

UN MODELO ANALÍTICO PARA LA VARIACIÓN TRANSVERSAL DE LA CIRCULACIÓN EN ESTUARIOS ASOCIADA A CAMBIOS EN LA BATIMETRÍA

Jorge O. Pierini¹ y Claudia G. Simionato²

¹Instituto Argentino de Oceanografía IADO/CONICET y Comisión de Investigaciones Científicas CIC. Casilla de Correos N° 804. 8000 Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina. jpierini@criba.edu.ar

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera CIMA/CONICET-UBA y Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires Ciudad Universitaria Pab. II Piso 2 - C1428EHA Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. claudias@at1.fcen.uba.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar la variación transversal del flujo en estuarios asociada a cambios en la batimetría por medio del análisis de modelos conceptuales bidimensionales en los que se considera la respuesta de las corrientes a la acción de diversos forzantes externos. Estos se aplicaron sobre dos tipos de secciones transversales de estuarios diferentes: uno con una sección rectangular y otro con una sección característica del estuario de Bahía Blanca, con una planicie de marea. Se analizó la respuesta de estos estuarios bajo la acción de los forzantes más importantes: la estructura de densidad, la acción de un viento local y finalmente un forzante remoto. Los modelos conceptuales presentados indican que los mecanismos de forzante analizados producen una circulación que es fuertemente dependiente de la batimetría. Para estuarios con estructura batimétrica transversal no uniforme, la respuesta a los forzantes tampoco es uniforme en esta dirección. Sin embargo, para una configuración batimétrica dada, las soluciones pueden ser normalizadas independizándolas de la intensidad del forzante. Por lo tanto, para una configuración batimétrica dada, una vez integrada la ecuación sólo es necesario un dato de velocidad a una cierta profundidad para hacer una estimación razonable de las corrientes en todos los niveles. Cuando los mecanismos de forzante actúan combinados, pueden reforzarse o contrarrestarse mutuamente. Nuestro análisis indica que las variaciones en la batimetría a través del estuario y son muy importantes para la creación de variaciones transversales en el patrón de corrientes. Sin embargo, este tipo de variaciones podría ser difícil de detectar en la naturaleza debido a la superposición de efectos. Estas variaciones laterales de la velocidad podrían tener importantes implicancias en el mantenimiento del transporte residual y el balance de salinidad dentro del estuario.

Palabras clave: modelos analíticos - estuarios - circulación transversal.

ABSTRACT

The aim of this paper is to evaluate the lateral variations of the flow in estuaries related to changes in the bathymetry, by means of the analysis of conceptual bidimensional models in which the response to the currents to different external forcings is considered. These models are applied to two kind of estuaries: one with a rectangular bathymetry section and the other one with a section that is characteristic of the estuary of Bahía Blanca, including a tidal flat. The response to the most important forcings is analyzed. These forcings are the density structure, the action of a local wind and a remote forcing. The analytical models indicate that the analyzed

forcings produce a circulation that strongly depends upon the topography. For estuaries with a non-uniform transversal topographic structure, the response is non-uniform in that direction as well. Nevertheless, for a given bathymetry, the solutions can be normalized and made independent of the intensity of the forcing. Therefore, once the equation has been integrated for a given bathymetry, only one velocity data at some depth is needed to make a reasonable estimation of the currents at any level. When the different forcings act together they can either reinforce or debilitate each other. Our analysis indicates that the topography variations across the estuaries are very important in the creation of transversal variations of the current pattern. Nevertheless, due to the superposition effects, it might be difficult to observe this kind of variations in nature. These velocity variations might have important implications in the maintenance of the residual transport and salinity balance in the estuaries.

Key words: analytical models - estuaries - transversal circulation.

1. INTRODUCCION

Muchos mecanismos son responsables de la generación de circulación residual en estuarios. Estos procesos, que operan en frecuencias submareales, son importantes en los transportes de sedimento en suspensión y en la distribución de las variables hidrográficas dentro de los estuarios.

Entre los principales forzantes de movimiento submareal se encuentra la circulación gravitacional, inducida por el gradiente de densidad longitudinal típico de estuarios. Como estos movimientos son inherentemente tridimensionales, la mayoría de los trabajos se han enfocado sobre la variación axial, es decir longitudinal y vertical, de las corrientes a través de observaciones y modelos esencialmente unidimensionales. Los primeros estudios de este tipo demostraron que la circulación producida por el gradiente de densidad es el mayor contribuyente al flujo residual dentro de un estuario, y sugieren que el agua relativamente dulce sale del estuario por una capa superficial mientras que el agua salada ingresa al mismo por una capa en el fondo. Este comportamiento produce en el estuario una estructura halina de dos capas en la columna de agua (Pritchard, 1952, 1956; Hansen y Rattray, 1965). Circulación residual puede ser generada, además, por la acción de otros forzantes, como el viento, la presión atmosférica, ingreso de agua dulce y fluctuaciones del nivel del mar (Kjerfve *et al.*, 1978).

Los estuarios presentan, además de variaciones verticales, variaciones laterales en la circulación. Estas afectan significativamente el balance de sal (Dyer, 1974, 1997). Observaciones efectuadas por Kjerfve (1978, 1979, 1986, 1989) sugieren que esta variación lateral de las corrientes está asociada a los cambios laterales en la batimetría que presentan los estuarios en la naturaleza. Una herramienta útil para examinar los mecanismos que explican esta variación transversal del flujo en los estuarios son los modelos conceptuales. Si se quiere estudiar la circulación lateral inducida por la marea bajo la influencia de una batimetría compleja no se puede, evidentemente, utilizar modelos unidimensionales (Officer, 1976).

El objetivo de este trabajo es evaluar la variación transversal del flujo en estuarios asociada a cambios en la batimetría por medio del análisis de modelos teóricos conceptuales simples bidimensionales en los que se considera la respuesta de las

corrientes a la acción de diversos forzantes externos. Estos se aplicaron sobre dos tipos de secciones transversales de estuarios diferentes: uno con una sección rectangular y otro con una sección característica del estuario de Bahía Blanca, con una planicie de marea. Se analizó la respuesta de estos estuarios bajo la acción de los forzantes más importantes: la estructura de densidad, la acción de un viento local y finalmente un forzante remoto. Estos modelos se presentan en la sección 2, mientras que en la sección 3 se discuten los resultados.

2. MODELO CONCEPTUAL

2.1 Circulación Gravitacional

Sea un estuario cualquiera, como el que esquemáticamente se muestra en la figura 1. La ecuación más sencilla para modelar el balance de cantidad de movimiento longitudinal suponiendo circulación gravitacional es la que representa un balance entre el gradiente de presión horizontal promediado a lo largo de un ciclo de marea y el esfuerzo de corte vertical asociado con la circulación gravitacional, es decir:

$$-\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + K \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

donde ρ_0 es la densidad media, P la presión, K la viscosidad turbulenta que se supone constante y U la componente longitudinal de la circulación gravitacional. x es considerado positivo hacia la boca del estuario y z positivo hacia el fondo (figura 1).

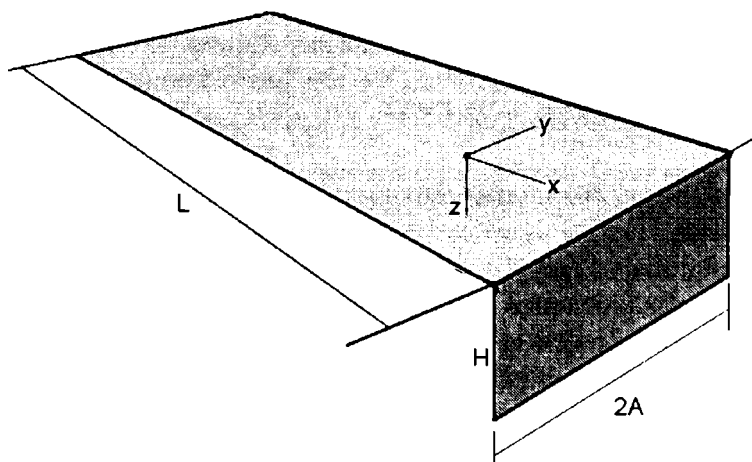


Figura 1: Diagrama esquemático de un estuario, con profundidad constante H y ancho 2A. La figura muestra además la definición de los ejes de coordenadas.

El gradiente de presión horizontal puede dividirse en una componente baroclínica y otra barotrópica de la siguiente manera:

$$-\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \cdot z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2)$$

donde η es la elevación de la superficie y $\partial\rho/\partial x$ es el gradiente de densidad horizontal a lo largo del estuario. Por simplicidad supondremos que este gradiente es independiente de la profundidad. Reemplazando (2) en (1) y derivando con respecto a z , se obtiene:

$$-\frac{g}{\rho_0} \cdot z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + K \cdot \frac{\partial^3 U}{\partial z^3} = 0 \quad (3)$$

Consideramos inicialmente como primera aproximación un estuario cuya sección es rectangular, con una profundidad H y un ancho $2A$ (figura 1). En este caso pueden imponerse las siguientes condiciones de borde simples:

- no hay viento actuando en la superficie,
- no hay adherencia el fondo,
- conservación de masa.

Matemáticamente estas condiciones pueden escribirse, respectivamente, como:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z=0 \quad (4a)$$

$$U=0 \quad \text{en } z=H \quad (4b)$$

$$\int_0^H U \cdot dz = 0 \quad (4c)$$

Integrando la ecuación (3) con las condiciones de contorno (4) se obtiene la siguiente solución para el campo de velocidad en el estuario:

$$U(z) = \frac{g}{\rho_0 \cdot K} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \left[\frac{z^3}{6} - \frac{3}{16} \cdot H \cdot z^2 + \frac{H^3}{48} \right] \quad (5)$$

Dado que la salinidad se incrementa hacia el fondo $\partial\rho/\partial x$ es positivo. Además, el ancho del estuario, A , y la profundidad, H , son constantes. Por tanto, dividiendo la ecuación (5) por la velocidad en la superficie $U(0)$, es posible obtener una distribución normalizada para la circulación gravitacional para esta configuración geométrica del estuario, dada por:

Un modelo analítico para la variación transversal de la circulación...

$$\frac{U(z)}{U(0)} = 8 \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^3 - 9 \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^2 + 1 \quad (6)$$

Nótese que esta distribución resulta independiente del gradiente de salinidad, es decir, de la intensidad del forzante. La distribución normalizada de la circulación gravitacional a lo largo de una sección transversal del estuario se muestra en la figura 2. Teniendo en cuenta que los flujos son positivos hacia la boca del estuario y negativos hacia la cabecera del mismo, la figura 2 exhibe un patrón de circulación que es consistente con la circulación gravitacional descrita por Hansen y Rattray (1965) a partir de un modelo de 2 capas. El agua dulce sale del estuario por la parte superior y el balance de masa es mantenido por agua salada que ingresa por la parte inferior.

Sin embargo, y especialmente para estuarios con morfologías como el estuario de Bahía Blanca, una sección rectangular constituye una aproximación muy simple del mismo. En estos casos la sección transversal está frecuentemente caracterizada por la presencia de canales profundos en el centro y de menor profundidad a lo largo de la costa. Las ecuaciones mostradas indican que el patrón de circulación se modifica en caso de variaciones batimétricas a través del estuario.

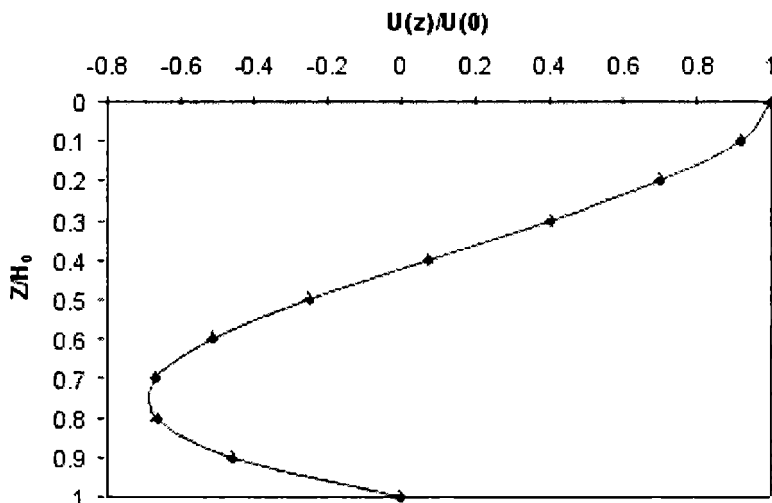


Figura 2: Perfil vertical de la circulación gravitacional normalizada en un estuario con sección una transversal rectangular como el de la figura 1.

Una aproximación más realista a la morfología de los canales de este tipo sería una sección transversal cuya profundidad sea proporcional a una función coseno cuadrado. Esta aproximación, que se muestra en la figura 3, incluye asimismo una representación simple de las planicies de marea. Sea $2A$ el ancho del estuario y H la profundidad máxima en el centro del mismo. Para un estuario con estas características, la ecuación de balance de cantidad de movimiento (3) y las condiciones de borde (4a) y (4b) siguen

siendo válidas. Sin embargo, la ecuación de continuidad debe modificarse de la siguiente manera:

$$\int_{-A}^A \int_0^H U \cdot dz \cdot dy = 0 \quad (7)$$

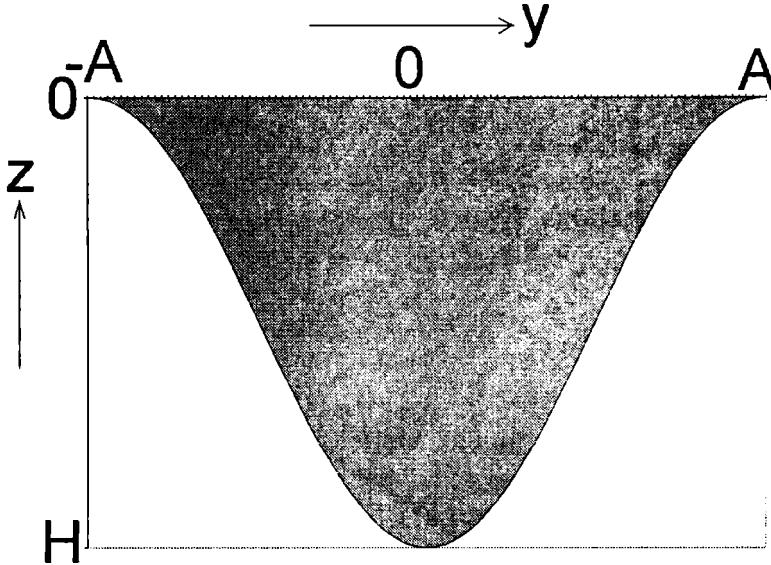


Figura 3: Sección transversal de un estuario cuya profundidad es proporcional a una función coseno cuadrado, incluyendo una planicie de marea

Teniendo en cuenta que H por definición es función de la profundidad y según:

$$H(y) = H_0 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A}\right) \quad (8)$$

e integrando la ecuación (3) con las condiciones (4a), (4b), (7) y (8) puede obtenerse una solución para el campo de velocidad en la región entre $y=0$ a $y=A$, y $z=0$ a $z=H$. Esta solución es;

$$\frac{U(z, y)}{A} = \frac{z^2}{6} - \frac{21 \cdot H}{64} \cdot \frac{z^2}{2} - H^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A}\right) \cdot \left[\frac{\cos^2\left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A}\right)}{6} - \frac{21}{128} \right] \quad (9)$$

Nuevamente, esta distribución puede normalizarse respecto de $U(0,0)$ independizando la estructura del patrón de corrientes, en este caso vertical y

Un modelo analítico para la variación transversal de la circulación...

transversal, de la intensidad del forzante. La figura 4 muestra la distribución analítica del campo velocidad normalizado a lo largo de una sección transversal al estuario.

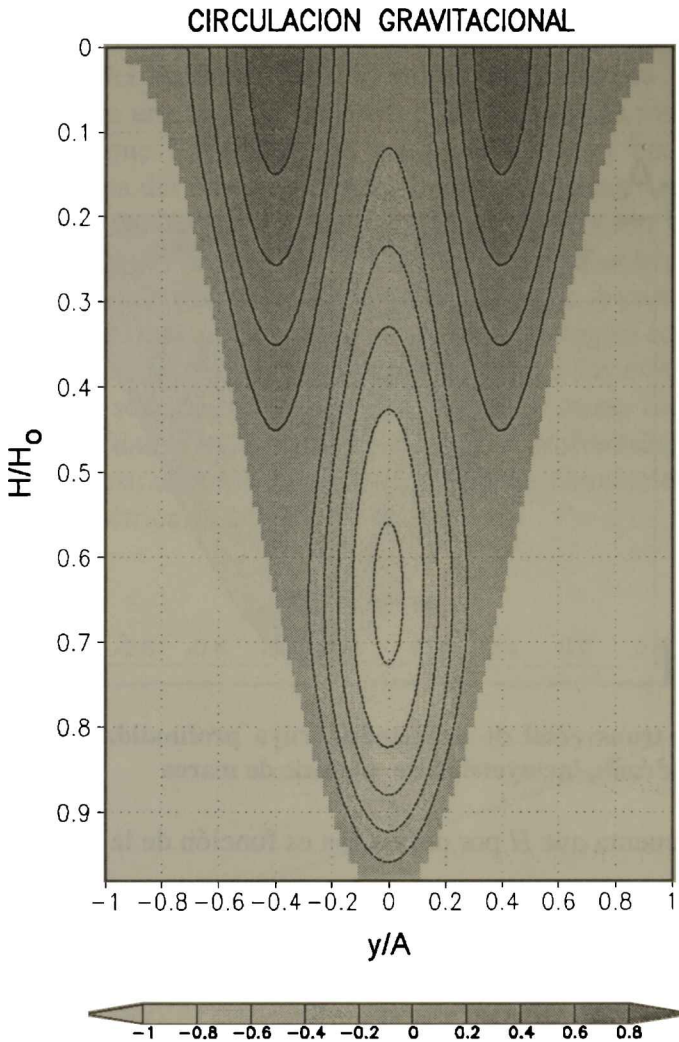


Figura 4: Sección transversal de la circulación gravitacional normalizada para un estuario con un perfil cuya profundidad es proporcional a una función coseno cuadrado

Nótese que la estructura del flujo es muy diferente de la obtenida para el caso de una sección transversal rectangular (figura 2). La circulación gravitacional está en este caso caracterizada por una estructura transversal y vertical, con ingreso de agua (valores negativos de velocidad) concentrados sobre el canal principal en el centro del estuario y egreso de agua (valores positivos de velocidad) en las áreas de menor profundidad a lo largo de las costas. Esto es causado por la dependencia de la profundidad del gradiente de presión baroclínico. Puede observarse, además, que el flujo se invierte con la profundidad.

Con estas condiciones de flujo, el ingreso de agua es asociado a altas concentraciones de salinidad. Por lo tanto, las ramas de baja salinidad a lo largo de la costa son separadas por aguas salinas en la porción central del estuario, donde el canal es más profundo. Esta distribución es cualitativamente consistente con la estructura transversal observada en el estuario de Bahía Blanca (Piccolo y Perillo, 1990, Pérez *et al.*, 1998, Perillo *et al.*, 1999), lo que sugiere que la misma puede ser característica en estuarios con esta morfología.

Este análisis conceptual evidencia la importancia de la variación de la batimetría sobre la circulación gravitacional en el estuario. En estos sistemas el balance de masa residual puede ser acompañado por una variación transversal de la corriente longitudinal además de la variación vertical de la misma. La presencia de grandes gradientes de salinidad y esfuerzos transversales en las corrientes también son importantes para el balance de sal en el estuario, principalmente por el aporte desde las planicies de marea.

2.2 Circulación Inducida por un viento local

El efecto de la atmósfera sobre los movimientos en baja frecuencia en estuarios ha sido estudiado en numerosos sistemas (Kjerfve *et al.*, 1978, 1986, 1989). Los eventos atmosféricos pueden producir variabilidad en la escala submareal por la acción del esfuerzo del viento sobre la superficie del estuario. Por otra parte, el esfuerzo del viento en la plataforma continental adyacente a un estuario puede también forzar al mismo a través de una suma de fluctuaciones submareales del nivel del mar en la boca del estuario.

La respuesta de un estuario a estos dos tipos de mecanismos de forzante atmosférico, especialmente la estructura transversal, puede ser bastante diferente y será analizada en las siguientes dos secciones.

Para el caso de un esfuerzo de viento local, la ecuación más sencilla de balance de cantidad de movimiento longitudinal es;

$$g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + K \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

En esta ecuación, por simplicidad, se ignora el gradiente de presión baroclínico. Condiciones de borde adecuadas para este caso son:

- esfuerzo del viento espacialmente uniforme en la superficie del estuario ($z=0$);
- no adherencia en el fondo ($z=H$);
- conservación de masa.

Matemáticamente pasa a,

$$\frac{\partial^3 U}{\partial z^3} = 0 \quad (11)$$

Un modelo analítico para la variación transversal de la circulación.,.

con

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\tau_s}{\rho_0 \cdot K} \quad \text{en } z=0 \quad (12a)$$

$$U=0 \quad \text{en } z=H \quad (12b)$$

$$\int_{-A}^A \int_0^H U \cdot dz \cdot dy = 0 \quad (12c)$$

En el caso de un estuario con sección rectangular (figura 1), la solución de la ecuación (11), con las condiciones de contorno (12a), (12b) y (12c) está dada por:

$$U(z) = \frac{\tau_s \cdot H}{\rho_0 \cdot K} \cdot \left[\frac{3}{4} \cdot \left(\frac{z}{H} \right)^2 - \left(\frac{z}{H} \right) + \frac{1}{4} \right] \quad (13)$$

Se observa en esta ecuación que la velocidad en la superficie ($U(0)$) tiene el signo de τ_s . Por lo tanto, el flujo superficial tiene la dirección del viento. La distribución normalizada respecto de $\frac{\rho_0 \cdot K}{\tau_s \cdot H}$, y por lo tanto independiente del valor del esfuerzo del viento, de la circulación inducida por el viento para un estuario con profundidad H y ancho A constantes se muestra en la figura 5. Los valores positivos indican un flujo en la dirección del viento y los negativos en dirección opuesta.

Cuando la variación transversal de la profundidad no es tomada en cuenta, la circulación inducida por el viento muestra una estructura de 2 capas. En la capa superior el flujo es en la dirección del viento y en la inferior en sentido opuesto al mismo.

Para el caso más realista de un estuario con variación transversal de la profundidad proporcional a un coseno cuadrado con planicie de marea (figura 3) la ecuación para la corriente resulta:

$$U(y, z) = \frac{\tau_s \cdot H_0}{\rho_0 \cdot K \cdot 10} \cdot \left[9 \cdot \left(\frac{z}{H_0} \right)^2 - 10 \cdot \left(\frac{z}{H_0} \right) + 10 \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A} \right) - 9 \cdot \cos^4 \left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A} \right) \right] \quad (14)$$

en el dominio $y=0$ a $y=A$. La solución entre $y=0$ a $y=-A$ es simétrica a la ecuación (14).

Como $U(0,0) = \frac{\tau_s \cdot H_0}{\rho \cdot K \cdot 10}$, el flujo en superficie tiene la dirección del viento. Estas

soluciones se muestran en la figura 6 normalizadas respecto de $U(0,0)$ e independizadas por lo tanto del esfuerzo del viento. Para esta configuración batimétrica, el movimiento forzado por el viento exhibe una fuerte estructura transversal. En las regiones de menor profundidad, a lo largo de toda la costa, el flujo

es en la dirección del viento a lo largo de toda la columna de agua. El balance de masa resulta de una corriente de retorno, con dirección opuesta a la del viento, que se concentra en la parte más profunda del canal.

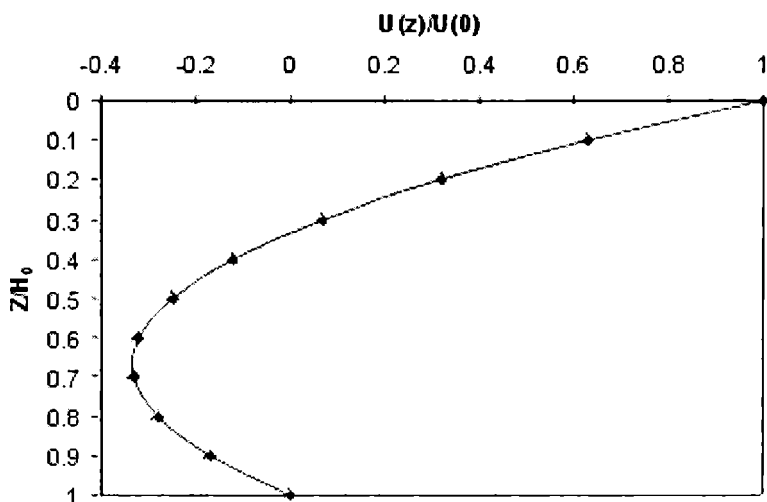


Figura 5: Perfil vertical de la circulación inducida por un viento local normalizada en un estuario con sección transversal rectangular como el de la figura 1.

2.3 Circulación inducida por un forzante remoto

Un estuario puede ser forzado remotamente por el viento a través de las fluctuaciones del nivel del mar que éste introduce en la boca del mismo. La propagación de una onda libre que ingresa en el estuario desde la plataforma produce un forzante equivalente. Para este sistema la ecuación de cantidad de movimiento en dirección longitudinal al estuario puede ser descripta por las ecuaciones (10) y (11), con las siguientes condiciones de borde:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z=0 \quad (15a)$$

$$U=0 \quad \text{en } z=H \quad (15b)$$

$$\int_{-A_0}^A \int_0^H U \cdot dz \cdot dy = -S \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (15c)$$

es decir:

- esfuerzo espacialmente uniforme en la superficie del estuario ($z=0$),
- no adherencia en el fondo ($z=H$)
- continuidad

respectivamente. En este caso, una aproximación razonable a la ecuación de continuidad es suponer que el flujo volumétrico total a través de la boca del estuario debe ser igual al área superficial del estuario (S) multiplicada por la tasa de cambio del nivel del mar (η).

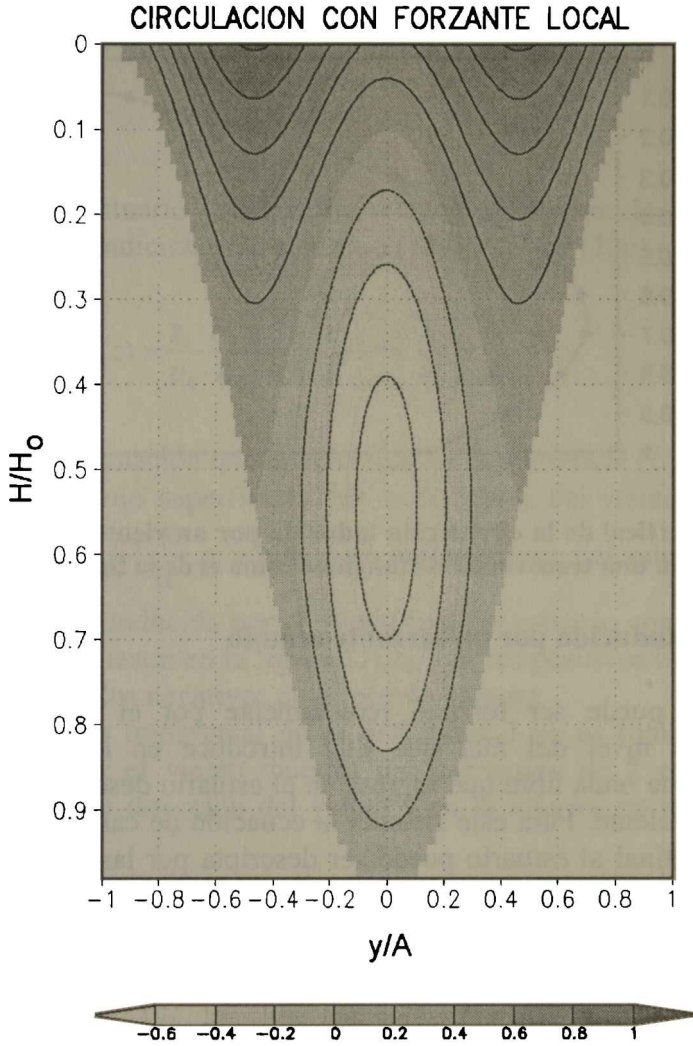


Figura 6: Sección transversal de la circulación normalizada forzada por un viento local para un estuario con un perfil cuya profundidad es proporcional a una función coseno cuadrado.

Para un estuario con una sección transversal rectangular con profundidad H y ancho $2A$ constantes (figura 1), puede demostrarse que el perfil de velocidad para el caso estacionario tiene la siguiente forma:

$$U(z) = \frac{3}{4} \cdot \frac{S}{H} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} \cdot \left[\left(\frac{z}{H} \right)^2 - 1 \right] \quad (16)$$

En la superficie la corriente es $U(0) = -\frac{3}{4} \cdot \frac{S}{H} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t}$. Si, $\frac{\partial \eta}{\partial t} > 0$ entonces la corriente superficial $U(0)$ es negativa, indicando un flujo de corriente hacia adentro del estuario. La distribución normalizada de la circulación inducida por el viento $U(z)/U(0)$ se muestra en la figura 7. Nótese que para esta batimetría la corriente más intensa ocurre en la superficie y no se produce inversión de flujo con la profundidad.

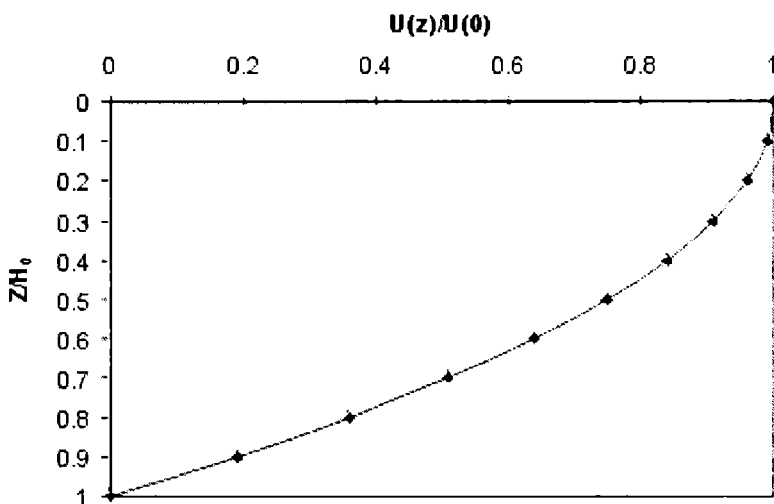


Figura 7: Perfil vertical de la circulación normalizada producida por un forzante remoto en un estuario con sección una transversal rectangular como el de la figura 1.

Para el caso de un estuario con una sección transversal como el de la figura 3, el flujo resulta;

$$U(y, z) = -\frac{S \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} \cdot \pi}{H_0 \cdot 2 \cdot A} \left[\cos^4 \left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot A} \right) - \left(\frac{z}{H_0} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Para y que varía entre 0 y A ; la solución entre 0 y $-A$ es simétrica a la anterior. Esta solución, normalizada respecto a $U(0,0)$ se muestra en la figura 8. En este caso la corriente superficial en el centro de la sección transversal es:

$$U(0,0) = -\frac{S \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} \cdot \pi}{H_0 \cdot 2 \cdot A} \quad (18)$$

La estructura de las corrientes en este caso (figura 8) resulta similar a la obtenida en el caso en que la sección transversal es rectangular (figura 7). Las corrientes

disminuyen en magnitud con la profundidad, encontrándose las corrientes más intensas sobre la sección más profunda del canal y las más débiles sobre las costas.

3. DISCUSIÓN y CONCLUSIONES

Los modelos conceptuales presentados indican que los mecanismos de forzante analizados (estructura de densidad, viento local y forzante remoto) producen una circulación que es fuertemente dependiente de la batimetría. Para estuarios con estructura batimétrica transversal no uniforme, la respuesta a los forzantes tampoco es uniforme en esta dirección.

Sin embargo, para una configuración batimétrica dada, las soluciones pueden ser normalizadas independizándolas de la intensidad del forzante. Este último resultado es interesante e indica la utilidad de este tipo de análisis. Puesto que las estructuras verticales/transversales de la corriente son independientes de la intensidad de los forzantes, para una configuración batimétrica dada, una vez integrada la ecuación sólo es necesario un dato de velocidad a una cierta profundidad para hacer una estimación razonable de las corrientes en todos los niveles. Si bien no se puede esperar que este tipo de modelos simples representen los detalles de las variaciones del flujo en estuarios con batimetrías complejas, los mismos pueden ser útiles para obtener estimaciones de ordenes de magnitud de la circulación residual y de variaciones transversales de la circulación inducidas por cada uno de los mecanismos de forzado.

Cuando los mecanismos de forzante actúan combinados, pueden reforzarse o contrarrestarse mutuamente. Por ejemplo para una configuración batimétrica razonablemente realista, el efecto gravitacional produce dos ramas de flujo a lo largo de cada una de las costas, separadas por una corriente en sentido opuesto (figura 4). Para la misma configuración, un esfuerzo de viento local produce dos ramas de flujo en la dirección del viento a lo largo de cada una de las costas y una corriente de retorno en dirección contraria a la del viento en el centro del canal (figura 6). Un viento local que sople hacia la boca del estuario tendrá entonces una tendencia a producir una circulación que se opone a la gravitacional a través de una sección transversal al estuario reduciendo de esta manera la circulación resultante. De la misma manera, si el viento sopla hacia la boca del estuario, su efecto tenderá a reforzar al gravitacional originando un aumento de los gradientes transversales. Los resultados de una interacción entre la circulación gravitacional (figura 4) y los efectos de una perturbación en la boca del estuario (figura 8) son bastante diferentes. Un aumento de estas fluctuaciones induce a un ingreso de agua mayor al estuario, el cual refuerza el ingreso de la salinidad por los canales más profundos y un reflujos a lo largo de las costas. Recíprocamente, una disminución de estas fluctuaciones genera el efecto opuesto.

Nuestro análisis indica que las variaciones en la batimetría a través del estuario, son muy importantes para la creación de variaciones transversales en el patrón de corrientes. Sin embargo este tipo de variaciones pueden ser difíciles de detectar en la naturaleza debido a la superposición de efectos. Estas variaciones podrían tener

importantes implicancias en el mantenimiento del transporte residual y el balance de salinidad dentro del estuario.

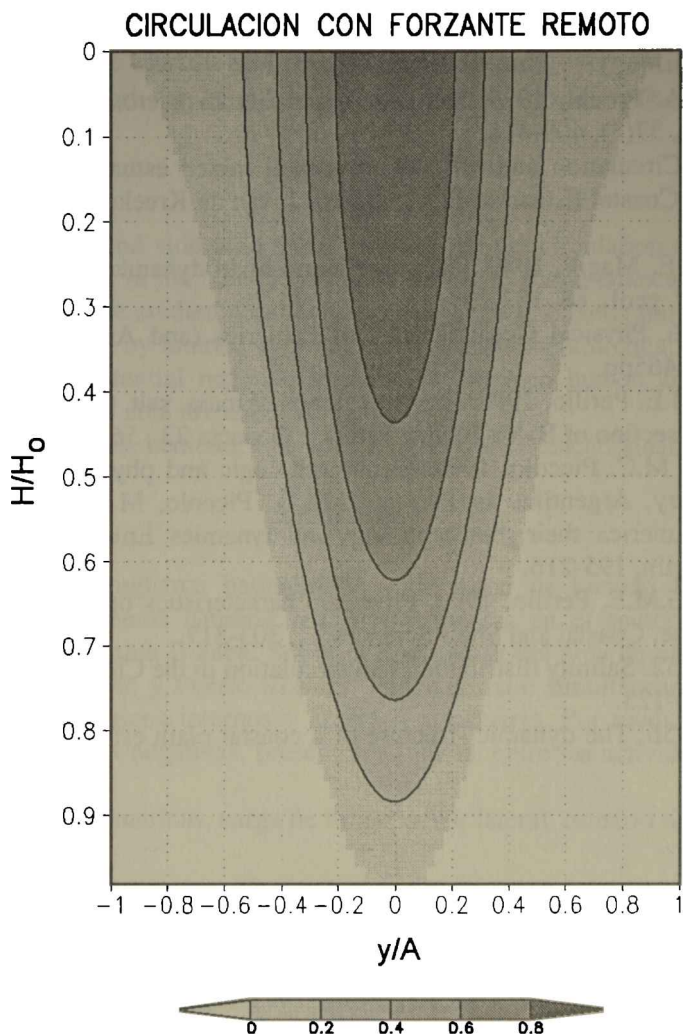


Figura 8: Sección transversal de la circulación normalizada producida por un forzante remoto en un estuario con un perfil cuya profundidad es proporcional a una función coseno cuadrado.

REFERENCIAS

- Dyer, K. R., 1974. The salt balance in stratified estuaries, *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, 2, 273-281.
- Dyer, K. R., 1997. *Estuaries: A physical Introduction*. 2n Edition. Dyer K.R. (Ed). J.Wiley, USA, 195pp.
- Hansen, D. V., and M. Rattray, 1965. Gravitation circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.*, 23, 104-122.

Un modelo analítico para la variación transversal de la circulación...

- Kjerfve, B., 1978. Bathymetry as an indicator of net circulation in web mixed estuaries. *Limnol. Oceanogr.*, 23(4), 816-821.
- Kjerfve, B., J. E. Greer and R. L. Crout, 1978. Low-frequency response of estuarine sea level to non-local forcing, in *Estuarine Interactions*, M. L. Wiley (Ed.), Academic, San Diego, Calif., 497-513.
- Kjerfve, B., and J.A. Proehl, 1979. Velocity variability in a cross section of a well-mixed estuary, *J. Mar. Res.*, 37(3), 409-418.
- Kjerfve, B., 1986. Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In *Physics of Shallow Estuaries and Bays*, Coastal Estuarine Stud., vol 16, J. van de Kreeke (Ed.), AGU, Washington, D.C.
- Kjerfve, B., and K. E. Magill, 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons, *Mar. geol.*, 88, 187-199.
- Officer, C. B., 1976. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*, J.Wiley, New York, 465pp.
- Pérez, D.E. and G.M.E. Perillo, 1998. Residual fluxes of mass, salt, temperature and suspended sediments through a section of Bahía Blanca Estuary. *Geoacta* 23 , 56-65.
- Perillo, G.M.E. and M.C. Piccolo, 1999. Geomorphologic and physical characteristics of the Bahía Blanca Estuary, Argentina. In Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C. and Pino Quivira, M., *Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics*. Environmental Science Series, Springer-Verlag, Berlin, 195-216.
- Piccolo, M.C. and G.M.E. Perillo, 1990. Physical characteristics of the Bahía Blanca estuary (Argentina). *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 31, 303-317.
- Pritchard, D. W., 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake estuarine system. *J. Mar. Res.*, 11, 106-123.
- Pritchard, D. W., 1956. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, 15, 33-42.