

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DEL RÍO DE LA PLATA ¹

Mariano Re² y Ángel N. Menéndez³

Resumen: Las zonas costeras y, especialmente, las ciudades ubicadas en ellas, están amenazadas por una amplia variedad de peligros relacionados con el clima. La costa argentina del Río de la Plata y, en particular, la Región Metropolitana de Buenos Aires, no escapan a esta situación, siendo cada vez más vulnerables a causa del Cambio Climático. En este trabajo, mediante avanzadas técnicas de modelación numérica de la hidrodinámica del Río de la Plata, se determinaron los mapas de riesgo de inundaciones para las condiciones actuales, y para posibles escenarios futuros. Se calibró y validó un modelo hidrodinámico con el objetivo de simular la generación de ondas de tormenta en el Frente Marítimo, que luego penetran en el Río de la Plata. Los escenarios futuros planteados representan condiciones medias y máximas proyectadas para las décadas de 2030 y 2070. Como resultado de las simulaciones se obtuvieron los niveles medios estacionales en todo el dominio del modelo y la respuesta del sistema ante eventos de tormentas con distintas recurrencias. A partir de los resultados de niveles a lo largo de toda la costa argentina del Río de la Plata, se trazaron los mapas de riesgo de inundación. Se concluye que el aumento del nivel medio del mar es el mayor condicionante de cambios en el sistema, y que esa elevación se manifestará en un aumento del riesgo de inundación debido a las ondas de tormenta.

Palabras claves: cambio climático, inundación, Río de la Plata, simulación numérica

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE COASTAL AREAS OF THE RIO DE LA PLATA

Abstract: Coastal zones and, specially, cities located along them, are threatened by a wide variety of dangers related to weather. The Argentine coast of the “Río de la Plata”, and, in particular, the Metropolitan Region of Buenos Aires, suffers this type of situation, with an increasing vulnerability due to Climate Change. In this paper, advanced modelling techniques are used to model the hydrodynamics of the Río de la Plata, and draw flood risk maps for present conditions and for possible future scenarios. A hydrodynamic model was calibrated and validated to simulate the generation of storm surges in the Maritime Front, which later penetrate into the Río de la Plata. The future scenarios represent mean and maximum projected conditions for the decades of 2030 and 2070. As a result of the simulations, seasonally-averaged water levels for the whole model domain and the system response to storm events for different return periods were obtained. From the results on water level along the Argentine coast of the Río de la Plata, flood risk maps were drawn. It is concluded that the mean sea level rise is the major conditioning factor for changes in the system, and that that increment will manifest in an increase in the flood risk due to storm surges.

Keywords: climate change, flood, Rio de la Plata, numerical simulation

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras, y especialmente las ciudades ubicadas en ellas, están amenazadas por una amplia variedad de peligros relacionados con el clima. Estos se tornan menos predecibles en el contexto actual de Cambio Climático.

La costa argentina del Río de la Plata (Figura 1) no escapa a esta situación, siendo cada vez más vulnerable a causa del Cambio Climático, especialmente por el aumento del nivel medio del mar. En particular, la Región Metropolitana de

¹ Artículo recibido el 25 de octubre de 2006 y aceptado para publicación el 6 de noviembre de 2006.

² Laboratorio de Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, y Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Argentina. E-mail: mre@fi.uba.ar

³ Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, y Laboratorio de Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina. E-mail: angel.menendez@speedy.com.ar

Buenos Aires (RMBA), el principal conglomerado urbano de Argentina (que actualmente se extiende aproximadamente desde Zárate-Campana hasta Berisso-Ensenada), con una población de alrededor de 14 millones de habitantes, es susceptible a eventos extremos de inundación que producen pérdidas sociales y económicas muy significativas.

Debido al Cambio Climático, el Río de la Plata está experimentando un incremento de su nivel medio debido tanto al aumento del nivel medio del mar como al cambio en la dirección de los vientos estacionales predominantes. Además, está aumentando la frecuencia de las ondas de tormenta. Ambos efectos provocan una mayor vulnerabilidad de la zona costera a las inundaciones.



Figura 1: Áreas costeras argentinas del Río de la Plata. (a) Río de la Plata Interior; (b) Río de la Plata Exterior.

EL RÍO DE LA PLATA

El Río de la Plata, cuya forma de embudo se orienta en el sentido noroeste-sudeste, alcanza una longitud aproximada de 290 km. Rápidamente adquiere un ancho de alrededor de 50 km en la zona superior del río (que se extiende hasta la línea imaginaria Buenos Aires-Colonia), incrementándose hasta unos 70 km en la zona media (que llega hasta la línea imaginaria Punta Piedras-Montevideo); ambas zonas constituyen lo que se llama Río de la Plata Interior. Allí se produce una brusca expansión del ancho (Río de la Plata Exterior), que alcanza alrededor de 200 km en la desembocadura. El Río de la Plata constituye el umbral sobre el Océano Atlántico de la segunda cuenca fluvial de América del Sur: la Cuenca del Plata (de 3.1 millones de km²).

Los forzantes principales de la hidrodinámica del Río de la Plata son: la descarga de los tributarios principales que penetran en la cabecera (ríos Paraná y Uruguay), la onda de marea que ingresa desde el océano y los vientos que actúan

sobre toda la superficie del agua (véase la Figura 2). El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23,000 m³/s. Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay, con el porcentaje restante distribuido en una serie de relativamente pequeñas descargas que llegan a ambas márgenes.

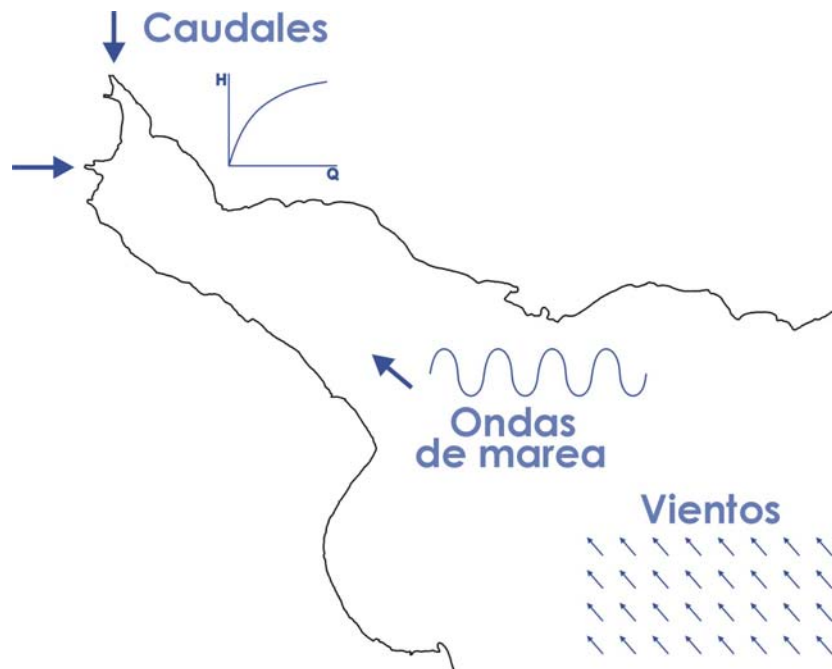


Figura 2: Forzantes principales de la hidrodinámica del Río de la Plata.

La onda oceánica que arriba al Río de la Plata tiene un régimen astronómico micromareal (amplitud de pocas decenas de centímetros), por lo que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos oceánicos (condicionado por el anticiclón del Atlántico Sur), tienen un efecto relevante en la forma e intensidad de la onda incidente.

El viento actúa sobre la superficie del agua, variando el nivel de la superficie e influenciando la velocidad de la corriente, tanto en intensidad como en dirección, por lo que también condiciona la propagación de la onda de marea.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO

La cuantificación del riesgo de inundaciones en zonas costeras mediante análisis estadísticos clásicos de registros históricos está dejando de ser una herramienta confiable debido al Cambio Climático. En efecto, la suposición de una situación estacionaria en términos medios estadísticos ya no es válida, debido a que el clima está mostrando tendencias definidas de cambio. Por lo tanto, es necesario recurrir a técnicas más elaboradas. Las más sofisticadas incluyen la modelación de los procesos, de modo de poder obtener respuestas para escenarios climáticos diferentes a los históricos. Este tipo de metodología fue la utilizada en el estudio que se describe en este trabajo.

Se implementó un modelo numérico hidrodinámico que reproduce la respuesta del Río de la Plata (en niveles y velocidades de corriente) frente a la acción de los tres forzantes principales. Este modelo fue calibrado y validado utilizando la información histórica, y luego fue utilizado para predecir la respuesta del río frente a posibles escenarios climáticos futuros.

MODELO HIDRODINÁMICO

Dado que el problema de inundaciones está relacionado a las ondas superficiales, se implementó un modelo hidrodinámico bidimensional en el plano horizontal (Re y Menéndez, 2003; Re et al., 2004; Re, 2005). Este modelo, denominado RPP-2D, se extiende sobre un dominio espacial que comprende todo el Río de la Plata y una porción significativa de su Frente Marítimo, de modo de incluir la zona de desarrollo de las ondas de tormenta (Figura 3). El software de base utilizado fue el HIDROBID II (Menéndez, 1990), que resuelve numéricamente las ecuaciones hidrodinámicas para aguas poco profundas. El paso de resolución espacial es de 2,500 m, siendo necesario un paso

temporal de cálculo de 60 segundos para mantener una precisión adecuada en los resultados. La descarga de los tributarios principales considerados (Uruguay y Paraná, a través de dos de sus brazos principales: Paraná de las Palmas y Paraná Guazú-Bravo) se impone como una condición de borde. El modelo tiene tres bordes oceánicos (Este, Norte y Sur), que constituyen contornos matemáticos. El Borde Este fue considerado como un contorno impenetrable (la energía de onda que lo atraviesa es muy baja en relación con la que se propaga a lo largo de la plataforma continental) y el Borde Norte fue tratado como un contorno no reflejante. La onda de marea astronómica, que se impone como condición de contorno en el Borde Sur del modelo, se construye a partir de análisis realizados con el Modelo Global de Marea RSC94 (Cartwright y Ray, 1990). Se utiliza la información de campos de vientos perteneciente a la serie de reanálisis de NCEP/NCAR, discretizados temporalmente cada 6 y 24 horas y espacialmente cada 200 km aproximadamente (Kalnay et al., 1996).



Figura 3: Dominio de cálculo del Modelo RPP-2D.

La calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D se desarrolló en varias etapas, en base al criterio de discriminar efectos, permitiendo así una validación y ajuste progresivo. En una primera etapa se trabajó con un escenario de marea astronómica pura, utilizándose como comparación los datos de las Tablas de Mareas del SHN (Servicio de Hidrografía Naval, Argentina) y del SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, Uruguay) para todas las estaciones de monitoreo interiores al dominio de cálculo (Figura 4a); los ajustes se efectuaron sobre la onda de marea entrante por el borde Sur. La segunda etapa de la calibración apuntó a simular las condiciones de niveles medios estacionales en la ciudad de Buenos Aires para toda la década del 90 (Figura 4b), lo que permitió ajustar el nivel medio oceánico impuesto en el borde Sur. En la tercera etapa se fijó como objetivo simular la curva de frecuencia de niveles de agua en la ciudad de Buenos Aires para la década del 90 (véase la Figura 4c), para lo cual se ajustó el coeficiente de arrastre por el viento.

El modelo RPP-2D se validó de diferentes maneras. En primer lugar, se identificaron eventos de tormentas de variados niveles de significación y diferentes características, con el objetivo de analizar las respuestas del modelo en la simulación de grandes ondas de tormenta. Se concluyó que el modelo cuenta con un dominio de cálculo lo suficientemente extendido como para incluir las distancias de desarrollo de las ondas de tormenta, y que la precisión de los niveles predichos está limitada por la escasa calidad y cantidad de datos sobre los campos de vientos actuantes (véase la Figura 5).

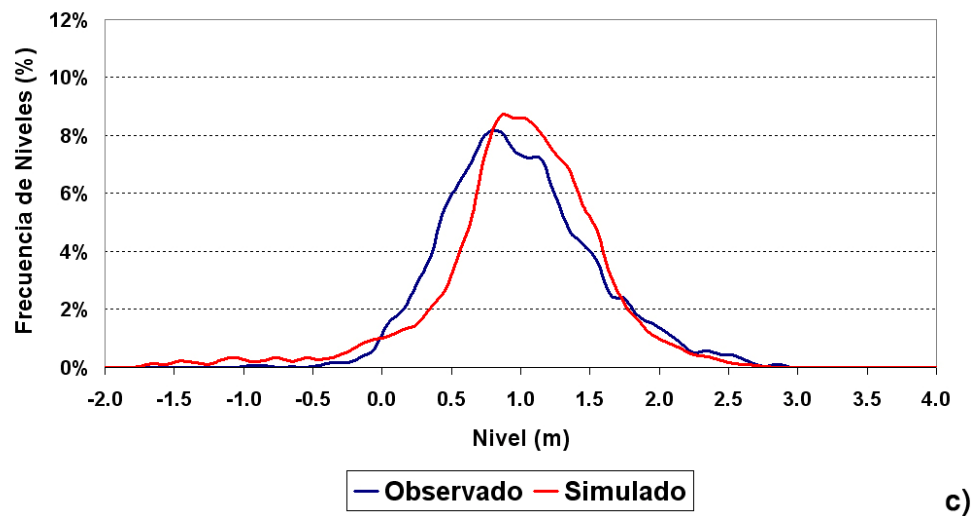
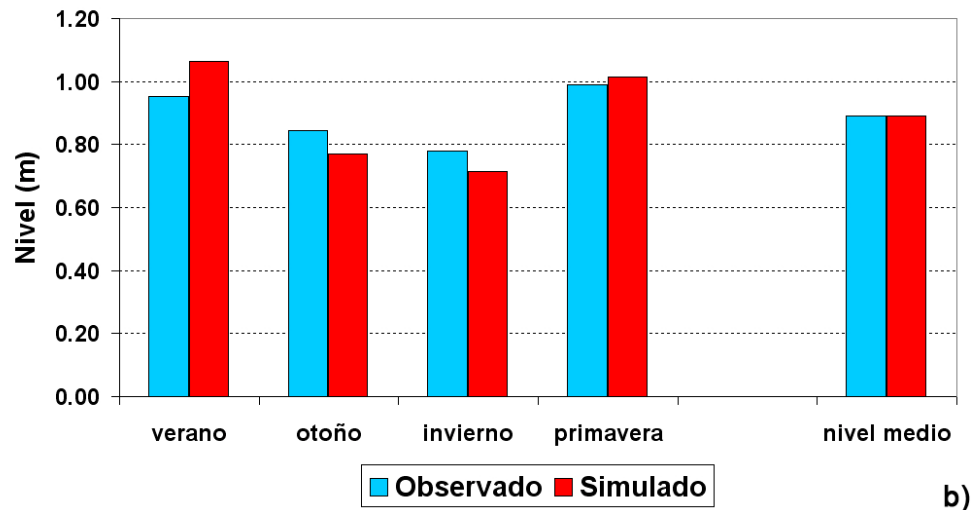
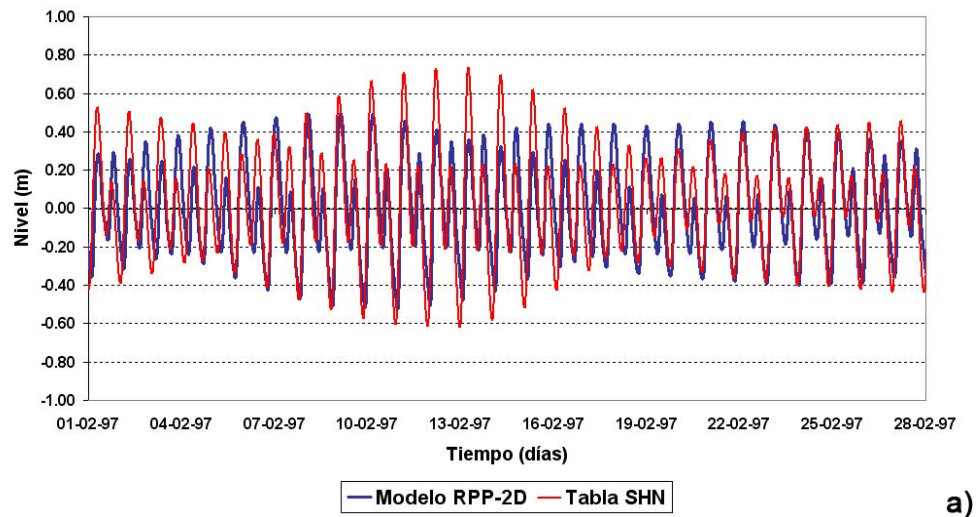


Figura 4: Comparaciones realizadas durante la calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D en Buenos Aires.
 (a) Ondas de marea predichas y simuladas; (b) Niveles medios anual y estacional observados y simulados; (c) Curvas de frecuencia de niveles obtenidas de observaciones y simulación.

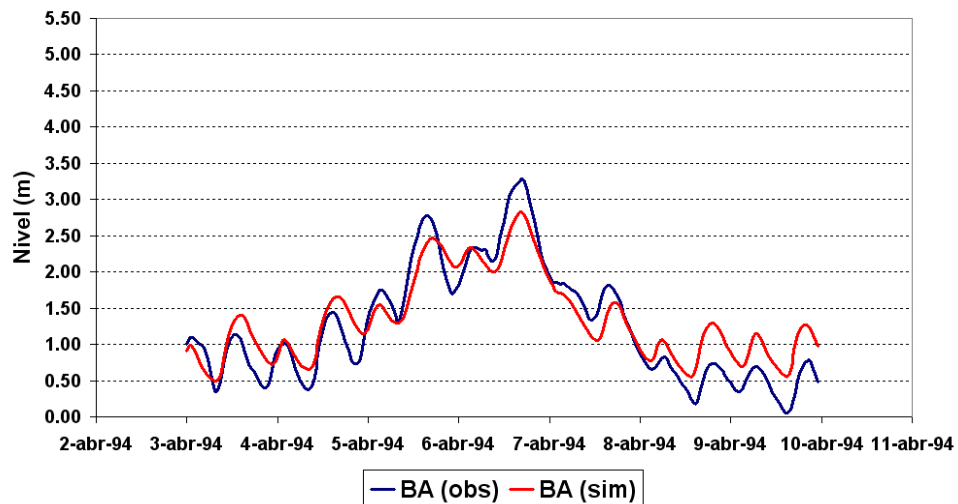


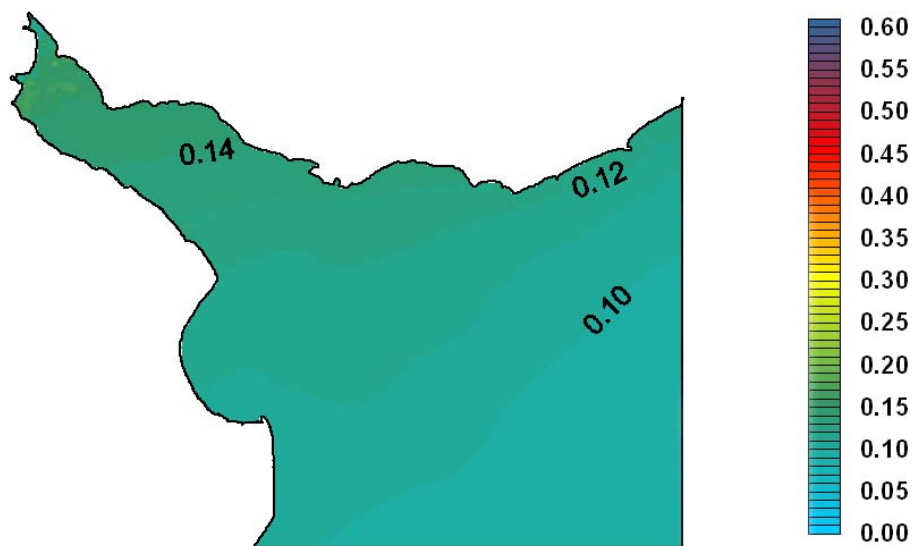
Figura 5: Comparación de niveles observados y simulados durante la tormenta de Abril de 1994.

En segundo lugar, se efectuaron comparaciones con un conjunto de datos de nivel del mar provistos por el satélite TOPEX/Poseidón sobre el Frente Marítimo, a lo largo de una línea imaginaria paralela al eje del río. Se observó que los resultados medios estacionales provistos por el modelo constituyen adecuadas representaciones de las tendencias de los datos satelitales dispersos, a modo de ajuste, identificándose claramente la tendencia del gradiente superficial que indica mayores niveles del río en relación al océano para condiciones de verano y viceversa para invierno.

Finalmente, se efectuaron comparaciones de velocidades de corriente predichas y mediciones efectuadas en 10 estaciones localizadas en la zona media del río, observándose una buena representación de la fase y del orden de magnitud de la amplitud, lo que indica una capacidad predictiva algo mayor a la esperada *a priori*.

PROYECCIONES DE AUMENTO DEL NIVEL MEDIO

El modelo RPP-2D se utilizó para efectuar proyecciones a futuro de la respuesta del Río de la Plata frente a cambios en las condiciones climáticas. En particular, se eligieron las décadas del 2030 y del 2070 como tiempos futuros de planteo de escenarios.



a)

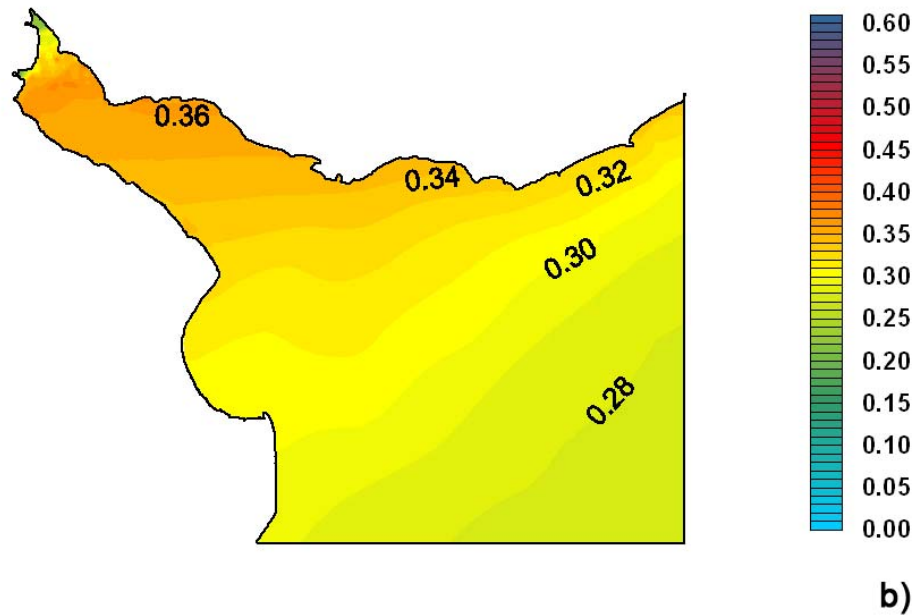


Figura 6: Diferencias de nivel medio anual (m): a) 2030s med – 1990s; b) 2030s med – 1990s.

Para definir los escenarios de incremento del nivel medio del mar, se seleccionó como línea evolutiva de emisiones de gases de efecto invernadero la denominada A2, que básicamente significa una continuidad de las políticas generales actuales (IPCC, 2000). Se consideraron los aumentos medios y máximos para esas dos décadas (10 cm en 2030-medio, 19 cm en 2030-máximo, 28 cm en 2070-medio y 50 cm en 2070-máximo), a partir de un compendio de resultados de distintos Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano compilados por el IPCC (IPCC, 2001).

Los campos de vientos para las dos décadas seleccionadas surgieron de una simulación con el modelo climático HADCM3 del Hadley Centre for Climate Prediction and Research de Inglaterra, para el período 1950-2099 (Camilloni y Bidegain, 2002). Se destaca que estos campos futuros indican intensidades crecientes y cambios de dirección hacia el Este.

Utilizando los forzantes así obtenidos, se llevaron a cabo simulaciones numéricas con el modelo RPP-2D para obtener las respuestas del Río de la Plata. Se obtuvieron distribuciones medias anuales y medias estacionales del nivel del río, observándose que el incremento del nivel medio del mar arrastra consigo al nivel medio del Río de la Plata, pero que, además, se verifica un aumento mayor del nivel medio anual hacia el interior del río (de varios centímetros) debido a los cambios en los vientos (Figura 6).

PROYECCIONES DE RIESGO DE INUNDACIÓN

Las inundaciones en la costa argentina del Río de la Plata se producen por ondas de tormenta asociadas al fenómeno meteorológico conocido como Sudestada, caracterizado por vientos persistentes, de regulares a fuertes, del sector sudeste, lo cual contribuye a incrementar aún más el nivel del río por el efecto de apilamiento (“setup” en inglés).

Se utilizó el modelo RPP-2D para construir mapas de riesgo de inundación asociados a la situación ‘presente’ (década del 90) y a los cuatro escenarios futuros definidos previamente. Se tomó como tormenta base el evento de mayor intensidad del año 2000, sucedido en el mes de mayo, que constituyó un pico importante y bien definido, y con una duración típica. La secuencia temporal de campos de vientos asociadas a esa tormenta fue escalada con un factor, de modo de reproducir, sucesivamente, los niveles máximos en la ciudad de Buenos Aires correspondientes a distintas recurrencias (1, 5, 10, 20, 50 y 100 años). Esas tormentas sintéticas se consideraron la representación del fenómeno de la respectiva recurrencia para las condiciones ‘presentes’.

Ante la ausencia de indicios en contrario, se adoptó la hipótesis de que esas tormentas sintéticas seguirán representando eventos de la recurrencia asignada en el futuro. Entonces, se simuló las tormentas montadas sobre los niveles medios del mar correspondientes a los cuatro escenarios futuros definidos previamente. Luego se construyeron

las envolventes de máximo nivel en base a resultados en 24 estaciones de control a lo largo de los aproximadamente 250 km de costa argentina (véase la Figura 7), que fueron consideradas la línea de inundación para esa recurrencia.

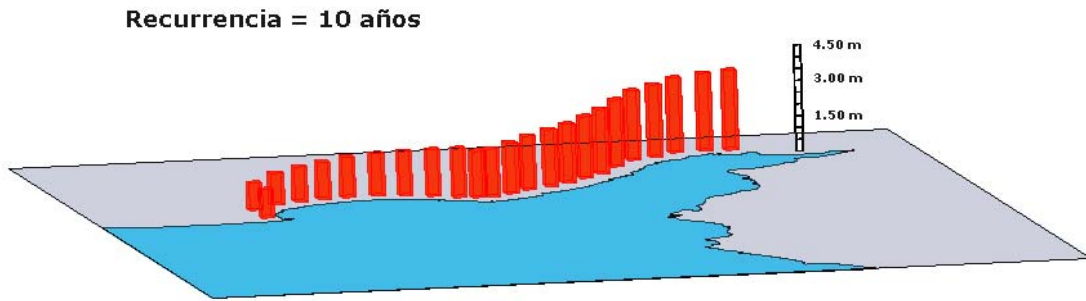
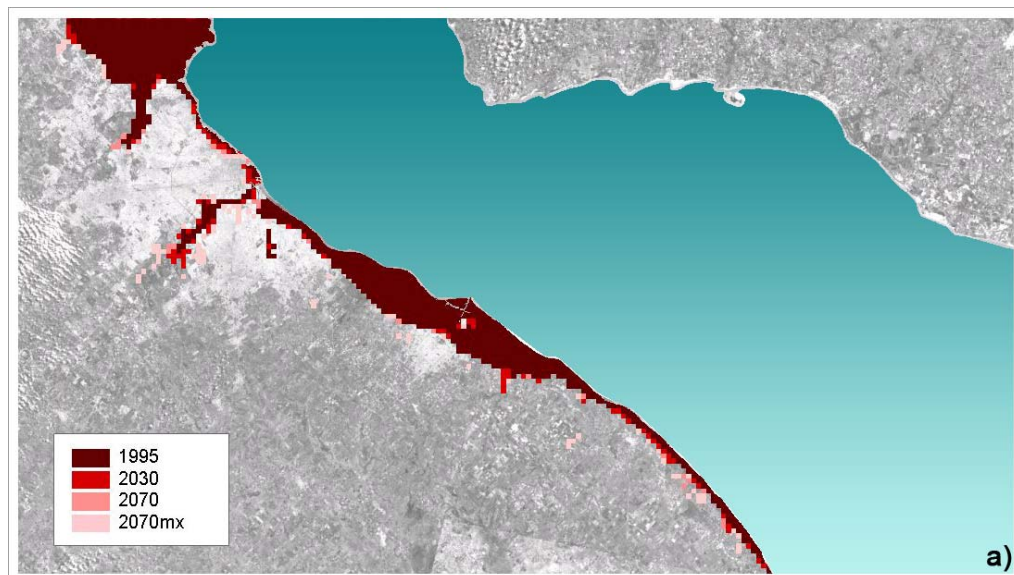
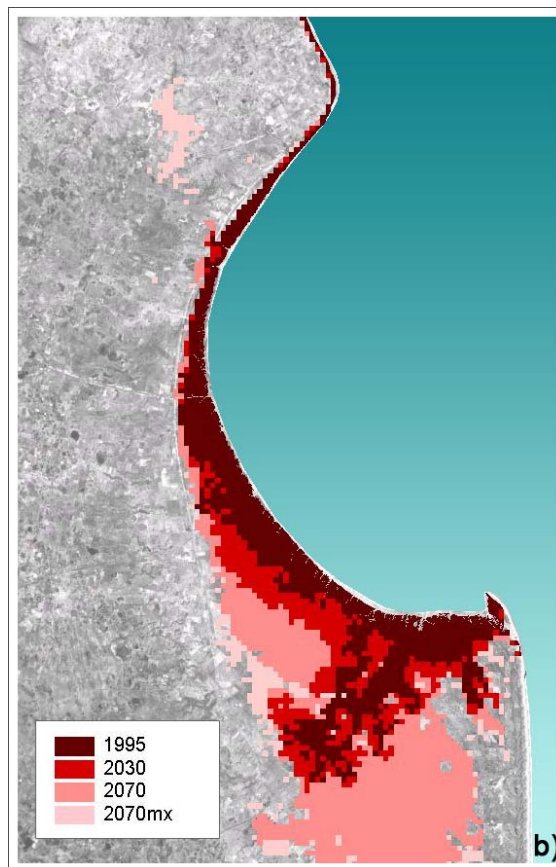


Figura 7: Niveles máximos en las distintas estaciones de control. Recurrencia 10 años, situación presente.

Estos resultados fueron superpuestos sobre un modelo digital del terreno (MDT), dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) implementado por el equipo de trabajo del PIRNA (Programa de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires) a partir de distintas fuentes de información topográfica (cartas del Instituto Geográfico Militar, datos satelitales de radar, etc.). El paso del MDT es de 1000 m. A modo de ilustración, en la Figura 8 se indica el área de inundación para una recurrencia de 100 años, tanto como para las condiciones presentes como para las futuras.

De los resultados surge que las tres zonas con mayor riesgo de inundación son: el Frente del Delta del Paraná, la franja costera que va desde Berazategui–Quilmes hasta Berisso–Ensenada y la región sur de la Bahía de Samborombón. En la RMBA, las zonas potencialmente más afectadas son los márgenes de las cuencas bajas de los ríos Matanza–Riachuelo y Reconquista. La zona de mayor impacto territorial de las inundaciones resulta ser la Bahía de Samborombón, ya que tanto para el presente como para los escenarios futuros, el avance del agua en eventos de recurrencias mayores es importante dado que las pendientes de esa zona costera son muy bajas.





**Figura 8: Mapa de riesgo para una recurrencia de 100 años:
(a) Río de la Plata Interior; (b) Río de la Plata Exterior.**

CONCLUSIONES

A continuación, se sintetizan las principales conclusiones que han surgido del estudio. Tanto a escala estacional como anual, la principal componente de cambio de los niveles medios en el Río de la Plata será el aumento del nivel medio del mar, el cual produce un incremento de nivel medio prácticamente constante sobre toda la extensión del río. Por otro lado, el cambio en los patrones de viento no tendrá una influencia mensurable sobre los niveles medios estacionales y anuales del Río de la Plata Exterior, pero ésta sí será relevante para el Río de la Plata Interior, donde se producirán incrementos de varios centímetros.

Las áreas inundadas permanentemente en la costa argentina del Río de la Plata por los efectos del Cambio Climático serán de relativamente pequeña extensión. Esto significa que la amenaza de inundaciones seguirá siendo eventual, y ligada a las ondas de tormenta. El aumento del nivel máximo de las inundaciones provocadas por las ondas de tormenta será prácticamente igual al aumento del nivel medio del mar. Las tres zonas costeras más vulnerables a las inundaciones son: el Frente del Delta del Paraná, la franja costera que va desde Berazategui–Quilmes hasta Berisso–Ensenada y una franja al sur de la Bahía de Samborombón. Para los escenarios futuros, resulta creciente el riesgo de inundación en la cuenca baja de los ríos Matanza–Riachuelo y Reconquista.

REFERENCIAS

- Camilloni, I., Bidegain, M. (2002). “Regional climate baselines scenarios for the Rio de la Plata basin”, *Assessments of impacts and adaptation to climate change in multiple regions and sectors (AIACC) - Rio de la Plata Workshop*, Montevideo, Uruguay,
- Cartwright, D., Ray, R. (1990). “Oceanic tides from Geosat altimetry”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. 3, pp. 3069–3090.
- IPCC (2000). “Escenarios de Emisiones”, *Informe especial del Grupo de Trabajo III*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

- IPCC (2001). "Cambio Climático 2001: La base científica", *Contribución del Grupo de trabajo I al Tercer informe de evaluación del IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Kalnay, E. y Co-autores (1996). "The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis Project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, pp. 437 - 471.
- Menéndez, A.N. (1990). "Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 6, No. 1, pp. 25-36.
- Re, M., Menéndez, A.N. (2003). "Modelo numérico del Río de la Plata y su frente marítimo para la predicción de los efectos del cambio climático", *Mecánica Computacional*, Vol. 22, pp. 354-367.
- Re, M., Menéndez, A.N., Ludueña, S.G. (2004). "Mapas de riesgo de inundaciones para una zona costera considerando el cambio climático", *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Octubre, São Pedro, São Paulo, Brasil.
- Re, M. (2005). "Impacto del Cambio Climático Global en las Costas del Río de la Plata", *Tesis de Maestría*, Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina.