



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



25
al
27

SET
2019

Montevideo

II CONGRESO DE AGUA
AMBIENTE Y ENERGÍA

AUGM



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Determinación de los principales patrones de flujo en el Río Uruguay y su variación espacio temporal

Rodrigo Junes^a, Mónica Fossati^b, Sebastián Solari^c

^aIMFIA, Fing, UdelaR, Uruguay, rjunes@fing.edu.uy.

^bIMFIA, Fing, UdelaR, Uruguay, mfossati@fing.edu.uy.

^cIMFIA, Fing, UdelaR, Uruguay, ssolari@fing.edu.uy.

RESUMEN: Se implementó un modelo numérico hidrodinámico bidimensional del río Uruguay desde Salto Grande hasta su desembocadura en el Río de la Plata, utilizando el módulo TELEMAC 2D. El modelo fue forzado con condiciones de contorno de caudales en Salto Grande, Daymán, Río Negro, Gualaguaychú y Paraná, niveles en Nueva Palmira, y vientos de reanálisis del CFSR variables en el tiempo y el espacio. Para el proceso de cálculo se utilizó un paso de tiempo constante de 6 s. Se calibró el modelo usando como parámetro el factor de fricción de fondo de Manning en tres secciones del río, y comparando con niveles registrados en 13 estaciones a lo largo del mismo durante el año 2008, validándolo posteriormente con datos del año 2005. Se realizaron simulaciones anuales desde 2004 a 2010 inclusive, en función de la disponibilidad de datos de forzantes. Los datos obtenidos de estas simulaciones se utilizaron para estudiar el comportamiento hidrodinámico del río en distintos rangos de caudal erogado por Salto Grande y frente a eventos de picos de nivel en Nueva Palmira.

PALABRAS CLAVE: Río Uruguay, modelación numérica, hidrodinámica, TELEMAC 2D.

1 INTRODUCCIÓN

El tramo inferior del Río Uruguay, desde Salto Grande hasta la desembocadura en el Río de la Plata, reviste importancia para Argentina y Uruguay desde el punto de vista económico, social y ambiental. La gestión de dicho cuerpo de agua debe basarse en información certera del sistema, y por tanto conocer cómo son las características principales del flujo es relevante para muchas aplicaciones. Un estudio hidrodinámico constituye la base para estudios de transporte de sedimentos y morfológicos, así como también para estudio de transporte de sustancias.

En este marco, se desarrolló un modelo numérico que resuelve la dinámica del flujo con alta resolución en el tramo Salto Grande - Nueva Palmira del río Uruguay (ver Figura 1). La dinámica en dicha zona está regulada por los aportes de caudal fluvial de los distintos afluentes, por el efecto de la marea que proviene del Río de la Plata y por la tensión del viento sobre el espejo de agua, que interactúan con la batimetría formada por los cauces principales, secundarios y zonas bajas.

Se utilizó el módulo hidrodinámico del modelo de código abierto TELEMAC-MASCARET Modeling System (TMS), en su versión bidimensional ([1]), el cual, debido a su amplia utilización en distintos estudios en el mundo ([2], [3], [4], [5], [6] y [7]), se ha transformado en un estándar en su campo de aplicación.

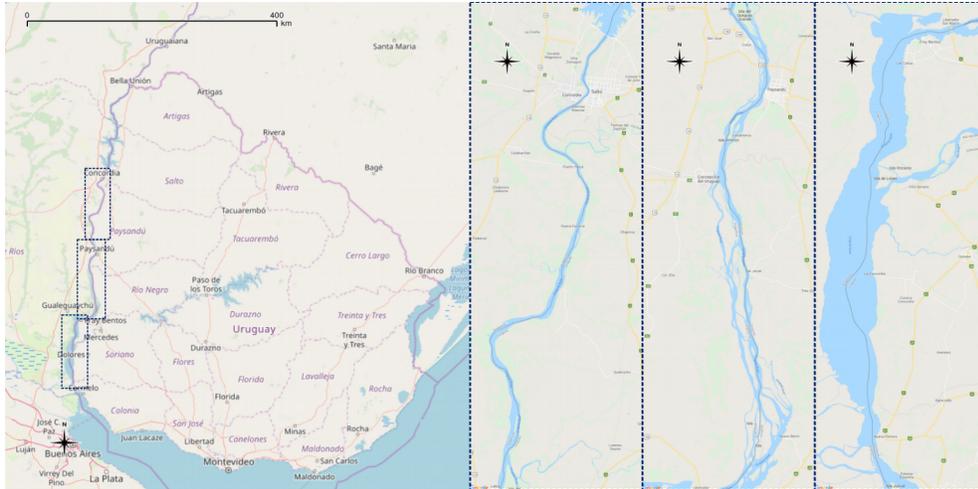


Figura 1. Alcance espacial del modelo implementado. Izquierda: mapa general; Derecha: acercamiento a los distintos tramos.

2 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

El objetivo general del proyecto es determinar las principales características hidrodinámicas del tramo inferior del río Uruguay y su variabilidad temporal según los forzantes, en base al desarrollo y puesta en funcionamiento de un modelo numérico.

Los objetivos específicos del proyecto son:

1. Recopilación, depuración y análisis de antecedentes e información de base sobre la dinámica del tramo inferior del río Uruguay.
2. Implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional para el tramo inferior del río Uruguay.
3. Calibración y validación del modelo hidrodinámico.
4. Determinación de los principales patrones de flujo, su variación espacial y temporal en función de los forzantes.

3 IMPLEMENTACIÓN

Se implementó el modelo hidrodinámico TELEMAC-2D en la zona de estudio, contando con un modelo funcional para el río Uruguay desde Salto Grande hasta Nueva Palmira, según se detalla a continuación.

3.1 Grilla de cálculo y modelo de terreno

Para la implementación del modelo hidrodinámico fue necesario en primera instancia generar un modelo digital del terreno (MDT) en base a los datos disponibles públicamente como los facilitados por la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) y Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FIng-UdelaR); datos de relevamientos satelitales LIDAR públicamente disponibles, Cartas Náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada Nacional del Uruguay (SOHMA), relevamientos batimétricos realizados por CARU y datos procesados en instancias de la tesis de maestría “Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay” ([8]).

Se desarrolló una grilla de cálculo final en base a sub-grillas por tramos, añadiéndolas secuencialmente para extender el dominio de cálculo. Las sub-grillas utilizadas fueron: Salto Grande a Concepción del Uruguay; Concepción del Uruguay a Fray Bentos; y Fray Bentos a Nueva Palmira. En la Figura 2 se puede ver un ejemplo de la grilla de cálculo desarrollada.

3.2 Condiciones de borde e iniciales

Las condiciones de borde utilizadas en el modelo hidrodinámico fueron las siguientes:

- Frontera abierta con caudal impuesto en la represa de Salto Grande.
- Frontera abierta con caudal impuesto en el río Daymán.
- Frontera abierta con caudal impuesto en el Río Negro.
- Frontera abierta con caudal impuesto en el río Gualaguaychú.
- Frontera abierta con caudal impuesto en el río Paraná Bravo.
- Frontera abierta con nivel impuesto en el cierre en Nueva Palmira.
- El resto de la frontera se consideró cerrada.

Los datos de viento utilizados corresponden a datos de reanálisis del “Climate Forecast System Reanalysis” (CFSR), modelo global de alta resolución que acopla atmósfera, océano, tierra e hielo oceánico, siendo una de sus componente el “Cross-Calibrated Multi-Platform Wind Vector Analysis” (CCMP), modelo de viento global que cuenta con una resolución espacial de $0,25^\circ$ por $0,25^\circ$ y con paso temporal de 3 horas ([9]).

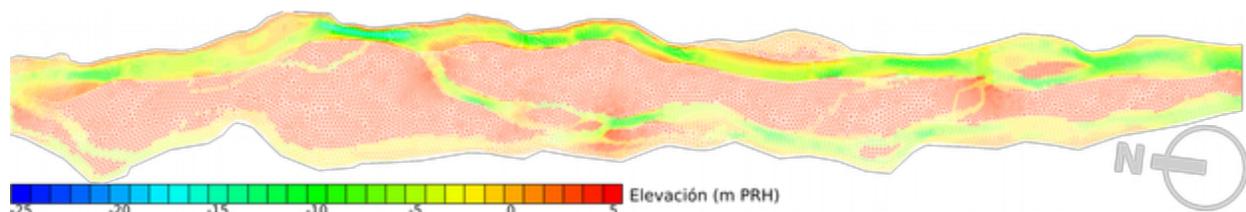


Figura 2. Ejemplo de grilla de cálculo implementada en el modelo, tramo de islas entre Concepción del Uruguay y progresiva 150 km.

4 CALIBRACIÓN

Se utilizó como parámetros de calibración el coeficiente de fricción de fondo de Manning y el coeficiente de fricción del viento. Para esto se consideraron tres tramos distintos, según su morfología:

- Tramo 1: desde Salto Grande hasta la progresiva 254 km del río.
- Tramo 2: desde la progresiva 254 km del río hasta Fray Bentos, en la progresiva 105 km.
- Tramo 3: desde Fray Bentos hasta aguas abajo de Nueva Palmira, en la progresiva 0 km.

Se consideraron además las islas presentes en el río y la parte de la planicie de inundación incluida en el dominio de cálculo, a las cuales se les asignó un valor de coeficiente de fricción uniforme. El coeficiente de fricción del viento se consideró uniforme en todo el dominio de cálculo. Para la calibración se procedió en tres etapas. La primera de ellas consistió en la calibración del coeficiente de fricción del cauce en los distintos tramos, para la cual se usaron datos de caudales bajos y medios de Salto Grande, específicamente datos desde el 1/1/2008 hasta el 1/10/2008. En estas condiciones, el flujo se mantiene dentro del cauce del río, no mojando las islas ni la planicie de inundación. La segunda consistió en la calibración del coeficiente de fricción para las islas y planicie de inundación, para lo cual se usaron datos de caudales de crecidas,

específicamente entre el 15/10/2008 y el 20/11/2008. La tercera consistió en la calibración del coeficiente de fricción del viento, para lo cual se utilizaron los valores calibrados de coeficientes de fricción del cauce, con datos de condiciones de contorno entre el 1/9/2008 y el 31/12/2008.

De la etapa de calibración del modelo se concluye que la configuración que mejor se acerca a la representación de las series de datos consideradas, corresponde a la siguiente:

- Coeficiente de fricción de Manning en el cauce:
 - Tramo 1: 0,022.
 - Tramo 2: 0,010.
 - Tramo 3: 0,025.
- Coeficiente de fricción de Manning en planicie de inundación e islas: 0,25.
- Coeficiente asociado a la fricción del viento: 1,46E-6

5 VALIDACIÓN

Para la validación del modelo se simuló el año 2005. En la Figura 3 se muestra la comparación entre los datos medidos y simulados para la estación de Fray Bentos, mostrando la serie temporal durante varios meses del año 2005, y el diagrama de Taylor. En la Tabla 1 se muestra una síntesis de los indicadores de calidad de ajuste.

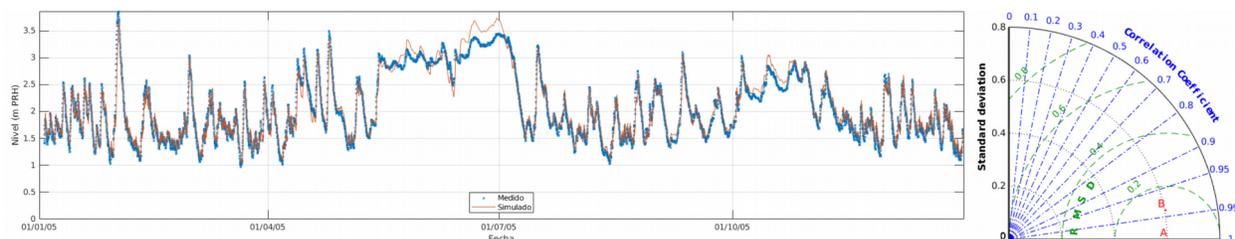


Figura 3. Serie medida (azul) y serie simulada (anaranjado) para la estación de Fray Bentos, 2005.

Tabla 1. Resumen de indicadores de calidad de ajuste y parámetros estadísticos de comparación entre series medidas y simuladas para 2005.

Estación	ERMS (m)	CCor -	Sesgo (m)	Media (m PRH)		STD (m)	
				Medida	Simulada	Medida	Simulada
Salto	0,38	0,999	0,49	6,01	3,2	3,18	1,52
Concordia	0,79	0,976	0,88	6,81	3,21	2,84	1,26
Yerúa	0,36	0,996	0,33	6,02	3,09	3,16	1,14
Nueva Escocia	0,59	0,988	0,01	6,56	2,9	2,7	1,35
La Calera	0,41	0,996	-0,83	5,26	2,86	2,86	1,27
F. Colón	0,36	0,99	-0,31	5,71	2,62	2,59	1,04
Colón	0,32	0,993	-0,13	4,86	2,51	2,59	0,99
Paysandú	0,18	0,994	0,03	4,72	2,08	2,12	0,6
C. del Uruguay	0,22	0,988	-0,02	4,55	2,11	2,19	0,6
Campichuelo	0,23	0,975	-0,09	3,7	2,09	1,82	0,59
Fray Bentos	0,11	0,983	0,03	3,57	2,09	1,83	0,57
Gualeguaychú	0,21	0,935	0,01	3,26	1,75	1,57	0,41
Nueva Palmira	0,07	0,988	0,06	3,32	1,82	1,77	0,42

6 DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PATRONES DE FLUJO

Para la determinación de los patrones de flujo, se simuló desde el año 2004 al 2010, y se consideraron 8 puntos de interés ubicados en el medio de la sección del cauce del río, a lo largo de toda su extensión: Salto, La Calera, Paysandú, Banco Pelay, Progresiva 145 km, Fray Bentos, Progresiva 80 km y Progresiva 33 km. En estos puntos se extrajeron series temporales de velocidad y nivel de superficie libre.

Se estudió el comportamiento global utilizando la totalidad de los datos en las estaciones consideradas. Tanto el mínimo, la media y los máximos de los niveles de los puntos de control disminuyeron su valor de Norte a Sur, así como también disminuyó la tasa de variación de los mismos. La variación de los estadísticos de las velocidades no presentó un patrón similar, lo cual es razonable ya que depende fuertemente de la geometría de la sección que se esté considerando. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para Fray Bentos.

Se estudió posteriormente el comportamiento del río para distintos rangos de caudales (bajos, inferiores a 1.000 m³/s, medios entre 1.000 m³/s y 10.000 m³/s y altos, superiores a 10.000 m³/s). Se tuvo eventos de inversión de flujo en todos los puntos considerados tanto para el rango de caudales bajos como de caudales medios. Esto apunta hacia una fuerte influencia de los niveles del Río de la Plata en la dinámica del río Uruguay en situación de estiaje. Para el caso de caudales altos las inversiones de flujo se dieron únicamente en las últimas dos estaciones aguas abajo, en el tramo de Fray Bentos a Nueva Palmira (Tramo 3). Lo anterior indica que este tramo se ve fuertemente influenciado por el nivel del Río de la Plata incluso para caudales erogados por Salto Grande superiores a los 10.000 m³/s. Por otro lado, aguas arriba de Fray Bentos, la dinámica del río estuvo fuertemente influenciada por los caudales erogados por Salto Grande.

Se analizó asimismo el comportamiento del sistema frente a eventos de picos de nivel en Nueva Palmira, de lo cual se pudo sacar las siguientes conclusiones:

- En régimen de caudales bajos, los picos de nivel se propagan aguas arriba hasta La Calera inclusive, con eventos de inversión de flujo con velocidades desde 0,7 m/s en Nueva Palmira hasta 0,1 m/s en La Calera. Estos eventos vienen asociados a vientos con fuerte componente Sur en Nueva Palmira (superior a 6 m/s). Un ejemplo de estos eventos se puede ver en la Figura 5.
- En régimen de caudales medios la situación puede ser más variada, con picos de nivel que afectan solamente el Tramo 3 en términos de propagación aguas arriba de la perturbación en los niveles y de los eventos de inversión de flujo, que pueden llegar hasta La Calera. La mayoría de estos eventos se asocian a picos de viento con fuerte componente Sur en Nueva Palmira (mayor a 8 m/s).
- En régimen de caudales altos también se pueden tener situaciones de inversión de flujo y propagación aguas arriba de los picos de nivel, pero todo esto acotado al Tramo 3. En caso de crecidas como la de 2009, asociadas a caudales erogados por Salto Grande del orden de 30.000 m³/s, no se observan inversiones de flujo ni ingreso de ondas de marea siquiera en el Tramo 3, quedando su influencia fuertemente disminuida a causa de los altos caudales.

7 CONCLUSIONES GENERALES

Se logró implementar, calibrar y validar un modelo hidrodinámico bidimensional de alta resolución espacial y temporal del río Uruguay desde Salto Grande hasta la desembocadura en el Río de la Plata, el cual permitió determinar los principales patrones de flujo del cuerpo de agua modelado, en función de la respuesta de éste a los forzantes de caudal, mareas y vientos.

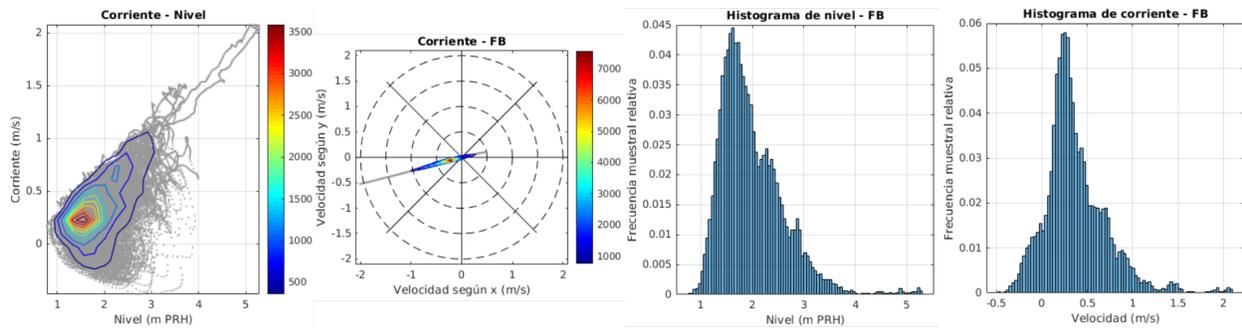


Figura 4. Resultados globales para Fray Bentos. Izquierda: gráfico de dispersión corriente-nivel; centro izquierda: rosa de corrientes; centro derecha: histograma de corriente; derecha: histograma de niveles.

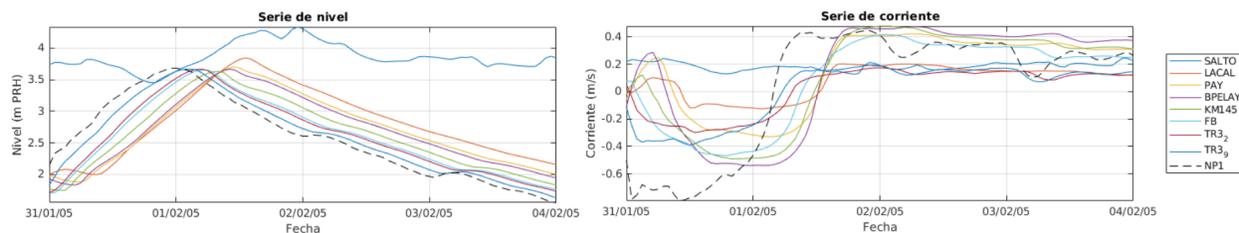


Figura 5. Evento de pico de nivel del 31/01/2005. Arriba: serie de niveles; Abajo: serie de corrientes.

8 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) por la beca de maestría otorgada al autor para la realización de la tesis, así como por los aportes de información fundamental para el desarrollo de la misma.

9 REFERENCIAS

- [1]: Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- [2]: Zhang , Q. (2016). Numerical Study on the Transport Timescale in a River-influenced Macro-tidal Estuary. Journal of Coastal Research. Spring2016 Supplement, Vol. 75 Issue sp1, p193-197. 5p.
- [3]: Mahgoub, M. (2015). Understanding the Behaviour of Gravity Currents in Tideless Estuaries and Considering the Impact of Sea Level Rise within the Nile Estuary. Journal of Coastal Research, Vol. 31 Issue 3, p714-722, 9p.
- [4]: Vu, T. (2015). Two-dimensional hydrodynamic modelling of flood inundation for a part of the Mekong River with TELEMAC-2D. British Journal of Environment and Climate Change 5 (2) New Delhi: SCIENTEDOMAIN International,2015, 162-175, India.
- [5]: Langendoen, E.J. (2016). Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks. Elsevier Ltd.
- [6]: Jia, L. (2015). Wave-current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast. Elsevier Ltd.
- [7]: Nguyen, V.T. (2016). Numerical Investigation of Sediment Transport and Bedmorphology on a Stretch of Nakdong River. Elsevier Ltd.
- [8]: Casterá, M. (2015). Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay. Tesis de Maestría de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.
- [9]: Saha, S., et al, (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis.