

# MODELOS MORFODINÁMICOS APLICADOS A LA GESTIÓN DE LAGUNAS LITORALES. EL CASO DE LA LAGUNA DE ROCHA

Manuel Teixeira, Sebastián Solari y Mónica Fossati

Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UDELAR, Uruguay.  
E-mail: mteixeira@fing.edu.uy, ssolari@fing.edu.uy, mfossati@fing.edu.uy

## Introducción

La Laguna de Rocha está ubicada en la costa atlántica de Uruguay, en el este del país ( $34^{\circ} 38' S$ ,  $54^{\circ} 17' W$ ). (Figura 1). Es parte de una serie de lagunas salobres caracterizadas por presentar una conexión intermitente con el Océano Atlántico, a través de una barra de arena, la cual se abre por causas naturales o por intervención humana. La Laguna de Rocha ha sido declarada como área natural protegida debido a su alta biodiversidad y alta productividad biológica. Fue declarada también Reserva de la Biósfera por MaB-UNESCO y ha sido incluida como sitio Ramsar.

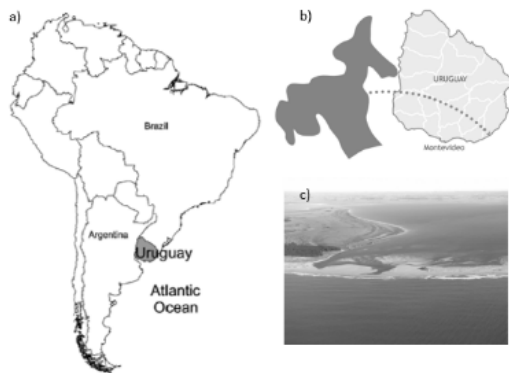


Figura 1.- (a & b) Ubicación de la Laguna de Rocha;  
(c) Boca de la laguna.

La Laguna de Rocha, por su conexión intermitente con el océano puede ser clasificada como Laguna Costera con Apertura y Cierre Intermitente (ICOLL por sus siglas en inglés). Esta es la denominación más utilizada internacionalmente para este tipo de cuerpos de agua (McSweeney, 2017). Según Haines (2006) también existen este tipo de lagunas costeras en las costas de Australia, Sudáfrica, México, Nueva Zelanda y Brasil.

La dinámica de la boca de la laguna y en particular el proceso de apertura, controla la interacción del sistema con el océano, y por lo tanto regula los flujos de agua, sustancias y organismos. Entender la apertura es esencial para el desarrollo de modelos numéricos que permitan entender el funcionamiento general de la laguna, necesarios para una adecuada gestión ambiental.

El proceso de apertura de la barra ha sido descrito y modelado por varios autores (Gordon, 1990; Strech y Parkinson 2006; Tuan 2007; Wainwright y Baldock, 2015). Varios de estos autores como Wainwright y Baldock (2015) y Tuan (2007) han desarrollado modelos numéricos para representar el proceso de apertura y en particular la variación de la morfología del canal de desembocadura. Strech y Parkinson (2006), realizaron modelos de apertura de lagunas costeras a escala de laboratorio, estudiando el efecto de diferentes volúmenes de almacenamiento en el proceso de apertura.

Otros autores como Rich (2013) y Smakhtin (2004), realizaron análisis a mayor escala del comportamiento de la desembocadura de la laguna, reproduciendo mediante balances de masa, la variación de nivel en la boca de la laguna a lo largo de un año e identificando eventos de apertura y cierre.

## Objetivos

El objetivo general del presente estudio es comprender y modelar los procesos físicos intervinientes en la interconexión de la Laguna de Rocha con el Océano Atlántico en diferentes escalas temporales y desarrollar un modelo de apertura y cierre que sirva como condición de borde para el desarrollo de modelos hidrodinámicos y de calidad de aguas de la Laguna de Rocha.

El presente estudio tiene tres objetivos específicos. En primer lugar, la generación de datos de campo en cantidad y calidad suficiente para la comprensión y modelado de los procesos de apertura y cierre de la laguna. En segundo lugar, desarrollar e implementar un modelo analítico, de bajo coste computacional, para predecir la apertura y cierre de la laguna en función de los forzantes externos (precipitación, viento, nivel de mar y oleaje) en escala temporal de días a años. Por último, implementar un modelo numérico hidro-morfodinámico de código abierto para analizar la evolución de la desembocadura en escala de horas a días. Este modelo permitirá parametrizar procesos de corta duración que no pueden ser modelados directamente en el modelo analítico, e incluir dichas parametrizaciones en el mismo.

## Metodología

La metodología de trabajo se divide en tres grandes bloques.

En primer lugar, con el fin de estimar los aportes fluviales a la laguna, de los cuales no hay información instrumental, se procedió a calibrar un modelo hidrológico de paso diario (GR4J Génie Rural à 4 paramètres Journalier, Perrin (2003)). Dada la ausencia de datos instrumentales que permitan calibrar y validar el modelo hidrológico, se utilizan los datos disponibles de nivel de agua en la laguna durante períodos de barra cerrada. De esta forma el modelo hidrológico se calibra para verificar el balance de masa en la laguna, asumiendo que la única fuente son los aportes fluviales y que el único sumidero es la evaporación.

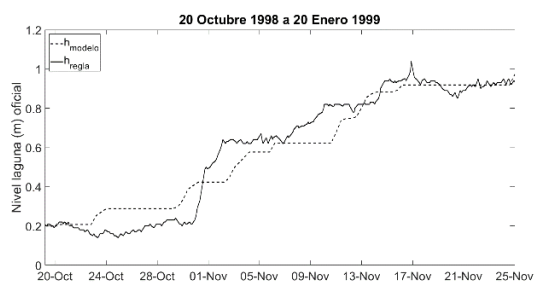
Una vez calibrado el modelo hidrológico se implementa el modelo numérico de código abierto Delft3D-Flow (Lesser, 2004) para modelar la apertura de la barra. El modelo resuelve mediante diferencias finitas las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles bajo las hipótesis de aguas someras, de Boussinesq y asumiendo presión hidrostática. Mediante la utilización del modelo se reproduce el proceso de apertura de la barra de la laguna, en particular la variación de la sección transversal del canal de la desembocadura. El dominio modelado es una idealización de la barra, en donde se imponen condiciones de nivel dentro y fuera de la laguna como condiciones de contorno. Se utilizó una malla cuadrada, con una resolución de celdas de 5 m en la zona de la desembocadura y de 30 m fuera de la boca. Nuevamente, a falta de medidas instrumentales que permitan calibrar el modelo, el mismo se ajusta de forma tal de respetar el balance de masa de la laguna, i.e. el caudal que sale durante el proceso de apertura debe cerrar el balance de masa, teniendo en cuenta aportes fluviales y evaporación. De forma complementaria, se realizó una campaña de medición en la barra. La campaña consistió en el aforo del canal de desembocadura mediante un perfilador acústico doppler de corriente (ADCP) y el relevamiento topográfico de

la zona de la boca de la laguna mediante la utilización de un GPS RTK.

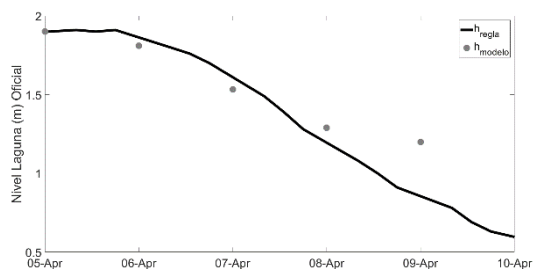
Por último, se implementa un modelo analítico para modelar de forma simplificada y con bajo costo computacional el proceso de apertura (ver e.g. Rich, 2013). Este modelo debe respetar el balance de masa y reproducir la geometría del canal de la barra según lo obtenido de la modelación numérica de detalle y de las campañas de campo.

## Resultados

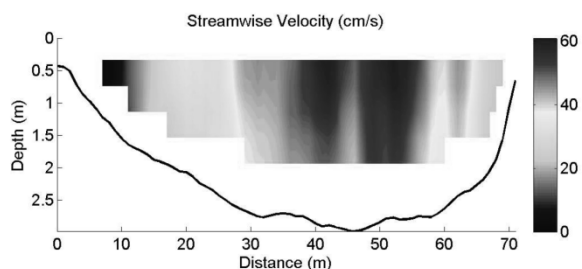
Se presentan a continuación, a modo de ejemplo, alguno de los resultados obtenidos. La figura 2 presenta la comparación entre los niveles registrados en la laguna y los obtenidos mediante el modelo hidrológico, con el procedimiento descrito en la metodología, para el período de barra cerrada del 20 de octubre de 1998 al 20 de enero de 1999. La figura 3 presenta la comparación de los niveles medidos en la laguna y los obtenidos de usar el balance de masa durante el proceso de apertura de la barra ocurrido entre el 5 y el 10 de abril de 2001, simulado con Delft3D. Por último, la figura 4 presenta el campo de velocidades y el perfil del fondo en una sección del canal de desembocadura, medidos con ADCP (RiverRay, Teledyne RDI).



**Figura 2.-** Comparación entre el nivel medido en la laguna y el nivel obtenido con el modelo GR4J para el período del 20 de octubre de 1998 al 20 de enero de 1999, en que la barra se encontraba cerrada.



**Figura 3.-** Comparación entre el nivel medido en la laguna, con el nivel obtenido a partir de los caudales del modelo numérico.



**Figura 4.-** Velocidad en el sentido del flujo para una sección del canal de desembocadura, registrada en la campaña de medición.

## Discusión y conclusiones

El desempeño del modelo hidrológico implementado es satisfactorio, lográndose en general reproducir adecuadamente los niveles registrados en la laguna durante eventos de precipitación ocurridos con barra cerrada (ver figura 2). Esto da confianza suficiente para usar este modelo en las etapas siguientes de la metodología (i.e. para implementar el balance de masa que sirve de base para evaluar el desempeño del modelo numérico).

En lo que respecta al modelo numérico, se observa que se reproducen adecuadamente las dimensiones del canal de la barra (comparación no incluida en el resumen), así como los caudales erogados en el modelo durante los primeros días de apertura (ver figura 3). Se observa sin embargo que a partir de cierto momento los niveles de la laguna estimados a partir del balance de masa, usando como fuente lo calculado con el modelo hidrológico y como sumidero los caudales erogados en el modelo numérico, se apartan de los medidos. Se considera que esta diferencia entre nivel modelado y medido puede deberse, al menos en parte, a la acción del viento (el nivel de la laguna se mide en un único punto, ubicado al sur, por lo que efectos de sobre-elevación producidos por viento no son detectables, aunque sí afectan el cierre del balance de masa), por lo que a futuro se tendrá en cuenta esta variable para corregir el balance de masa.

## Referencias bibliográficas

- Gordon, A.D. (1990). "Coastal lagoon entrance dynamics". *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Coastal Engineering Conference*, pp. 2880-2893.
- Haines, P. E., Tomlinson, R. B., and Thom, B. G. (2006). "Morphometric assessment of intermittently open/closed coastal lagoons in New SouthWales, Australia". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67:321-332.
- Lesser, G., Roelvink, J., Van Kester, J., Stelling, G., (2004). "Development and validation of a three-dimensional morphological model". *Coastal Engineering*, 51: 883-915.
- McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., Rutherford, I. D., and Stout, J. C. (2017). "Intermittently closed/open lakes and lagoons: their global distribution and boundary conditions." *Geomorphology*, 292(2017):142-152.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation". *Journal of Hydrology*, 279(1-4):275-289.
- Rich, A. and Keller, E. A. (2013). "A hydrologic and geomorphic model of estuary breaching and closure". *Geomorphology*, 191:64-74.
- Smakhtin, V. U. (2004). "Simulating the hydrology and mouth conditions of small, temporarily closed/open estuaries". *Wetlands*, 24(1):123-132.
- Stretch, D and Parkinson, M. (2006). "The breaching of sand barriers at perched, temporary open/closed estuaries – a model study". *Coastal Engineering Journal*, 48(01):13-30.
- Tuan, T.Q. (2007). "Seasonal Breaching of Coastal Barriers". Tesis Doctoral. Technical University of Delft, Delft.
- Wainwright, D.J and Baldock, T.E (2015). "Measurement and modelling of an artificial coastal lagoon breach". *Coastal Engineering*, 101:1-16.