

## **SIMULACION NUMERICA DE PROBLEMAS CON ESCALAS TEMPORALES DISIMILES: CRECIMIENTO DE UNA BARRA DE SEDIMENTACION**

**Angel N. Menéndez, Roberto Castellano**  
Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA)  
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina

### **RESUMEN**

Se presenta una metodología para simular numéricamente el crecimiento de una barra de sedimentación en un estuario, generada por la construcción de una isla artificial. Se tiene en cuenta el régimen impermanente producido por la marea y el carácter fino del sedimento. Dado lo disímil entre las escalas temporales hidrodinámicas y de evolución morfológica, se plantea una técnica en la cual se determinan y ensayan escenarios de marea medio anuales. Luego de cada actualización de la morfología se vuelven a calcular las condiciones hidrodinámicas, hasta llegar al estado final de equilibrio. Se utilizan un modelo hidrodinámico y uno sedimentológico de tipo bidimensional, previamente desarrollados. También se incluye el efecto de las olas. La metodología se aplica a las islas artificiales diseñadas para proteger las pilas del puente principal del proyecto de conexión física Buenos Aires-Colonia, sobre el Río de la Plata.

### **INTRODUCCION**

La introducción de obstáculos en un curso de agua produce una perturbación del campo de velocidades que se traduce en una variación del transporte de sedimentos y, en consecuencia, en un cambio morfológico del fondo en su entorno. En el caso de pilas de puentes, se genera un vórtice en herradura que produce un foso de erosión. Pero cuando las dimensiones del obstáculo son grandes, como en el caso de una isla artificial, se inhibe la formación de ese vórtice, predominando los torbellinos de eje vertical y conduciendo a un problema de sedimentación. Es posible, entonces, efectuar una descripción bidimensional horizontal del flujo para predecir tanto la hidrodinámica como el proceso sedimentológico que lleva a la formación de la barra.

Ahora bien, las escalas temporales de variación hidrodinámica de un curso de agua son, en general, mucho mayores que las morfológicas. En efecto, las primeras están determinadas por el régimen hidrológico de los aportes (escala estacional) o, en el caso de estuarios, por la marea (escala diurna). En cambio, las escalas de tiempo morfológicas son del orden de décadas o, incluso, seculares. Entonces, la simulación continua del proceso, resolviendo las escalas hidrodinámicas, no es viable con los equipos computacionales usualmente disponibles, debiéndose recurrir a tratamientos simplificados. En el presente trabajo se presenta una metodología para efectuar la simulación del crecimiento y estabilización de la barra de sedimentación en el caso de un estuario (régimen de mareas) donde el sedimento es fino.

### **METODOLOGIA DE SIMULACION**

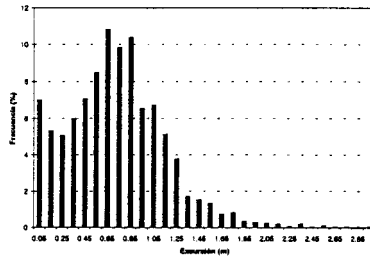
La metodología desarrollada para la simulación se basa en la definición de dos escenarios medios de marea:

- Un "escenario medio de deposición", con una excursión (altura entre pleamar y bajamar) tal que la sedimentación anual asociada es equivalente a la producida por la distribución estadística

completa (en la figura 1 se muestra la estadística para Buenos Aires), directamente calculable para el flujo no perturbado.

- Un "escenario medio de erosión", con una excursión tal que la erosión/resuspensión anual asociada es equivalente a la producida por la distribución estadística completa (en realidad, por la parte de la distribución por sobre un valor umbral asociado a la velocidad crítica de erosión).

Figura 1 Estadística de excursiones de marea en Buenos Aires



Se utilizó un modelo hidrodinámico bidimensional típico, motorizado por la marea. Las conocidas ecuaciones para aguas poco profundas fueron resueltas numéricamente mediante un método de diferencias finitas implícito de direcciones alternadas. Los detalles del modelo se presentan en otra publicación [1]. El campo de olas se representó en base a la solución cerrada de MacCamy & Fuchs [2] para un cilindro vertical circular. Se definieron dos tipos de escenarios de olas:

- Escenario de ola normal, representativo de condiciones medias.
- Escenario de ola eventual, representativo de condiciones de tormenta.

Se consideraron dos escenarios de ola normal, ambos con una altura de ola de 0.30 m y un período de 3 segundos, pero difiriendo en la dirección de acción: uno desde el SE y otro desde el NE.

El modelo sedimentológico se construyó combinando fórmulas de deposición y de resuspensión para sedimentos finos, aplicadas localmente. La tasa de deposición se calculó con la fórmula [3]:

$$D = -w_s c \left[ 1 - \left( \frac{u_*}{u_{*d}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

donde  $u_*$  es la velocidad de corte (debida a corrientes y olas),  $u_{*d}$  su valor crítico de deposición,  $w_s$  la velocidad de caída media del sedimento y  $c$  la concentración de sedimento cerca del fondo (o su valor medio vertical para distribuciones cuasi-uniformes, como en el presente caso). Para la tasa de deposición de un depósito de barro apenas consolidado puede utilizarse la siguiente expresión [3]:

$$E = M \left[ \left( \frac{u_*}{u_{*e}} \right)^2 - 1 \right] \quad (2)$$

donde  $u_{*e}$  es la velocidad de corte crítica de erosión y  $M$  el factor de erosibilidad.

La topografía del fondo fue actualizada utilizando la tasa neta de deposición de un ciclo de mareas:

$$\frac{dz_b}{dt} = D - E \quad (3)$$

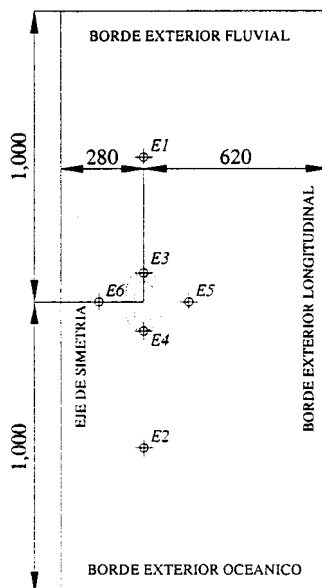
La ecuación (3) fue integrada por un método explícito. El paso de cálculo temporal fue elegido de modo tal que la profundidad mínima en el dominio de cálculo variara un porcentaje prefijado.

### IMPLEMENTACION PARA EL RIO DE LA PLATA

La perturbación que produce la introducción del obstáculo en la corriente de agua se extiende radialmente en forma significativa sobre una distancia igual a unas pocas veces sus dimensiones horizontales. Para modelar numéricamente el flujo las fronteras exteriores del dominio de cálculo deben elegirse lo suficientemente lejanas al obstáculo como para poder considerar que esa perturbación es despreciable. De todos modos (y afortunadamente), la adaptación de la hidrodinámica a las condiciones locales son lo suficientemente rápidas como para que el efecto del detalle de las condiciones de borde sólo se sienta hasta una distancia de unas pocas celdas de cálculo.

La base de las islas de protección de las pilas principales del puente principal de la conexión Buenos Aires-Colonia tendrá 200 m de largo y 116 m de ancho, con una pendiente de 1:2.75, en una región donde la profundidad media es de alrededor de 10 m. El nivel del fondo alrededor de las islas es lo suficientemente plano como para poder ser considerado horizontal. En consecuencia, teniendo en cuenta que la velocidad de flujo es esencialmente normal a la línea de la conexión, el problema puede ser considerado simétrico con respecto a la línea de corriente intermedia entre ambas islas, por lo que el problema sólo debe ser resuelto en la mitad del dominio. El borde constituido por el eje de simetría yace a 280 m desde el centro de la isla. Las tres fronteras restantes del dominio de cálculo se localizaron a una distancia igual a 5 veces la longitud de la isla en la dirección respectiva, es decir, a 1000 m en la dirección longitudinal (relativa a la corriente) y 600 m en la dirección transversal, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2 Dominio de cálculo  
(dimensiones en metros)



El paso de discretización espacial tomado fue de  $\Delta x = \Delta y = 20$  m, de modo que la isla fue representada por 6 celdas en la dirección transversal y 10 celdas en la longitudinal. La malla resultó de  $45 \times 100$  celdas.

El paso de tiempo fue elegido de modo de representar correctamente la propagación de la onda de marea, cuya celeridad es de alrededor de 10 m/s en el área de estudio; en consecuencia, resultó  $\Delta t = 2$  segundos. Esto significa que se necesitaron 21.600 pasos de cálculo para completar un ciclo de 12 horas, lo que tomó un tiempo de cálculo de alrededor de 7 horas en una PC Pentium de 250 MHz.

Sobre los dos bordes laterales las condiciones de contorno fueron  $v = 0$  (impenetrabilidad) y  $\partial u / \partial n = 0$  (libre deslizamiento), donde  $v$  es la velocidad normal,  $u$  la tangencial y  $n$  la dirección de la normal. Para el resto de las fronteras exteriores se impusieron las siguientes condiciones:

- Borde oceánico: onda de marea asociada al escenario específico.

- Borde fluvial: la misma onda de marea, pero desfasada (200 segundos) y con un incremento en el nivel medio del agua (0,6 mm) que produce una corriente neta hacia el océano igual a la corriente de deriva.

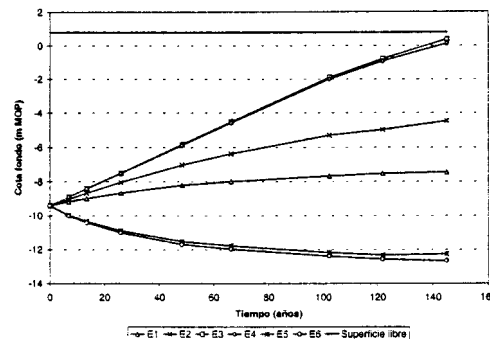
La especificación de la onda de marea en ambos bordes fue realizada mediante la serie temporal de la velocidad asociada. Se consideró que el caudal a través de este corredor de flujo se mantenía igual al de la situación en ausencia de isla, independientemente de la presencia de la isla y de la evolución de la barra. Esto no es exactamente correcto, ya que hay una diversión de parte del flujo hacia afuera del corredor. No obstante, la existencia del resto de la conexión impone un límite a esta diversión. Ante la incertidumbre sobre cuan importante es esa parte, se impuso la hipótesis de ausencia de diversión, en el entendimiento que es conservativa desde el punto de vista del cálculo de las erosiones.

Para las velocidades críticas de deposición y erosión se utilizaron, respectivamente, los valores 0,8 y 1,8 cm/s, obtenidos de experimentos de laboratorio para los barros del río Támesis y de la bahía de San Francisco [4]. El diámetro medio de las partículas se tomó de 5  $\mu\text{m}$  y la concentración en 150 mg/l. El coeficiente de erosibilidad fue utilizado como un parámetro de calibración, de modo que, en ausencia de isla, la tasa de erosión balanceara exactamente a la de deposición, ya que las observaciones indican la ausencia de sedimentación verificable en el área de estudio. De esta manera se obtuvo el valor  $M = 11,2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ , que cae dentro del rango de valores prácticos informados en la literatura, lo que agrega confiabilidad a la metodología de calibración utilizada.

## RESULTADOS

La introducción de la isla produce una disminución de la velocidad de la corriente en sus dos frentes y un incremento compensatorio en la zona lateral. En consecuencia, habrá sedimentación neta en ambas zonas frontales y erosión neta en las laterales. Esto conduce a un patrón morfológico compuesto por dos barras longitudinales que arrancan desde cada uno de los dos frentes de la isla y fosos de erosión a ambos lados de la isla. La barra que se extiende hacia el océano será más larga y más alta debido a la corriente de deriva, que impone un patrón de corrientes asimétrico, con una acción más persistente e intensa sobre la barra fluvial. Las olas esencialmente limitan la altura de las crestas de las barras adyacentes a los frentes de la isla.

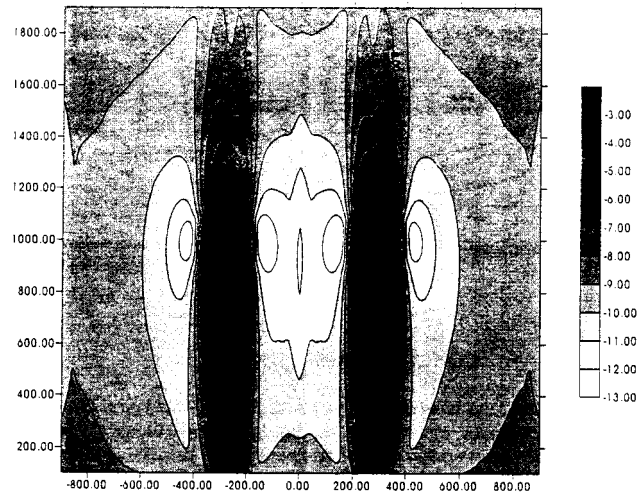
Figura 3 Evolución de la cota de fondo en las estaciones de seguimiento



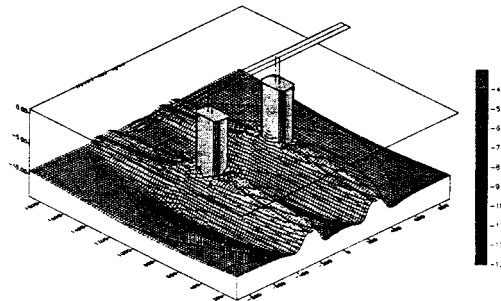
El proceso evoluciona hasta que las formas se estabilizan. Esto llevó 7 pasos de cálculo morfológico, representando un tiempo total de 1½ siglos (a razón de un valor medio de 20 años por paso). La figura 3 muestra la evolución del nivel del fondo en 6 estaciones diferentes (identificadas en la figura 2) cuando no se tiene en cuenta la acción del oleaje. Se observa claramente la tendencia hacia la estabilización, excepto por las crestas de la barra, que alcanzan la superficie libre.

Cuando se incluye la acción de las olas, la altura de la barra disminuye. La figura 4 presenta una vista en planta de la morfología final del fondo cuando se consideran olas desde el SE. Una vista tridimensional se muestra en la figura 5.

*Figura 4 Morfología final del fondo bajo la acción de olas del SE*



*Figura 5 Vista tridimensional de la morfología final de fondo con olas del SE*



Resultados similares se obtienen con olas del NE. En las figuras 7 y 8 se muestran cortes verticales longitudinales y transversales del fondo luego de la estabilización, donde el caso sin oleaje también ha sido incluido para comparación. La morfología de equilibrio real debería caer entre los dos patrones correspondientes a olas del SE y del NE.

A partir de estos resultados, se concluyó que la longitud de las barras serán de entre 1 y 3 km y que su altura máxima estará comprendida entre 3 y 6 m, en la adyacencia de los frentes de la isla.

Figura 6 Cota de fondo a lo largo del eje longitudinal de la isla

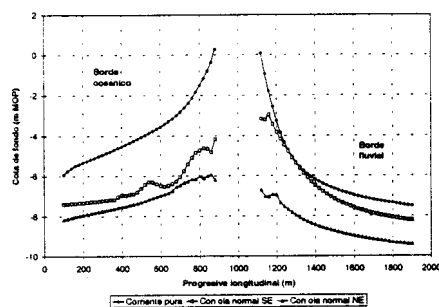
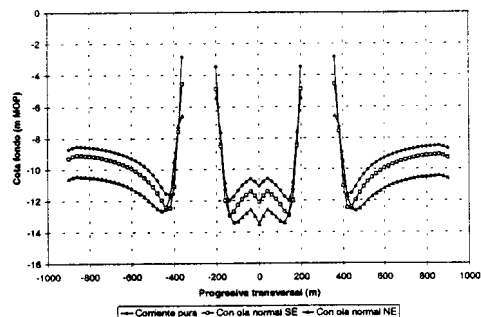


Figura 7 Cota de fondo a lo largo del eje transversal de las islas



## CONCLUSIONES

La metodología planteada para circunvalar la dificultad que plantea la existencia de escalas temporales disímiles en un problema de evolución morfológica ha mostrado ser efectiva, conduciendo a soluciones plausibles con tiempos de procesamiento computacional manejables. En particular, permitió efectuar estimaciones de las barras de sedimentación que generarían en el Río de la Plata la implantación de islas de protección alrededor de las pilas del puente principal del proyecto de conexión física Buenos Aires-Colonia.

## REFERENCIAS

- [1] Menéndez, A. N., "Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos", *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, vol. 6, 1, 1990.
- [2] MacCamy, R.C., R.A. Fuchs, "Wave Forces on Piles. A Diffraction Theory", *U.S. Army Corps of Engineers*, Beach Erosion Board, Tech. Mem. N° 69, 1954.
- [3] van Rijn, Leo, "Handbook of sediment transport by current and waves", *Delft Hydraulics*, 1993.
- [4] Harrison, A.J.M., M.W. Owen, "Siltation of fine sediments in estuaries", *IAHR XIV Congress*, 1971.