

SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LAGOS CON FORZANTES METEOROLÓGICOS REALES

Hugo E. Ferrari

Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro, 8400 Bariloche, Argentina.

Gustavo C. Buscaglia

Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro, 8400 Bariloche, Argentina.

F. López

Instituto Nacional del Agua y el Ambiente y Universidad Nacional de Córdoba, Ambrosio

Olmos 1142, (5000) Córdoba, Argentina

RESUMEN

Presentamos una adaptación del Princeton Ocean Model (POM) a la simulación tridimensional de lagos con forzantes meteorológicos. Los forzantes considerados son viento, radiación solar, humedad y temperatura del aire, medidos con una red de sensores hidro-meteorológica. Dichos forzantes son incorporados al POM con un modelo de acople agua-atmósfera de flujo de calor y de momento en la superficie del lago, que reproduce bien el balance térmico global. Consideramos la contribución de los ríos que desembocan en el lago, de los cuales especificamos caudal y temperatura de entrada. Mostramos algunas aplicaciones al lago San Roque (Córdoba).

INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata sobre los avances recientes en la simulación tridimensional del lago del embalse San Roque (Córdoba, Argentina). El San Roque es un lago de medianas dimensiones, con una superficie de 16km^2 y un volumen máximo de 180Hm^3 como valores representativos. Hay varios aspectos que hacen este lago interesante para su estudio, como por ejemplo el hecho de que sirve de fuente de agua potable para la ciudad de Córdoba. Este lago está amenazado por un importante estado eutrófico, con el peligro que eso conlleva para la calidad del recurso hídrico. Por esa razón, el CIRSA-INA ha iniciado a mediados de los 90 una campaña de monitoreo, que incluye tanto mediciones de campo como desarrollo, en conjunto con el CAB-IB, de herramientas numéricas que permitan predecir su evolución.

En una primera instancia, se modelaron las corrientes inducidas por viento, con modelos unidimensionales ([8, 9]), bidimensionales con un modelo de aguas poco profundas ([3]). Recientemente, se realizaron simulaciones tridimensionales con el POM ([10, 1, 2]).

La temperatura es una variable fundamental a fin de comprender los procesos que tienen lugar en el lago. Durante el verano, se forma un gradiente vertical de temperatura (estratificación) en el lago que inhibe los procesos de mezcla en la vertical. Estos perfiles térmicos están gobernados por los flujos de calor en el lago. Con ese objetivo, acoplamos al POM un modelo de flujo de calor de la atmósfera al lago, e incorporamos la contribución de los ríos que descargan en él.

MODELO NUMÉRICO

La parte sustancial del modelo numérico es el modelo de Mellor-Yamada, usado frecuentemente para modelar la circulación de océanos y la atmósfera. Dicho modelo, está basado en una relación de cierre para la turbulencia en flujos estratificados. Notablemente, su derivación proviene del estudio de la turbulencia en flujos neutros sobre paredes cóncavas. Por lo tanto, su extensión a flujos estratificados es un aporte del modelo [5].

Las ecuaciones que gobiernan el flujo son fácilmente deducibles considerando la asimetría en las longitudes características del océano (largo 4000km, profundidad 4km), de relación similar a

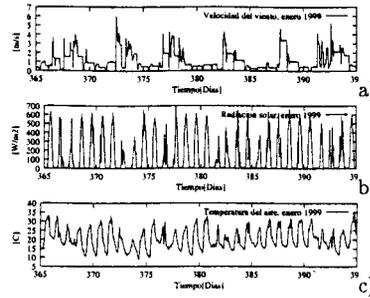


Figura 1: Datos meteorológicos de enero de 1999. a) Velocidad del viento, b) Radiación de onda corta, c) Temperatura del aire.

nuestro lago (largo 4km, profundidad 12 m). Es decir, se hace una aproximación de capa límite, (ver por ej. [7]). En esas condiciones tenemos

$$\frac{DU}{Dt} - fV + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right] - F_U \quad (1)$$

$$\frac{DV}{Dt} - fU + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right] - F_V \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial R}{\partial z} + F_T, \quad \frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S, \quad (4)$$

donde f es el parámetro de Coriolis, F_U , F_V , F_T , F_S son los términos difusivos horizontales, y $\frac{\partial R}{\partial z}$ es el término de flujo solar de radiación. Los términos difusivos horizontales se resuelven con las ecuaciones promediadas en vertical considerando una difusividad turbulenta del tipo Smagorinsky. El modelo se completa con la ecuación usual de conservación de la masa y ecuaciones para la energía cinética turbulenta q^2 y la longitud de escala maestra l . Esta última longitud queda definida suponiendo que todas las longitudes de mezcla turbulentas son proporcionales a una única longitud de mezcla l .

Las viscosidad cinemática turbulenta vertical K_M y la difusividad turbulenta vertical K_H se escriben como

$$K_M = qlS_M, \quad K_H = qlS_H \quad (5)$$

donde los coeficientes S_M y S_H son funciones del número de Richardson G_H definidos como

$$S_H[1 - (3A_2B_2 + 18A_1A_2)G_H] = A_2[1 - 6A_1/B_1] \quad (6)$$

$$S_M[1 - 9A_1A_2G_H] - S_H[(18A_1^2 + 9A_1A_2)G_H] = A_1[1 - 3C_1 - 6A_1/B_1] \quad (7)$$

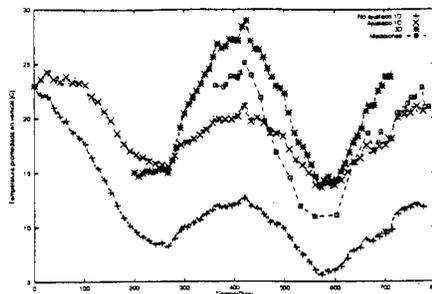


Figura 2: Temperatura promediada en vertical. Comparación entre mediciones, el modelo 1D no ajustado ($\alpha_{tw} = \alpha_{sw} = \epsilon_r = 1$), el modelo 1D ajustado ($\alpha_{tw} = 1.2, \alpha_{sw} = 1.1, \epsilon_r = 0.9$), y el modelo 3D con estos últimos parámetros

donde $G_H = \frac{l^2 N^2}{q^2}$, y N es a frecuencia de oscilación de Brunt-Vaisala.

Las cinco constantes A_1, B_1, A_2, B_2 y C_1 fueron determinadas en base a datos de la turbulencia en la región cercana a una pared (ley de pared) de flujos neutros. Por esta razón se dice que la extensión a flujos estratificados es un resultado derivado [5, 6].

Con respecto al método de resolución numérica de las ecuaciones, se usa esquema de diferencias finitas, con una coordenada sigma en la vertical (vale 0 en la superficie y $-H$ en el fondo). Se utiliza un paso de tiempo dividido (time splitting), con un método explícito en la horizontal (ecuaciones promediadas) y uno implícito en la vertical. Esto último elimina las restricciones de tipo CFL en la coordenada vertical y permite el uso de resoluciones más finas en las capas límites. La malla horizontal es del tipo "staggered", denominada como Arakawa C. Una descripción más detallada puede hallarse en el sitio del POM, [11].

DATOS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE CONTORNO

El objetivo de lograr una simulación realista de la evolución térmica y el transporte de contaminantes en lago nos lleva a considerar el uso de datos meteorológicos reales. Para esto contamos con mediciones cada 10 minutos aproximadamente, de velocidad del viento, temperatura del agua, radiación solar de onda corta y humedad. Como ejemplo de los datos medidos, en la figura 1 mostramos la velocidad del viento, radiación solar y la temperatura del aire medidos en el mes de enero de 1999.

No consideramos en este caso posibles influencias del lago sobre la atmósfera. La tensión de corte ejercida por el viento y los flujos de calor en la superficie del lago, se evalúan a partir de las siguientes relaciones:

Tensión de corte en la superficie (τ_s): $\tau_s = \rho_a C_D |U_a| U_a$, donde ρ_a es la densidad del aire, U_a es la velocidad del viento (10 m sobre la superficie), y C_D es el coeficiente de drag, y se toma igual 10^{-3} si $U_a < 5$, igual a 1.5×10^{-3} si $U_a > 15$ m/s, y variando en forma lineal en valores intermedios.

Transferencia convectiva de calor (q_c''):

$q_c'' = C_c \rho_a C_{pa} |U_a| (T_a - T_s)$, donde $C_c = 1.45 \times 10^{-3}$, T_a es la temperatura del aire, C_{pa} es el calor específico del aire, y T_s es la temperatura superficial del agua. Notar que T_s varía con la posición horizontal.

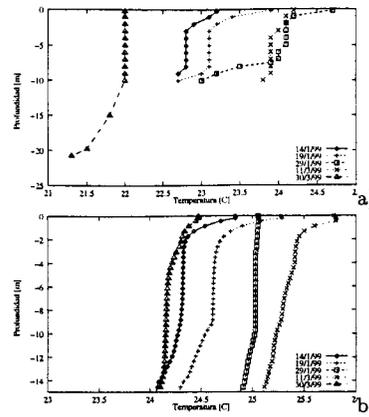


Figura 3: Perfiles simulados con el modelo 3D a), y medidos b) para algunos días de los meses de enero y marzo de 1999, aprox. a las 10:00hs. Notar la diferencia de escalas verticales.

Enfriamiento evaporativo (q_e''):

$q_e'' = C_e \rho_a L_w |U_a| (p_a - p_s) / p_{atm}$, donde L_w es el calor latente de vaporización, p_a es la presión parcial de vapor del ambiente, p_s es la presión de saturación a la temperatura de la superficie y p_{atm} es la presión atmosférica.

Radiación de onda larga (q_{lw}''):

$q_{lw}'' [W/m^2] = \alpha_{lw} 5.18 \times 10^{-3} (T_a [K])^6$, una fórmula empírica.

Radiación de onda corta (q_{sw}''):

$q_{sw}'' = \alpha_{sw} \tau q_{sw,0}'' \exp(\beta_{sw} z)$, donde $q_{sw,0}''$ es la radiación de onda corta incidente, τ es el coeficiente de transmisión, β_{sw} es el coeficiente de absorción y z es la coordenada vertical ($= -H$ en el lecho). β_{sw} lo tomamos igual a 1.84 m^{-1} , de acuerdo a la profundidad de disco de Secchi medida de 1 m.

Enfriamiento por radiación (q_r''): Para este término tomamos directamente una ley de cuerpo negro con una emisividad de ϵ_r .

Los coeficientes α y ϵ , fueron ajustados en un trabajo anterior con un modelo unidimensional, ([1])

Las condiciones y relaciones arriba listadas son relativamente standard y pueden hallarse, por ejemplo, en [12, 4]. Además, asumimos que el fondo del lago es adiabático.

En la figura 2 mostramos la evolución de la temperatura promediada en vertical para versiones 1-D y 3-D del modelo y mediciones de campo durante el período enero 1998- febrero 2000. El modelo 3-D ajusta mejor las temperaturas promedio medidas.

En la figura 3, mostramos perfiles de temperatura medidos y simulados. Vemos que, si bien en la superficie tenemos un comportamiento razonable, en el fondo del lago quizás tengamos un mezclado superior al real.

En la figura 4 mostramos un corte del lago, que muestra la evolución de las isotermas en el lago. Podemos ver que el día 23 tenemos una termoclina marcada (corresponde a 17 ene 99) con condiciones de viento en calma. El día 25 comienza a soplar el viento y vemos que la termoclina se inclina, y aparecen gradientes horizontales de temperatura, que van a aumentar el mezclado.

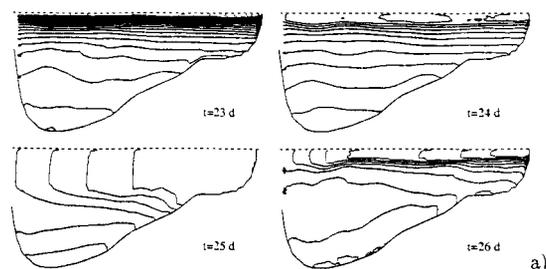


Figura 4: Corte del lago en que pueden observarse la evolución de las isotermas. El día 23 corresponde al 17/1/99 un día calmo. El día 25 comienza un evento de viento

CONTRIBUCIÓN DE LOS RÍOS

Hay 4 ríos que descargan al lago San Roque, de los cuales sólo 2 tienen un caudal apreciable como para influir en su comportamiento. Estos son el San Antonio y el Cosquín. Estos ríos tienen un caudal promedio de $10m^3/s$, lo que nos da un tiempo de residencia de unos 200 días. Por lo tanto los ríos tendrán una influencia apreciable en simulaciones de largo plazo (1 año).

En esta primera aproximación consideramos que los ríos no contribuyen con momento al lago. Es decir, la pluma del río es menor que la celda utilizada. Normalmente los ríos penetran en el lago hasta una profundidad en que la fuerza boyante, debido a la diferencia de densidad entre el agua del río y la del lago, es cero (sin considerar efectos tipo jet). En el lago consideramos que la salinidad es cero, por lo tanto los cambios de densidad están gobernados por la temperatura. La rutina consiste en encontrar esta profundidad y luego distribuir el agua del río en las celdas que tienen menor profundidad que el punto de entrada. A modo de trazador pusimos una salinidad en el río para ver los efectos de mismo. En la figura 5 podemos ver como evoluciona el agua del río que entra al lago.

CONCLUSIONES

Mostramos avances recientes en el desarrollo de herramientas para la simulación y manejo de lagos. Consideramos la influencia de la meteorología en el comportamiento estacional del lago. Incluimos el aporte de los ríos, y agregamos un trazador. La dispersión de un contaminante, no biológico, está gobernada por ecuaciones similares a las de la salinidad, por lo que se espera estudiar prontamente esta posibilidad.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo recibió financiación parcial de la ANPCYT a través de los PICT 12-982 y 12-1005.

REFERENCIAS

- [1] Buscaglia, G., López, F., Ferrari H. y Dari E., "SIMULACIONES A LARGO PLAZO DE PROCESOS HIDRODINÁMICOS, TÉRMICOS Y DE TRANSPORTE EN EL RESERVOIRIO DEL LAGO SAN ROQUE (ARGENTINA)", XIX Cong. Latin. de Hidra.-Córdoba 2000

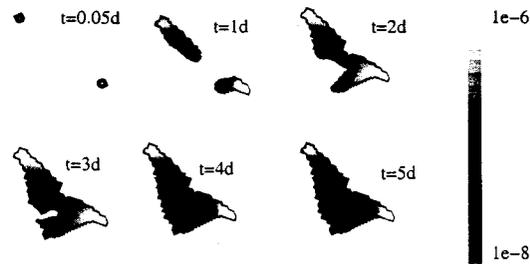


Figura 5: Evolución de la salinidad medida en psu. Los puntos que se observan para el día $t = 0.05$ corresponden a la entrada de los ríos. La salinidad inicial del lago es cero.

- [2] Buscaglia, G., López, F. y Arnica D. L., "3D numerical modeling of wind-induced circulation and transport processes in the San Roque Reservoir (Argentina)", *Hydroinformatics 2000, Iowa, USA, July 2000*.
- [3] Buscaglia, G., López, F. y Dari E., "Modelación numérica de la hidrodinámica del lago San Roque (Cordoba)" *Anales XVII Cong. Nac. Agua, 1998*.
- [4] Honzo, M y Stefan, H. G., "Lake water temperature simulation model", *J. Hydraulic Eng.-ASCE, Vol119, pp. 1251-1273, 1972*.
- [5] Mellor, G. and Yamada, T. "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems", *Reviews of geophysical and space physics, Vol 20, No 4, pp 851-857, Nov, 1982*.
- [6] Mellor, G. "One-Dimensional, Ocean Surface Layer Modeling, a Problem and a Solution", *In press: J. Phys. Ocean.*
- [7] Mellor, G. "Introduction to Physical Oceanography", *Springer-Verlag, New York, 1996*.
- [8] López, F. y Pirard C. "Numerical simulation of mixing and transport processes in stratified water bodies using a $k - \epsilon$ turbulence closure model", *7th International Conference Lakes Cons. and Manag., LACAR 97, 1997*.
- [9] López, F. y Niño Y. "Investigación numérica de las características de la mezcla turbulenta inducida por el viento en cuerpos estratificados", *7th X Congreso nacional sobre métodos numéricos y sus aplicaciones X ENIEF, San Carlos de Bariloche, 1997*.
- [10] López, F., Buscaglia, G., Dari, E. y Arnica, D. "Modelación numérica tridimensional de corrientes y procesos de transporte inducidos por el viento en el lago San Roque (Cordoba)", *7th X Congreso nacional sobre métodos numéricos y sus aplicaciones X ENIEF, San Carlos de Bariloche, 1997*.
- [11] Mellor, G. L. "Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model". *Puede encontrarse en el sitio del POM www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/, 1997.*
- [12] Tennessee Valley Authority, "Heat and mass transfer between a water surface and the atmosphere", *TVA Report No, 0-68003, 1972*.