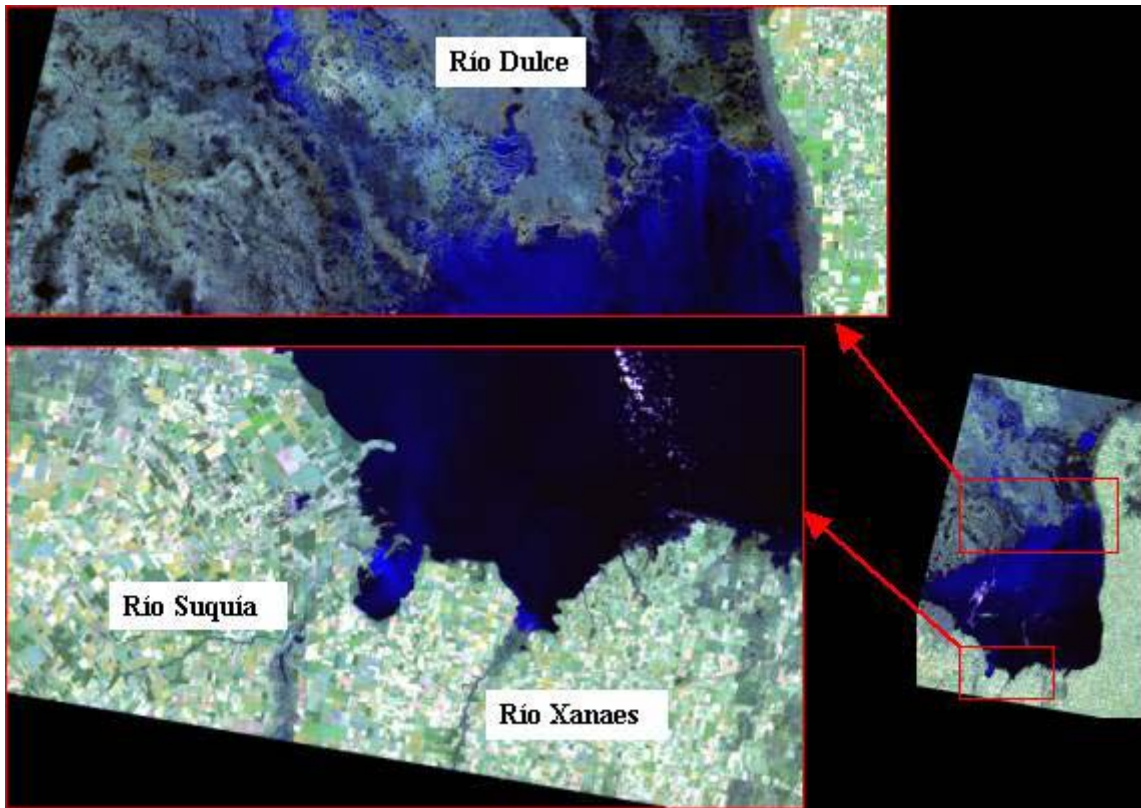


Figura 1: Laguna Mar Chiquita (derecha) y tributarios principales (izquierda)

## 2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada ha combinado simulación numérica con el modelo tridimensional COHERENS y bidimensional integrado en vertical RMA2. Además la selección y el análisis de imágenes satelitales consideradas claves para visualizar patrones de circulación.

### 2.1 Modelo 3D COHERENS

COHERENS es un modelo numérico tridimensional para costas y plataformas marinas. El modelo se compone de un módulo hidrodinámico, que se puede acoplar al módulo biológico y de contaminación para resolver procesos estacionales y de mesoescala. El código fuente ha sido desarrollado en el período 1990-1998 por un grupo multinacional como parte del proyecto MAST de la Unión Europea.

Durante las últimas décadas una serie de modelos tridimensionales para costas y plataformas han sido desarrollados por diversas instituciones de investigación<sup>19, 9, 16, 2, 3</sup>. Entre las principales ventajas del modelo COHERENS se destaca que utiliza la técnica “mode-splitting” para resolver la ecuación de momentum 2-D y 3-D como en POM model. Además se dispone de diversos esquemas para la turbulencia que varían desde simples expresiones algebraicas de una o dos ecuaciones de energía turbulenta<sup>18</sup> hasta modelos  $k-\epsilon$ <sup>15</sup>.

El modelo COHERENS ha sido aplicado por ejemplo en nuestro país para el estudio de la intrusión de la cuña salina en el Río de La Plata<sup>8</sup>.

## 2.2 Modelo 2D RMA2

RMA2 es modelo numérico hidrodinámico bidimensional en elementos finitos promediado en la dirección vertical.

El programa original fue desarrollado por Norton, King y Orlob en 1973, del Water Resources Engineers, del Cuerpo de Ingenieros, y terminado en 1973. Desarrollos posteriores, particularmente en la opción “marsh porosity”, fueron llevados adelante por King y Roig en la Universidad de California, Davis. Mejoras subsecuentes fueron realizadas por King y Norton, de Resource Management Associates (RMA), y el Laboratorio de Hidráulica de la Waterways Experiment Station (WES), culminando en la versión actual del sistema<sup>28</sup>.

Este modelo calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales de la velocidad para flujo subcrítico en campos bidimensionales de flujo. RMA2 calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier–Stokes bajo la forma de Reynolds para flujos turbulentos. Las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino. Se pueden analizar problemas tanto en flujo permanente como impermanente.

Las ecuaciones hidrodinámicas son resueltas por el método de los elementos finitos utilizando el método de Galerkin de residuos ponderados, utilizando funciones de forma cuadráticas para la velocidad y lineales para la profundidad. La integración espacial se realiza por integración Gaussiana. Las derivadas temporales son reemplazadas por una aproximación no lineal en diferencias finitas.

La solución es completamente implícita y el conjunto de ecuaciones simultáneas se resuelve por la iteración no lineal de Newton – Raphson. El código ejecuta la solución por medio de un algoritmo de solución de tipo frontal, que resuelve la matriz por partes, acoplando a la parte en cuestión la resuelta anteriormente.

## 2.3 Análisis de imágenes satelitales

A través del convenio entre la C.O.N.A.E. (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) y la U.N.C. se obtuvieron 30 imágenes LandSat 7 y 5 de los años 2000, 2001, 2002 y 2003.

Los datos meteorológicos, particularmente los de vientos, que han sido suministrados por la estación Davis ubicada en Miramar se comenzaron a registrar en el año 2001, pero previamente se registraron con frecuencia diaria con anemómetro manual.

En primera instancia se analizaron las fechas que coincidían con el registro de viento. De éstas se seleccionó las más representativas para distintos escenarios de viento en los días previos al paso del satélite, es decir en donde se visualizaba patrones de circulación más contrastados.

De esta selección surgieron para el análisis las imágenes de los días 13 de noviembre de 2002 y 24 de mayo de 2005.

Utilizando un software de procesamiento de imágenes se combinaron los colores primarios (rojo, verde y azul) con las diferentes bandas del satélite logrando una mejor observación de

los patrones de circulación en la laguna.

Es importante mencionar que las imágenes satelitales muestran un instante y sólo se puede interpretar cualitativamente el patrón de circulación a través de bandas y valores de reflectividad, pero condicionado a los factores meteorológicos actuantes. Las flechas que se muestran en todas las figuras de este trabajo representan la dirección en que se desplaza la masa de agua en la laguna.

Se reitera que para este trabajo se han analizado las imágenes en bandas 3-2-1 de los días 13 de abril de 2000 y 24 de mayo de 2003.

### 3 SUPOSICIONES

#### 3.1 Generales

Se ha utilizado como base para las modelaciones la batimetría de la laguna actualizada con imágenes satelitales<sup>24</sup>. Como se puede observar las mayores profundidades de este cuerpo de agua endorreico se localizan en la región Centro - Sur, luego hacia el Norte y el Noreste se extiende una planicie de pequeña pendiente que abarca aproximadamente el 50% de la laguna actual.

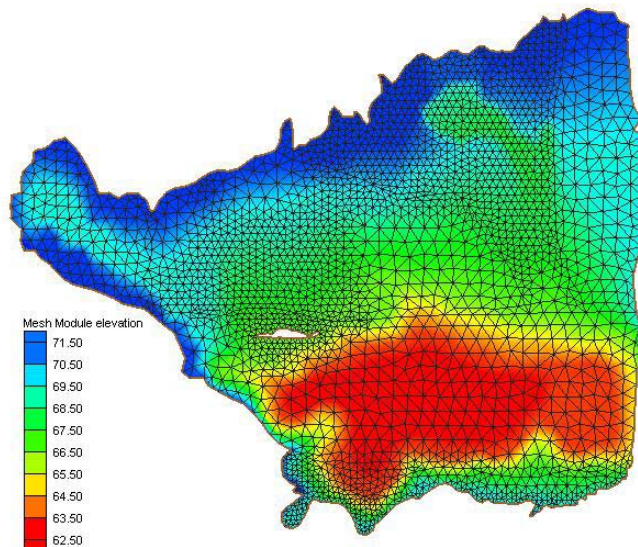


Figura 2: Batimetría de la laguna Mar Chiquita

Para la modelación se establecieron como condiciones de contorno el ingreso de caudal permanente en los tres tributarios Río Dulce (QD), Río Suquia (QS) y Río Xanaes (QX). El contorno de la laguna (salvo en los ingresos de los ríos) es cerrado teniendo como única salida la evaporación, que constituye un factor de importancia en este sistema endorreico salado, la tasa adoptada es de 7,25 cm/mes<sup>11</sup>, para trabajos futuros se está calibrando su valor con mediciones directas en campo por medio de instrumental recientemente instalado.

Los caudales adoptados han sido de 77,1 m<sup>3</sup>/s (QD), 5,0 m<sup>3</sup>/s (QS) y 5,0 m<sup>3</sup>/s (QX).

Se definieron dos tipos de materiales, uno corresponde a un factor de rugosidad de Manning de 0,02, adoptado para representar la característica del vaso de la laguna y el otro adoptado en la zona de influencia de los cauces fluviales de los ríos Dulce, Suquía y Xanaes corresponde a un factor de rugosidad de Manning de 0,016.

### 3.2 Intensidad y dirección del viento

En el gráfico de viento (figura 3) se observa que en los 9 días previos a la imagen hay alternancia entre viento Norte y Sur, pero que el día 12 y 13 de abril es predominante del Norte y particularmente el 13 con una intensidad de 52 Km/h (14,4 m/s).

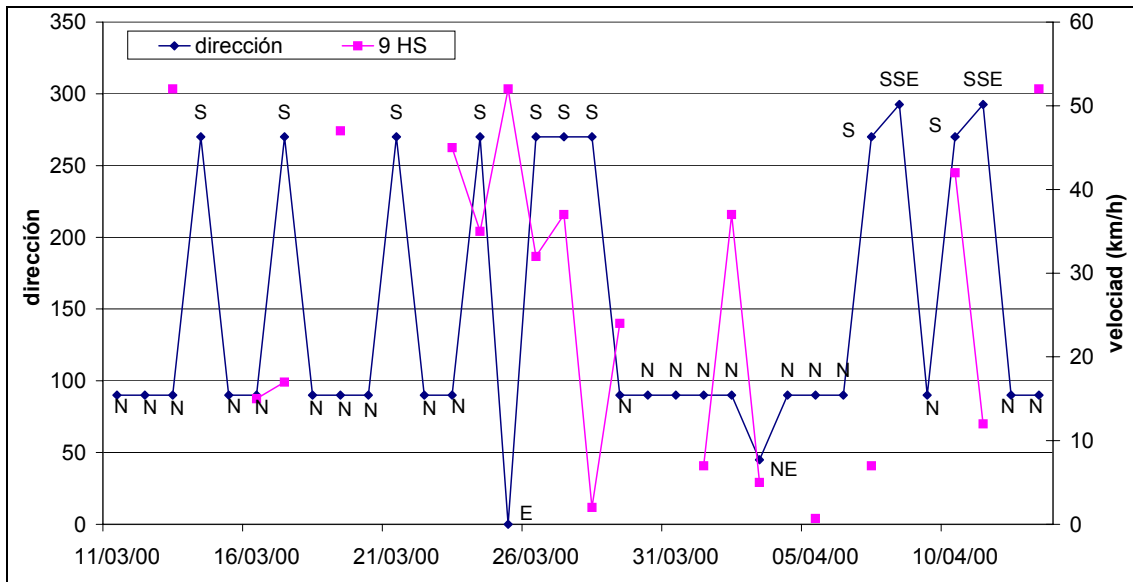


Figura 3: Intensidad y dirección del viento. Período 11-03-2000 a 13-04-2000

En la figura 4 se presenta el registro de vientos del período 01-05-2003 a 24-05-2003.

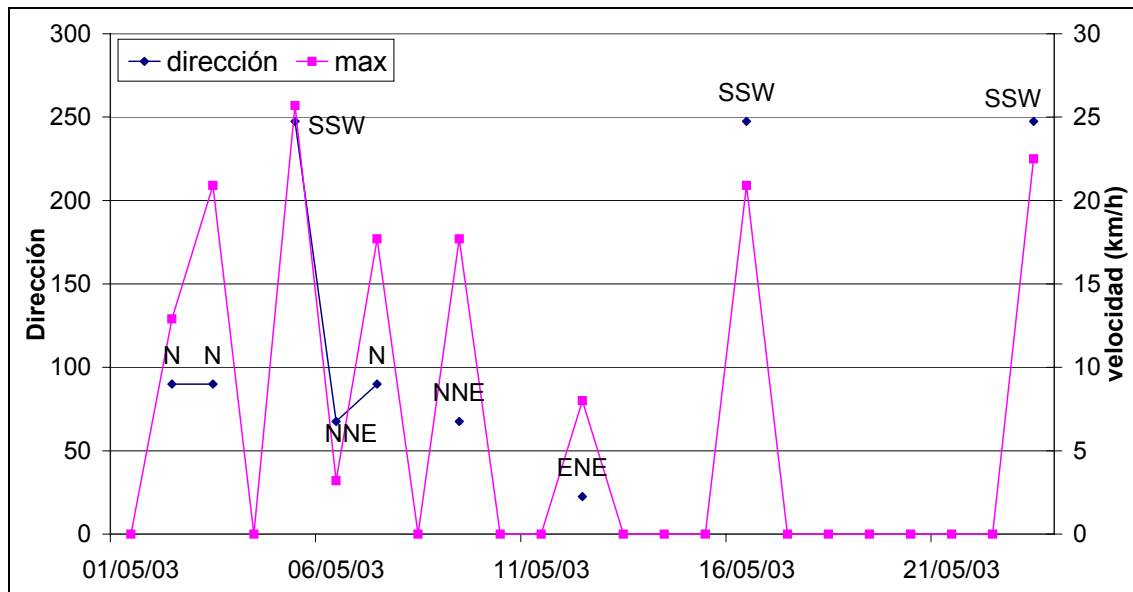


Figura 4: Intensidad y dirección del viento. Período 01-05-2003 a 24-05-2003

El registro de viento se presenta con 6 días de calma entre el 17 y el 22 de mayo de 2003 y un día antes del paso del satélite se produce un viento de dirección Sur de intensidad moderada e igual a 22,5 km/h (6,25 m/s).

### 3.3 Modelación 3D

Debido a las dimensiones de la laguna (120 Km en dirección E-O y 100 Km en dirección N-S) se ha utilizado una grilla rectangular con de 122 x 111 celdas con una resolución horizontal de 1 Km. x 1 Km. En la dirección vertical se utilizaron 10 capas, cuyo espesor varía con el tiempo, ya que el tamaño del paso vertical se adapta a la profundidad local.

El paso de tiempo para el modo barotrópico ha sido de 10 seg, mientras que para el baroclínico de 5 minutos, respetando la condición de Courant-Friedrichs-Levy. Para la turbulencia se ha adoptado un esquema de una ecuación, mientras que para la advección de momento se ha utilizado el esquema upwind.

Como condición inicial se ha tomado que la superficie del agua es horizontal en la laguna y con cota 71,40 m con respecto a cota IGM, mientras que las velocidades iniciales en el sentido x e y se tomaron nulas.

Para considerar la acción del viento se han establecido velocidades de 5 y 10 m/s y con direcciones Norte, Nor-Este y Sur. Para obtener la permanencia del flujo se realizaron simulaciones preliminares de 24, 48 y 72 hs de duración. Estos resultados permitieron fijar en 24 hs (dirección S y NE) y 48 hs (dirección Norte) el tiempo necesario para establecer el régimen permanente debido a la acción del viento.

Para el cálculo de las tensiones de corte por viento se ha utilizado la expresión de Smith y Banke<sup>25</sup>. Además se ha supuesto que la velocidad del viento es constante en toda la grilla.

### 3.4 Modelación 2D

Para la discretización del dominio se utilizaron elementos triangulares en este caso de estudio. Dado que el sistema está constituido por una extensa área, cercana a los 6000 km<sup>2</sup>, el mallado de la superficie se realizó intensificando la definición de los elementos en las áreas cercanas a las desembocaduras de los tributarios y en los alrededores de la Isla del Mistolar (Figura 7). La grilla triangular adoptada cuenta con 5.060 elementos, con dimensiones variables de 2 km de lado a 0,5 km de lado en las zonas de mayor definición.

El paso de cálculo utilizado ha sido de 15 minutos. En cuanto a la viscosidad de remolino se comenzó trabajando con valores elevados de la misma para estabilizar el modelo, luego de sucesivas calibraciones se ha conseguido disminuir su valor a 1000 Pas/seg, valor que se encuentra dentro del rango del número de Peclet recomendado. En este punto se continúa trabajando para disminuir más aún el valor de la viscosidad de remolino en las modelaciones futuras ya que a pesar de ser un tanto elevado, se ha considerado suficiente para las primeras caracterizaciones de la hidrodinámica del sistema.

El objetivo de las primeras simulaciones<sup>24</sup> fue lograr el balance entre los caudales de entrada y la evaporación para un nivel constante, partiendo de cota 72 m.s.n.m. hasta 71,40 m.s.n.m., para luego incorporar la acción del viento.

Se consideró la acción del viento con dirección Norte y Sur con intensidades de 2 m/s (7 km/h) y 5 m/s (18 km/h). Para el cálculo de las tensiones de corte por viento se ha utilizado la fórmula de Van Dorn.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Niveles

Se presenta en la figura 5 la elevación de la superficie del agua obtenida con COHERENS, para viento Norte con una intensidad de 5 m/s. Se puede observar como las tensiones de corte por la acción del viento desde el Norte producen la sobrelevación o “windsetup” en la costa Sur (0,06 m) y de un modo inverso en la costa Norte (0,16 m). A su vez las líneas de igual cota se orientan en sentido Oeste-Este, en forma perpendicular a la dirección de acción del viento.



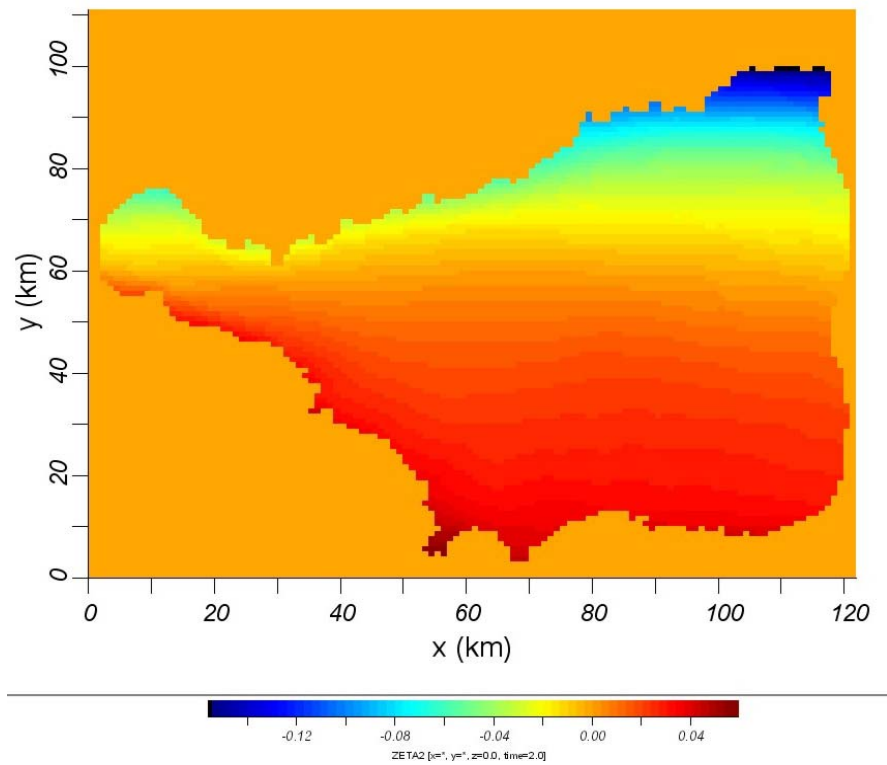


Figura 5: Superficie del agua (m) para viento Norte y velocidad 5 m/s con COHERENS

Con RMA2 se producen una distribución similar, pero con valores extremos diferentes. Por ejemplo en la costa Sur la sobrelevación alcanza 0,18 m, mientras que en la costa Norte se produce un descenso de 0,48 m, que se extiende varios kilómetros hacia adentro de laguna, ya que en esta zona la topografía de la misma tiene pendientes muy suaves. Se puede observar la recesión de la costa Norte con el consecuente secado de elementos de la malla (Figura 6).

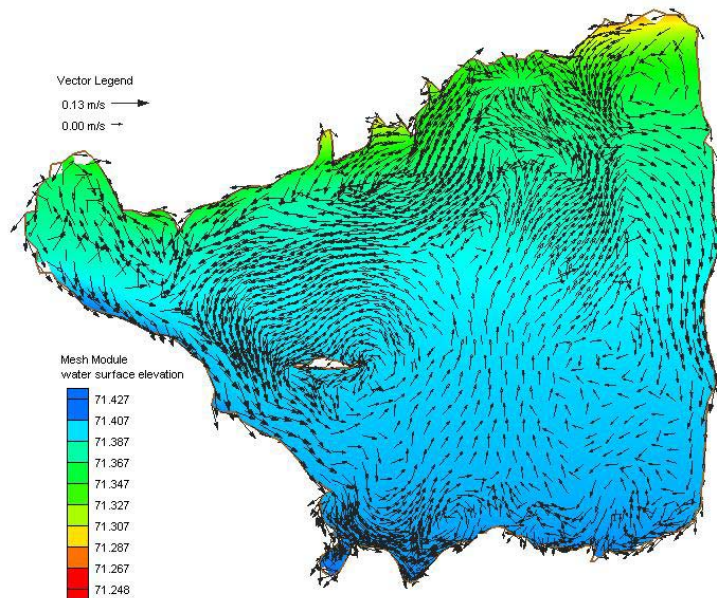


Figura 6: Campo de velocidades y sobre elevación con RMA2. Vto. Norte 5m/s

Algunas observaciones realizadas en la reserva de Miramar, estiman que para viento Norte de 60 km/h (16,7 m/s) la sobrelevación ha sido de aproximadamente 0,50 m. Esta observación y futuras mediciones pueden servir para la calibración de coeficientes de los modelos numéricos, como por ejemplo el coeficiente de arrastre del viento, etc.

A modo de resumen se insertan en la Tabla 1 los valores obtenidos de máxima sobrelevación y descenso según las simulaciones numéricas 2D y 3D para los diferentes escenarios modelados.

Modelo	Dirección	Velocidad (m/s)	Sobrelevación (m)	Descenso (m)	Desnivel (m)
2D	N	2	0,03	0,13	0,16
2D	N	5	0,18	0,48	0,66
3D	N	5	0,06	0,16	0,22
3D	N	10	0,22	0,65	0,87
3D	NE	5	0,10	0,17	0,27
3D	NE	10	0,33	0,78	1,11
2D	S	2	0,05	0,07	0,12
2D	S	5	0,36	0,25	0,61
3D	S	5	0,14	0,06	0,20
3D	S	10	0,50	0,23	0,73

Tabla 1. Superficie del agua (m) para diferentes condiciones de viento

## 4.2 Circulación

El análisis de la circulación debida a viento Norte se ha realizado, debido a la

disponibilidad de la imagen satelital del **13 de abril de 2000** y a registros de la velocidad y dirección del viento. A partir de estos datos se ha observado que durante los días 12 y 13 de abril del 2000, el viento registrado ha sido de dirección Norte y con una velocidad media de 52 Km/h (14,4 m/s). Esta condición se ha mantenido prácticamente durante 48 hs, el tiempo mínimo necesario según la modelación, para establecer el régimen permanente del sistema.

Es importante mencionar que las simulaciones se han realizado para caracterizar la circulación en la laguna, y que no apuntan a obtener velocidades similares que en campo, principalmente porque no se dispone de tales. Por esta razón se presentan resultados que apoyen la comparación cualitativa con imágenes satelitales.

Los resultados obtenidos con COHERENS, se presenta para diferentes profundidades en la figura 7.

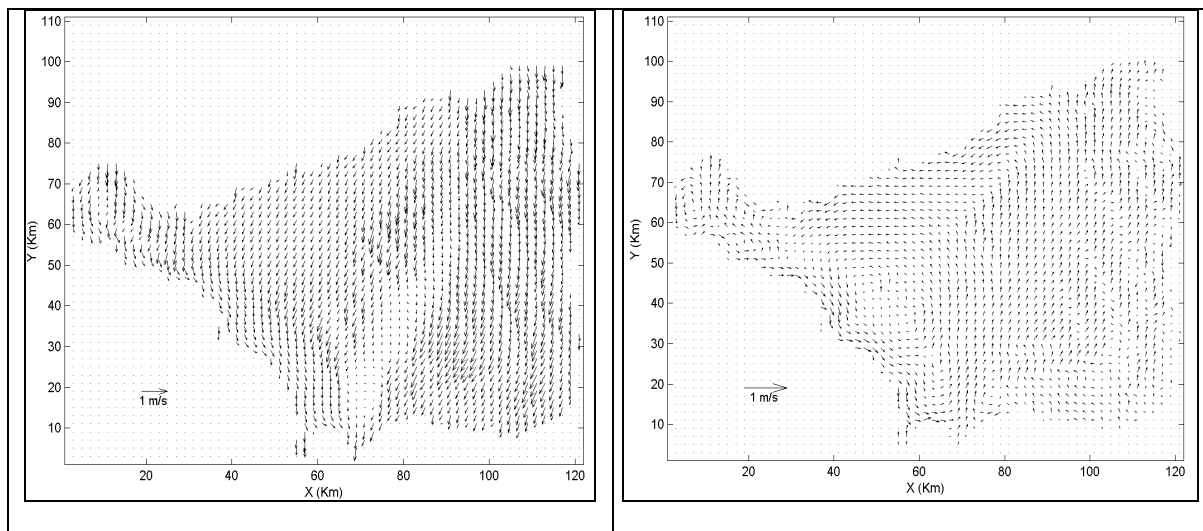


Figura 7: Velocidad en capa superficial (izquierda) y media (derecha) con viento Norte de velocidad 5 m/s

En la figura 7 (izquierda) se puede apreciar que la circulación superficial debida a viento constante del Norte produce en el sector Centro vectores que se dirigen hacia el Sur-Oeste. Sin embargo en el sector Nor-Este de la laguna los vectores velocidad se orientan en sentido Norte-Sur y rotan hacia el Sur-Oeste 20 Km antes de llegar a la costa Sur. Además en la costa Sur-Oeste los vectores se ubican en forma paralela a la línea de costa y se dirigen hacia el Sur, mientras que en la Norte se dirigen hacia el Sur-Oeste.

Para la capa media de la columna de agua (figura 7 derecha) el sentido de circulación en general ha cambiado, principalmente porque en el centro de la laguna los vectores se dirigen hacia el Norte y 10 Km antes de llegar a la costa Norte rotan hasta ubicarse en forma paralela a la línea de costa. Las líneas de corriente que se inician en la costa Sur de la laguna tienden a orientarse hacia el Nor-Este.

En la costa Norte, los vectores se dirigen hacia el Oeste, mientras que en la costa Sur-Oeste los vectores se ubican paralelos a la costa y se dirigen hacia el Sur. Esta situación es similar a la obtenida para la capa superficial. Además en el sector Centro-Oeste de la laguna, en la Isla

del Mistolar, se produce una celda de giro en sentido antihorario que aumenta la intensidad de la velocidad en la costa.

Se observa también en general que la velocidad en esta capa es inferior a la capa superficial. A la vez no se presenta el campo de velocidad para la capa correspondiente al fondo de la laguna porque las velocidades son prácticamente nulas.

Con el modelo RMA2 (Figura 8) se observan claramente dos celdas principales de circulación, una en sentido horario ubicada en la franja Este de la laguna, y otra en sentido antihorario, con eje en la Isla del Mistolar (Centro-Oeste), similar a la obtenida con la modelación 3D. Debido a la acción sostenida del viento Norte, se puede observar como se alinean los vectores en esa dirección, en especial, la forma en la cual los vectores se alinean en el sentido de lo que fuera anteriormente el antiguo cauce del Río Dulce, actualmente sumergido en la laguna. Se observan también patrones de circulación paralelos a la costa muy marcados debidos a la influencia de la condición de contorno. Debido a la presencia de la isla del Mistolar, en el cuadrante centro oeste, se puede observar la separación del flujo en forma de una estela de dirección Norte-Sur, que finaliza en un pequeño vórtice muy definido al sur de la isla. En la costa norte, la acción del viento provoca la recesión de la costa, debido a que dominan las zonas de baja pendiente en ese sector se puede observar el efecto de secado de elementos de la malla.

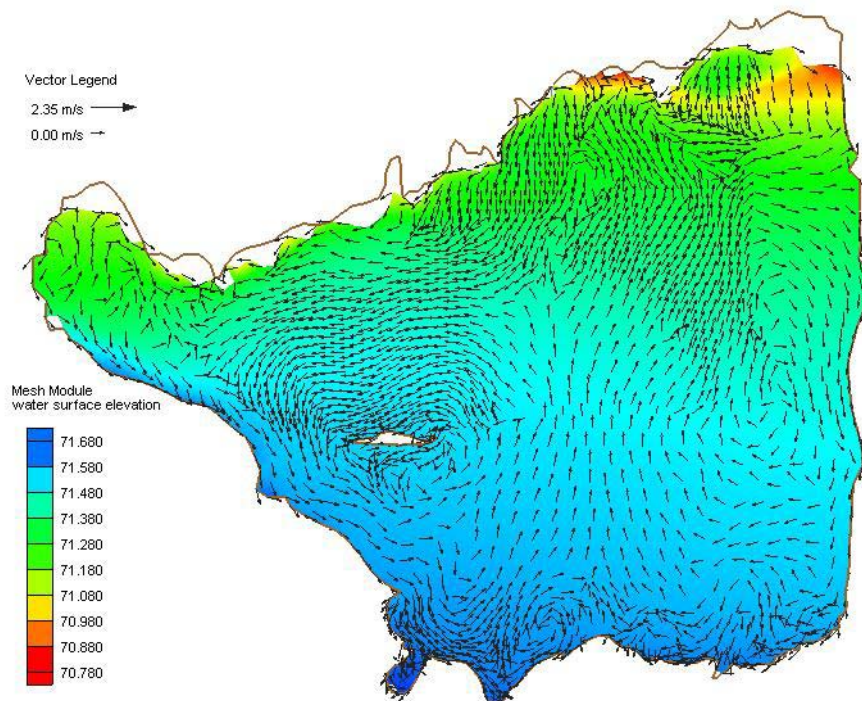


Figura 8: Campo de velocidades y sobre elevación. Vto. Norte 5m/s

La modelación 3D ha permitido establecer que en la zona Este los vectores en la superficie se dirigen hacia el Sur, mientras que a profundidad media hacia el Norte. Esto genera un perfil de velocidad que la porción superior se traslada debido a las tensiones de corte

actuantes mientras que en la porción inferior para establecer la continuidad en el flujo se dirige en sentido contrario. Esto se manifiesta tanto en el sector Este como Oeste (figura 9).

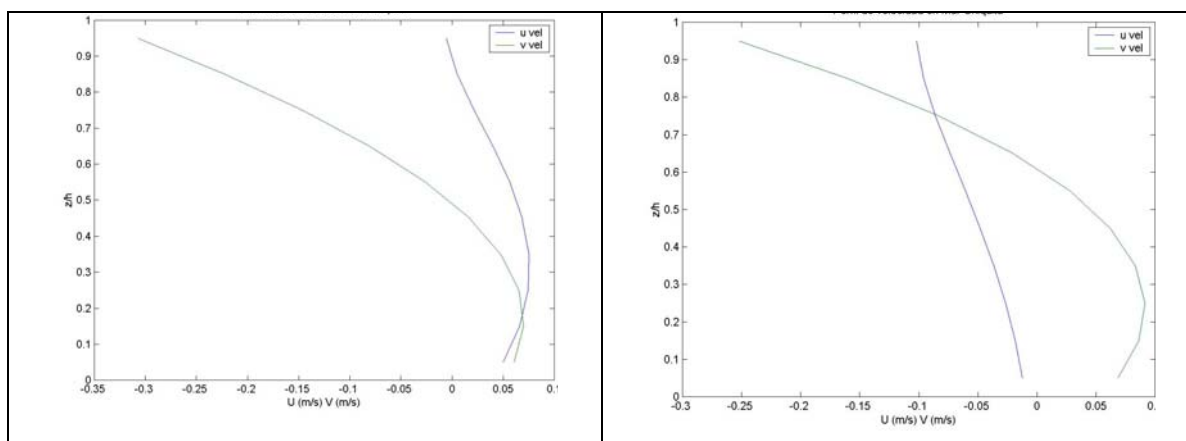


Figura 9: Perfil de velocidad en celdas ubicadas en el Este (izquierda) y Oeste (derecha)

El escenario de viento Sur se ha analizado por la disponibilidad de la imagen satelital del **24 de mayo de 2003** y los registros de la velocidad y dirección del viento. A partir de estos datos se ha observado que durante el día 23 de mayo del 2003, el viento registrado ha sido de dirección Sur y con una velocidad media de 25 Km/h (6,9 m/s). Esta condición se ha mantenido durante 24 hs, el tiempo mínimo necesario según la modelación, para establecer el régimen permanente con viento Sur. En la figura 10 se insertan los resultados obtenidos a distintas profundidades de la modelación.

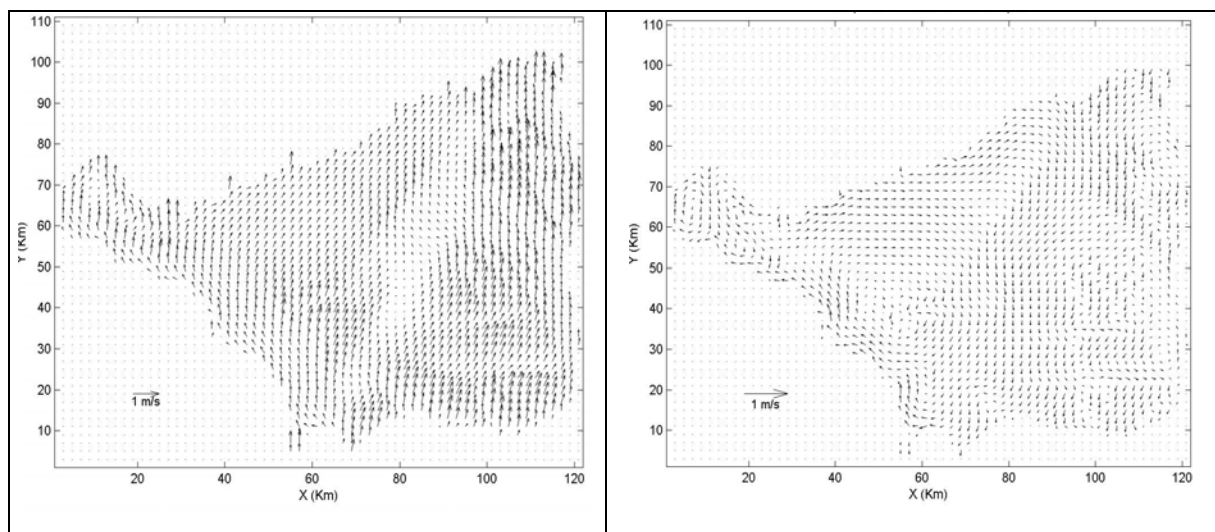


Figura 10: Velocidad en capa superficial (izquierda) y media (derecha) con viento Sur de velocidad 5 m/s

En la figura 10 (izquierda) se puede apreciar que la circulación debida a viento constante del Sur provoca en el Centro de la laguna una zona de baja circulación, con velocidad

prácticamente nula, y que en general los vectores velocidad se dirigen hacia el Sur-Este. En la zona Norte estos vectores rotan suavemente hacia el Sur.

En la costa Sur-Oeste sucede lo inverso que para viento Norte, es decir, los vectores se ubican en forma paralela a la línea de costa y se dirigen hacia el Noroeste, mientras que en la costa Norte se dirigen hacia el Noroeste.

En la figura 7 (derecha) se puede observar, al igual que con viento Norte, que el sentido de circulación en la capa media ha cambiado, porque en el centro de la laguna los vectores se dirigen hacia el Sur y 10 Km antes de llegar a la costa Norte rotan hasta ubicarse en forma paralela a la línea de costa.

En la costa Norte, los vectores se dirigen hacia el Noroeste y rotan 180° en cercanías de la desembocadura del Río Dulce, mientras que en la costa Sur-Oeste los vectores se ubican paralelos a la costa y se dirigen en este caso hacia el Noroeste. Se puede observar también en esta figura que en la zona de la Isla del Mistolar, se produce una celda de giro pero en sentido horario.

Al igual que el caso anterior no se presenta el campo de velocidad para la capa correspondiente al fondo porque las velocidades son prácticamente nulas.

Para el caso de RMA2 (figura 11) se distinguen nuevamente dos celdas de circulación, una de sentido antihorario en la margen derecha y otra de sentido horario alrededor de la Isla del Mistolar, presentando un vórtice marcado en el extremo sur este de la isla del Mistolar. El orden de los vectores de velocidad es de 0,3 m/s, disminuyendo su intensidad en la zona norte de la isla del Mistolar, manifestándose la pérdida de energía en el flujo al encontrarse con la isla. Otra celda de circulación bastante marcada se observa en el extremo noreste de la laguna.

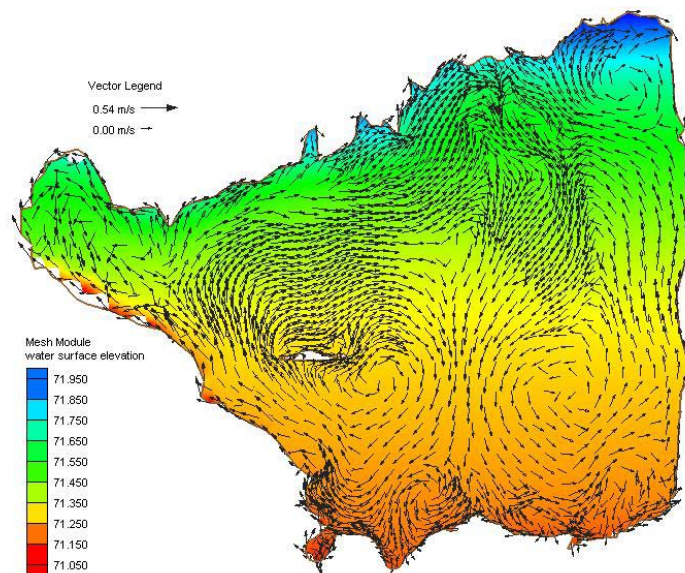


Figura 11: Campo de velocidades y sobre elevación. Vto. Sur 5m/s

## 5 ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

### 5.1 Imagen 13 de abril de 2000

Analizando la zona de la isla del Mistolar (figura 12 izquierda) se puede observar una estela que indica que el sentido del flujo es hacia el Sureste, funcionando este sector como una contracción. Esto se ha manifestado claramente en la modelación 2D por la fina discretización de la malla en este sector.

En el sector Norte o de ingreso distribuido de los Bañados del Río Dulce, la coloración del flujo entrante se desplaza hacia el Oeste en forma paralela a la costa (figura 12 derecha), mientras que en las modelaciones esto se ha manifestado en la capa superficial del 3D y en la velocidad promediada del 2D.

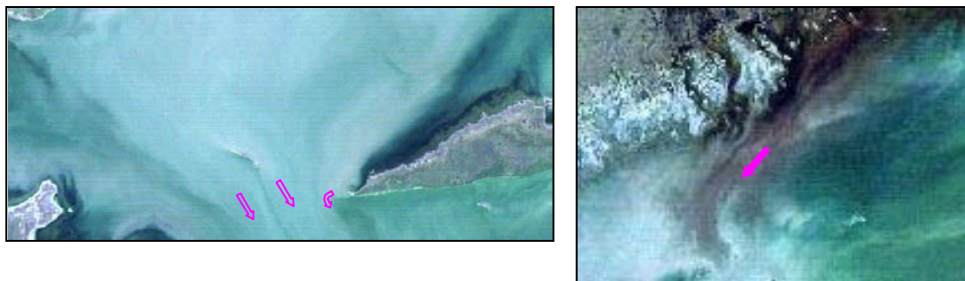


Figura 12: Imagen 13 de abril de 2000. Isla del Mistolar (izquierda) y desembocadura del Río Dulce (derecha)

En la desembocadura tanto del Río Xanaes como del Plujunta se visualiza una pluma que se desplaza hacia el Norte, más contrastada en la zona del Plujunta, por la diferencia de sólidos en suspensión del aporte fluvial con el agua de la laguna.

Observando la laguna en su totalidad se puede apreciar una celda de circulación en sentido antihorario (figura 13). Este comportamiento se puede visualizar en la simulación 3D en el sector Norte de la laguna pero no en el Sur.

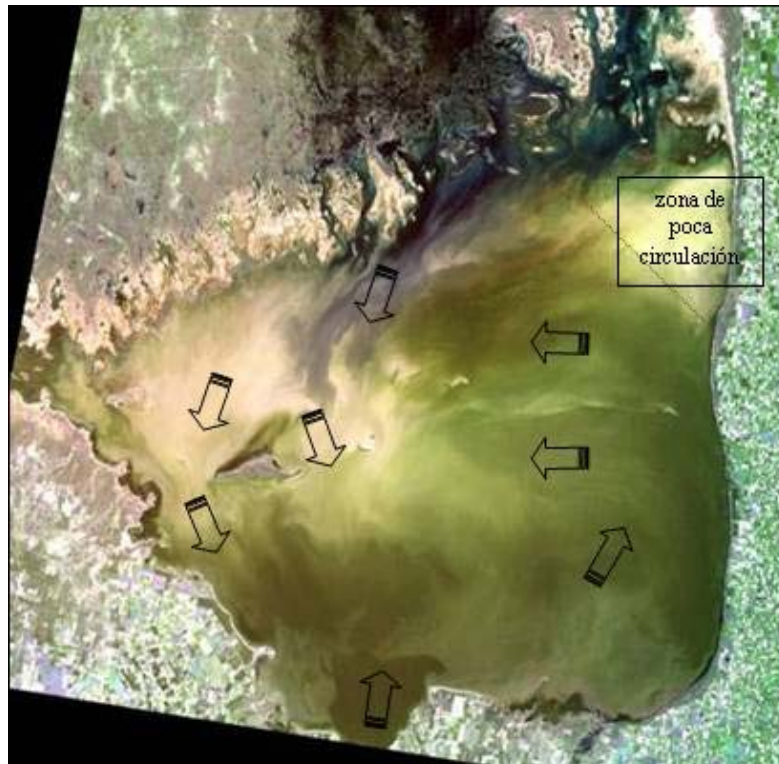


Figura 13: Circulación superficial de la laguna para el 13 de abril de 2000

## 5.2 Imagen 24 de mayo de 2003

En la imagen correspondiente al 24 de mayo de 2003 (figura 15 derecha) se observa el ingreso de agua desde los Bañados del Río Dulce pero no se distingue claramente la zona de influencia. Además se remarca el efecto de sombra que produce la isla, dividiendo el flujo en dos porciones que se dirigen hacia el Norte.

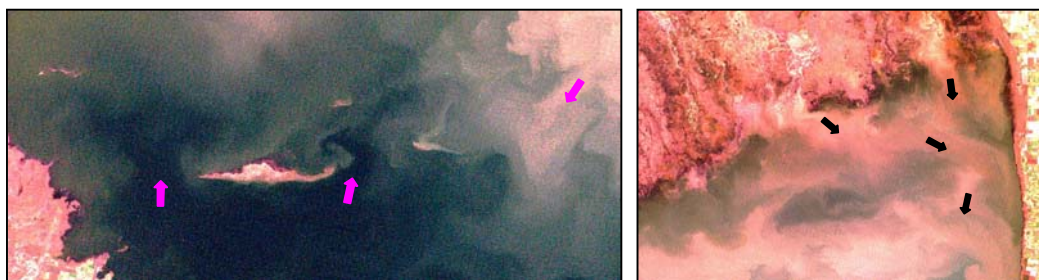


Figura 14: Zona del médano y desembocadura del Río Dulce.

En la costa Sur y desembocadura de tributarios se observa un desplazamiento general hacia el Noreste.

Se puede resumir en esta imagen que la zona Sur de la laguna se encuentra afectada por el viento proveniente desde el Sur, mientras que en la Norte posee influencia el ingreso de los



bañados del Río Dulce.

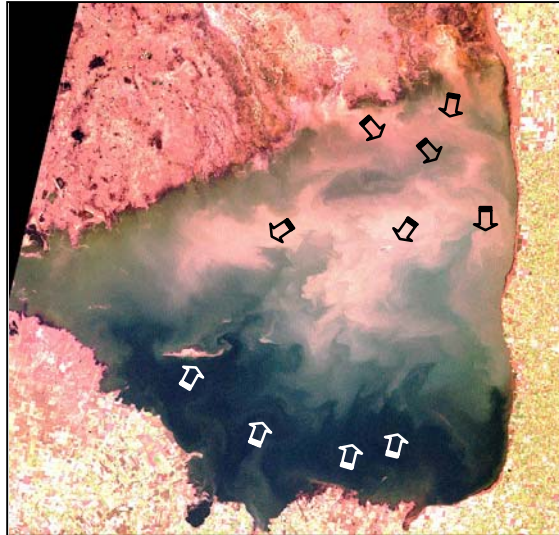


Figura 15: Análisis de circulación para la imagen del día 24 de mayo de 2003.

A diferencia de la imagen correspondiente al 13 de abril del 2000, no se visualiza a nivel macro una celda de giro. Sin embargo se observa que de los bañados del Río Dulce el flujo se dirige hacia el Suroeste y del sector Sur hacia el Noreste, quedando el centro de la laguna como una zona de cambios bruscos en la concentración de sedimentos suspendidos.

Según la modelación 3D, en la capa superficial de la zona Sur (figura 10 izquierda), los vectores velocidad se dirigen hacia el Suroeste, similar a lo observado en la imagen satelital.

En la zona Norte, el ingreso de los bañados del Río Dulce se desplaza hacia el Suroeste, en forma similar a los resultados de la simulación 3D para la capa media. Esto puede deberse a que la acción del viento local registrado en la costa, posiblemente por la incertidumbre en la distribución espacial del viento.

## 6 CONCLUSIONES

En general los modelos numéricos empleados permiten representar de forma eficiente el comportamiento de una laguna somera endorreica de estas características.

El modelo COHERENS brindó resultados aceptables de acuerdo a la comparación cualitativa con el apoyo de las imágenes satelitales. El modelo RMA2 representa satisfactoriamente la circulación especialmente en las zonas de profundidad media y baja de la laguna, en las zonas mas profundas parecería que tiende a magnificar el tamaño de los vórtices como los presentados en la zona Este de la laguna.

La técnica de mojado y secado de elementos del modelo RMA ha dado buenos resultados a la hora de representar la disminución de nivel de la laguna, visible en la costa norte dada su escasa pendiente.

El perfil de velocidad en vertical obtenido de la simulación 3D permite inferir que las tensiones de corte provocan una velocidad superficial elevada, mientras que en la porción inferior de la columna de agua se produce un flujo inverso que equilibra la porción superior.

En las costas de la laguna los vectores se alinean en forma paralela y aumentan su intensidad, debido a los efectos del contorno. Esto se manifiesta tanto en la simulación 2D y 3D.

Para la explotación de los modelos numéricos es necesario la calibración de sus parámetros con la medición de variables hidrodinámicas (velocidad, tirante) y de calidad del agua (sólidos en suspensión, clorofila, etc). Estas tareas forman parte de trabajos que se están realizando.

Es importante destacar algunas observaciones de las simulaciones 3D y 2D. En ambos casos se produce en la zona de la isla del Mistolar un vórtice de gran escala que rota en sentido antihorario para viento Norte y horario para viento Sur. Esta condición se visualiza también en la interpretación de la imagen satelital corespondiente al 13 de abril del 2000.

El comportamiento general de los modelos hidrodinámicos empleados ha sido satisfactorio, debido a que la acción del viento produce el windsetup en el sector esperable y por continuidad se generan vórtices y patrones de circulación para el equilibrio de la masa de agua.

Existe una importante diferencia en el windsetup y descenso entre la simulación 2D y 3D, por lo que se deben calibrar los coeficientes de arrastre por viento.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado desde el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la UNC en el marco de proyectos de investigación financiados por el CONICET, Agencia Córdoba Ciencia, Secretaría de Investigación y Postgrado de la UNC (Secyt) y el programa de la Comunidad Europea denominado ECOSUD (Estuaries and Coastal Areas, Basis and Tools for a more Sustainable Development) (ICA-CT-2001-10027).

## 8 REFERENCIAS

- [1] ARC/VIEW 3.2, *Manual del usuario: ARC/VIEW 3.2*, desarrollado por Environmental System Research Institute. ESRI, Redlands, California, EE.UU. (1992-1999):
- [2] Backhaus J.O., *A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics*. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 38, 165–187 (1985).
- [3] Blumberg A.F. and Mellor G.L., *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model*. In : N.S. Heaps (Editor), *Three-dimensional Coastal Ocean Models*. Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 4, American Geophysical Union, Washington D.C., pp. 1–16. (1987).
- [4] CADNE (Ed.), *Laguna de Mar Chiquita (Mar de Ansenusa). Recopilación y Evaluación de los Conocimientos Existentes Sobre Factores Físicos y Biológicos del Área (2ª Aproximación)*. Banco de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina. (1982)
- [5] CADNE Ed., *La Laguna de Mar Chiquita. Recopilación y evaluación de los conocimientos del área de la Laguna Mar Chiquita*. Comisión de Apoyo al Desarrollo del Noreste de la Provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina. 31 pp + 14 anexos. (1977)
- [6] Chuvieco E., *Fundamentos de la teledetección espacial*. RIALP Alcalá, Madrid. (2002)
- [7] Chuvieco, E., *Teledetección ambiental*. HUROPE, S. L. Barcelona, Madrid. (2002)
- [8] Destuynder, V., *Modelación Hidrodinámica Tridimensional del Río de la Plata*, Tesis de ingeniería para la Universidad de Lyon (Francia). Director: Tarela, P.A. (2002)
- [9] Dyke P.P.G. and Davies A.M. (Editors), *Mathematical models of the North Sea and surrounding continental shelf seas*. Proceedings of JONSMOD 90, Birkenhead, U.K., 2–5 April 1990. Continental Shelf Research, 12(1), 211 pp.(1992).
- [10] Francisco J. Van Avermaete F. J. y Tarela P. A., *Transporte de Sedimentos en el Río de La Plata: uso combinado de modelación numérica e imágenes sensoriales*. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina. (2005)
- [11] Hillman, G., *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina. (2003)
- [12] Insa C. M., *Recopilación bibliográfica y análisis de los principales parámetros de la calidad del agua en la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina*. Informe de beca del Programa Internacional PROMOE, entre Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia (España) y FCEF y N, de la Universidad Nacional de Córdoba. (2000)
- [13] Kanter, H., *La cuenca cerrada de la Mar Chiquita en el norte de la Argentina*. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias. Córdoba 32. (1935).
- [14] Kjerfve, B. and K. E. Magjil., *Geographic and hydrographic characteristics of shallow coastal lagoons*. Marine Geology 88:187-199. (1989)
- [15] Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. and Wild-Allen K., *COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User*

- Documentation*. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914 pp. (1999)
- [16] Lynch D.R. and Davies A.M. (Editors), *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*. Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, American Geophysical Union, Washington D.C., 510 pp. (1995).
- [17] Martinez, D.E., *Caracterización Geoquímica de las Aguas de la Laguna Mar Chiquita, Prov. de Córdoba*, Tesis Doctoral, UNC. (1991).
- [18] Mellor, G., *User Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*, Princeton University, 1-43. (1998)
- [19] Nihoul J.C.J. and Jamart B.M. (Editors), *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, Vol. 45, 624 pp. (1987).
- [20] Pagot, M., *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del río Dulce*. FCEFyN, UNC. Córdoba, Argentina. Tesis de Grado. (1999).
- [21] Pagot, M., *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina. (2003).
- [22] Reati, G.J., Florin, M., Fernandez, G.J. Y Montes, C., *The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): a little know, secularly fluctuating, saline lake*. International Journal of Lake Research, Vol. 5. (1997).
- [23] Rodriguez, A., Hillman, G., Pagot, M. Y Caamaño Nelly, G., *Análisis y Simulación de Riesgos Ecológicos en un Sistema Hidrológico Endorreico*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Puerto Rico. Vol. 2 (1), 15 págs. (2002).
- [24] Rodriguez, A.; Pozzi; C. , Plencovich; G., Hillman, G.; Pagot, M.; Caamaño Nelli, G.. *Caracterización hidrodinámica preliminar de la Laguna de Mar Chiquita, Córdoba, Argentina*. Congreso Nacional del Agua , 2005. Mendoza, Argentina. (2004).
- [25] Smith S. D. and Banke E. G., *Variation of the sea surface drag coeficient with winspeed*. Quaterly Journal Meteorological Society, 101, 665-673. (1975).
- [26] Universidad Nacional de Córdoba, *Valoración del Impacto Ambiental en la Región de Mar Chiquita y la Cuenca afectada por el Canal Federal*, Informe Final al CFI, Cba. Argentina. (1998).
- [27] Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica, *Diseño de Defensas para la localidad de Miramar, Mar Chiquita, Córdoba*. Informe Final para DIPAS, Cba. Argentina. (2003).
- [28] USACE, *User's guide to RMA2-WES, Version 4.3*, U.S. Army Corps of Engineers – Water Ways Experimental Station Hydraulics Laboratory, Viksburg, Miss., EEUU. (1997).