

IAHR

CIC

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**MAPAS DE RIESGO DE DURACIÓN DE INUNDACIONES
EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE BUENOS AIRES**

Emilio A. Lecertúa, Mariano Re y Ángel N. Menéndez

Laboratorio de Hidráulica, INA (Instituto Nacional del Agua)

Autopista Ezeiza-Cañuelas, Tramo J.Newbery, km 1.600, Ezeiza, Argentina

ealecer@yahoo.com.ar

RESUMEN:

Se presenta una metodología basada en la modelación matemática de la dinámica del Río de la Plata para elaborar mapas de riesgo de altura y duración de inundación en las costas de la Región Metropolitana de Buenos Aires debido al pasaje de ondas de tormenta, tanto para un escenario base como para probables escenarios futuros en el contexto del Cambio Climático. La posibilidad de considerar simultáneamente la altura máxima y la duración de las inundaciones constituye una forma novedosa de generar mapas de riesgo, y resulta muy útil para la gestión del riesgo.

ABSTRACT:

A methodology to build risk maps for height and duration of floods along the coast of the Metropolitan Region of Buenos Aires due to the passage of storm surges, based on mathematical modeling of the Rio de la Plata dynamics, is presented. A baseline scenario and two Climate Change scenarios are studied. The possibility of simultaneously considering the maximum height and the duration of floods constitutes a novel way of generating risk maps, which results very useful for risk management.

PALABRAS CLAVES: modelación matemática; duración de inundaciones; mapas de riesgo.

INTRODUCCIÓN

La Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) representa el principal conglomerado urbano de la Argentina, con una población de alrededor de 14 millones de habitantes (Figura 1). Una fracción significativa de la zona costera de la RMBA está sujeta al riesgo de inundaciones durante el desarrollo de ondas de tormenta en el Río de la Plata, asociadas al fenómeno meteorológico de *Sudestada*. Este evento es un fenómeno que se localiza en la región del Río de la Plata y su Frente Marítimo y está caracterizado por vientos persistentes, regulares a fuertes del sector Sudeste (Escobar *et al.*, 2004). Debido a la orientación del eje del Río de la Plata, cuando se da este tipo de campos de vientos, el nivel de agua aumenta. Con el efecto de Coriolis, esta situación tiene sus impactos mayores en la costa argentina inundando las zonas más bajas.

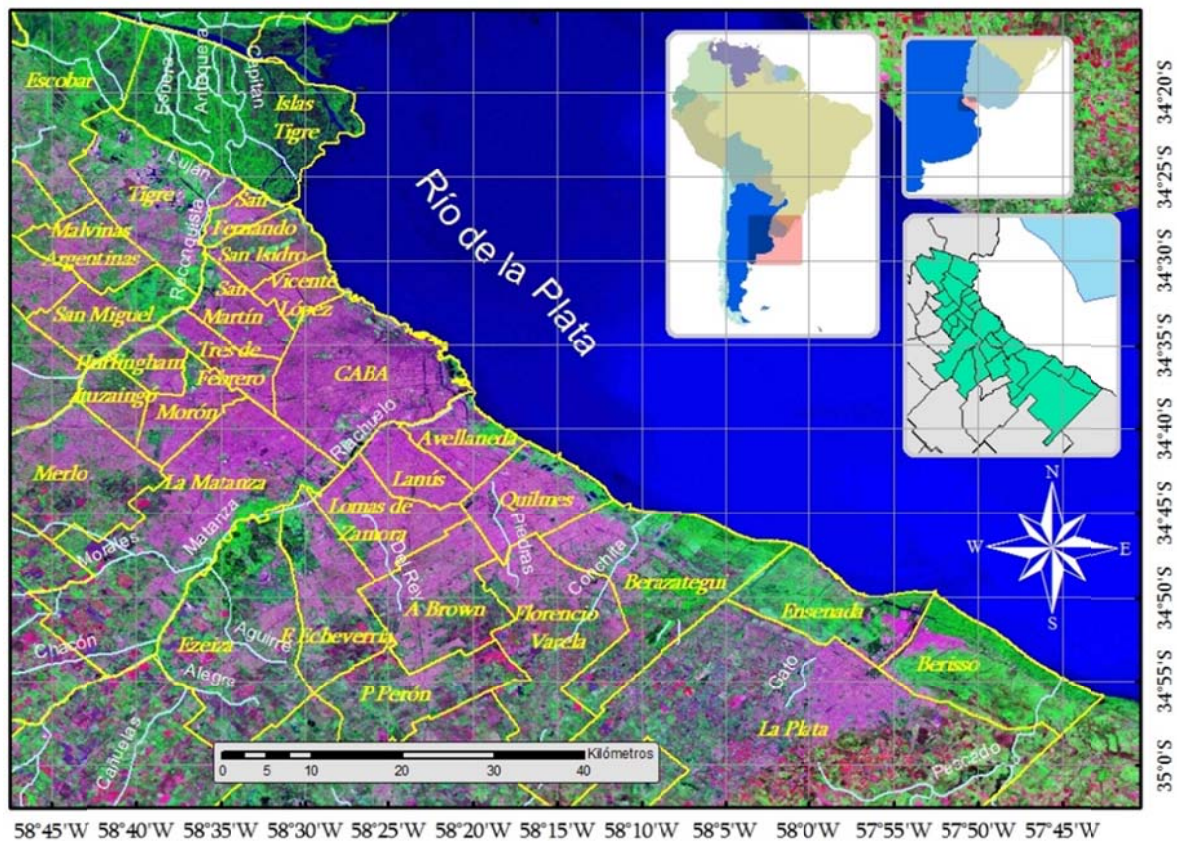


Figura 1.-Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA).

A partir de una metodología basada en la modelación numérica, se han desarrollado mapas de riesgo de altura y duración de inundación en la zona costera de la RMBA debido a ondas de tormenta del Río de la Plata, tanto para un escenario base como para probables escenarios futuros en el contexto del Cambio Climático. De esta manera se complementan los mapas de riesgo obtenidos en estudios anteriores (Re *et al.*, 2004), dónde sólo se consideraba el nivel máximo alcanzado.

METODOLOGÍA

Para construir los mapas de riesgo de inundación se utilizó un modelo hidrodinámico integrado en la vertical, que representa satisfactoriamente la dinámica del Río de la Plata. A partir de series temporales de nivel del río correspondientes a tres estaciones costeras (Tigre, Buenos Aires y La Plata), las cuales tienen asignada un área de influencia sobre las cuales se considera que los niveles son uniformes, se generaron diferentes análisis estadísticos teniendo en cuenta las alturas

y duraciones de las inundaciones. Por un lado, se estudió la frecuencia de ocurrencia de eventos intranuales; por el otro, se efectuó un análisis de extremos bivariado para eventos interanuales. Del cruce entre estas estadísticas y el modelo digital del terreno surgieron los mapas de riesgo de inundación.

Análisis estadístico de niveles y duraciones

Se utilizó la serie temporal de niveles del río registrada en la ciudad de Buenos Aires, provista por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) correspondiente al período 1990-1999 (considerado como escenario de base) para identificar eventos de inundación y caracterizar estadísticamente su duración y frecuencia de ocurrencia. Para ello, se establecieron diferentes umbrales de nivel relacionados con la cota topográfica del terreno, siendo el umbral mínimo el valor 1.60 m (respecto del cero local, cero del Riachuelo o cero MOP), consistente con el HAT (*High Astronomical Tide*) de Buenos Aires (Fiore et al., 2001).

Se efectuó un análisis de frecuencia de ocurrencia de niveles y duraciones. En la Figura 2 se muestra la distribución de frecuencia relativa de ocurrencia de niveles que surge de esa serie, habiéndose tomado un intervalo de clase de 10 cm. Se observa una distribución prácticamente simétrica, con una mediana de 0.80 m. La distribución acumulada de ocurrencia de niveles, que se obtiene a partir de la frecuencia relativa, indica que el umbral mínimo se ve superado un 9% del tiempo, aproximadamente, es decir, 5 semanas por año.

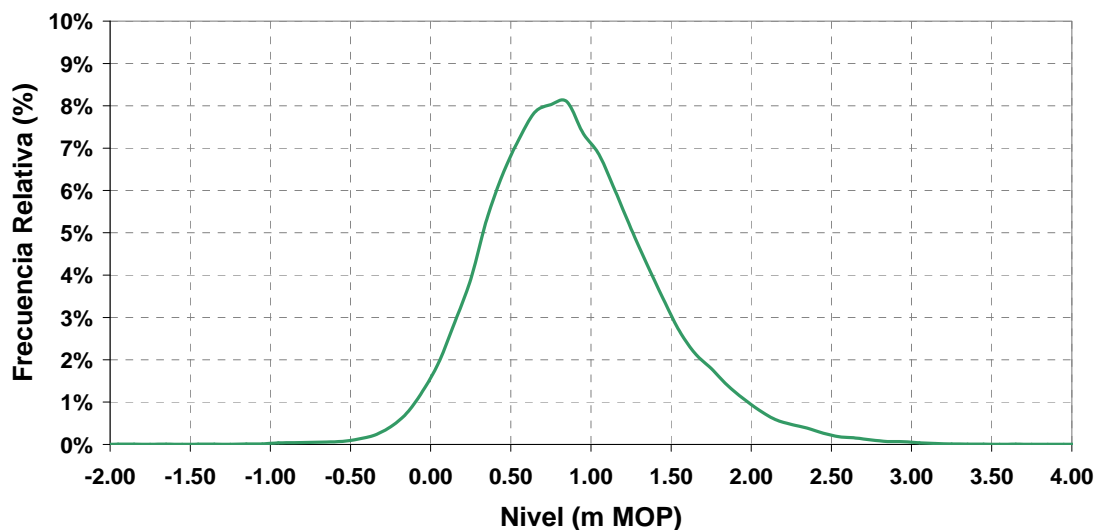


Figura 2.-Frecuencia relativa de niveles observados en Buenos Aires

Para la frecuencia de ocurrencia de duraciones se agruparon los eventos según intervalos discretos de 2 horas de duración. En la Figura 3 se muestran los histogramas de frecuencia relativa para umbrales desde 1.60 a 2.20 m, espaciados cada 0.20 m. Nótese que entre el 60% y el 80% de los eventos tiene una duración menor a 6 hs y para casi el 90 % del tiempo su duración es menor a 12 hs.

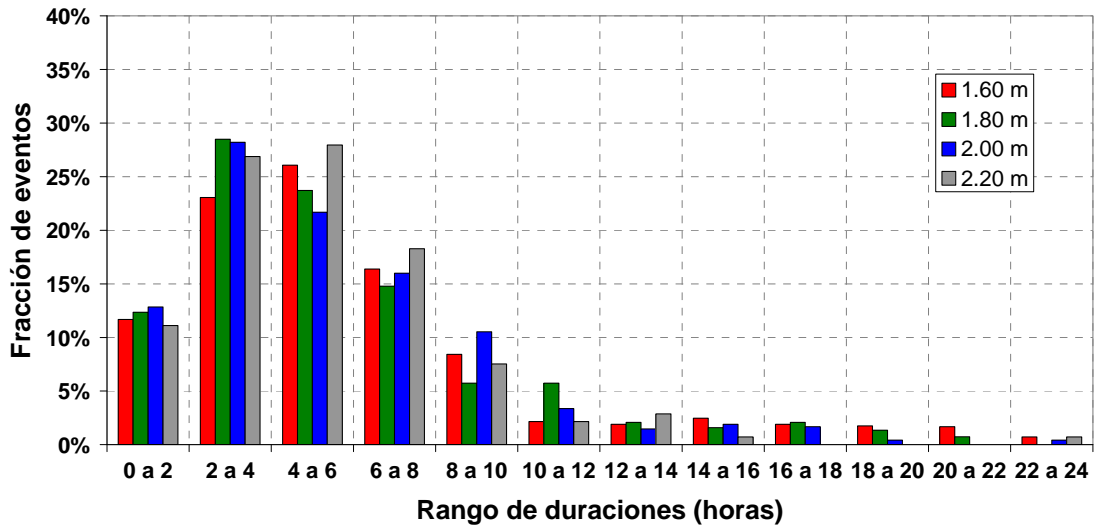


Figura 3.-Frecuencia relativa de duración de eventos

El análisis estadístico de los eventos extremos fue realizado con una función de distribución bivariada que tiene en cuenta el nivel máximo (pico) y la duración de la inundación, basada en el modelo logístico de Gumbel presentado en Yue (2001). El mínimo período entre eventos que se utilizó para el análisis fue mensual. Esto se justifica por la relativamente alta frecuencia anual de los eventos extremos (asociados a Sudestadas) y su relativamente corta duración (del orden del día). El nivel del Río de la Plata se encuentra influenciado por los efectos de la marea astronómica, de carácter determinístico, y de los procesos meteorológicos (vientos, presión), que pueden considerarse de carácter estocástico. Se procedió a filtrar las series de niveles observados de los efectos de la marea astronómica, simplemente restando los niveles informados en la Tabla de Predicción de Marea Astronómica para el puerto de Buenos Aires producida por el SHN, pero manteniendo el nivel medio, que en Buenos Aires es de alrededor de 0.80 m.

Se analizaron los valores máximos tanto de niveles como de duración de los eventos utilizando la distribución GEV Tipo I. Los parámetros de ajuste de la distribución de Gumbel, posición y escala, fueron estimados por el método de los momentos. La Figura 4 presenta la duración en función del tiempo de recurrencia para el umbral mínimo, con los valores observados y los obtenidos con el ajuste de la distribución teórica. De igual manera, se determinaron distribuciones marginales para los otros umbrales.

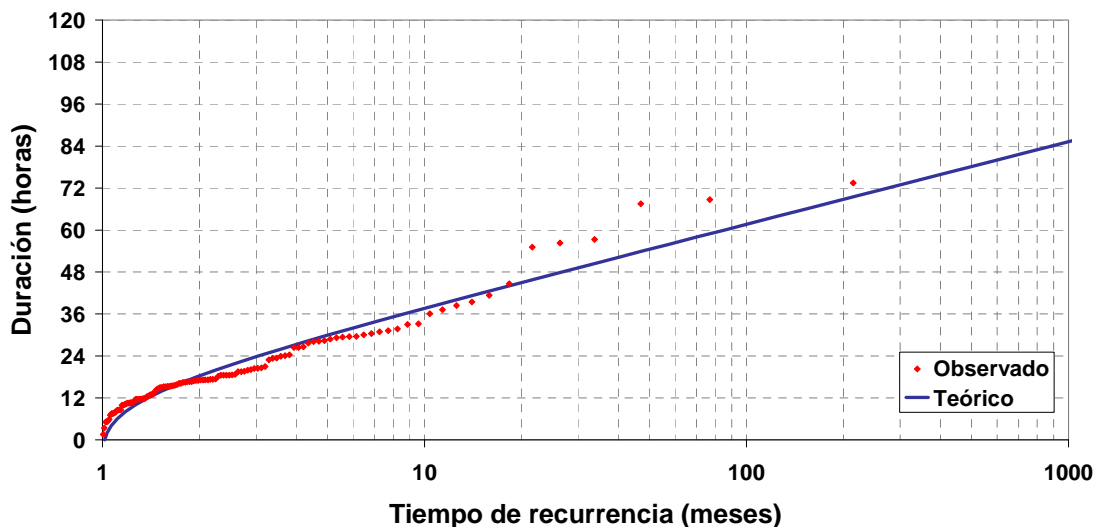


Figura 4.-Tiempo de recurrencia de duraciones para el umbral mínimo

La función de distribución de probabilidad conjunta permite obtener, a partir de una dada probabilidad de ocurrencia o un período de retorno de un evento de tormenta, varias combinaciones de picos de tormenta y duraciones, y viceversa. En la Figura 5 se aprecian las posibles combinaciones de duraciones y picos máximos con sus correspondientes curvas de nivel asociadas a distintos valores de probabilidad de no excedencia generadas para el umbral mínimo (1.60 m).

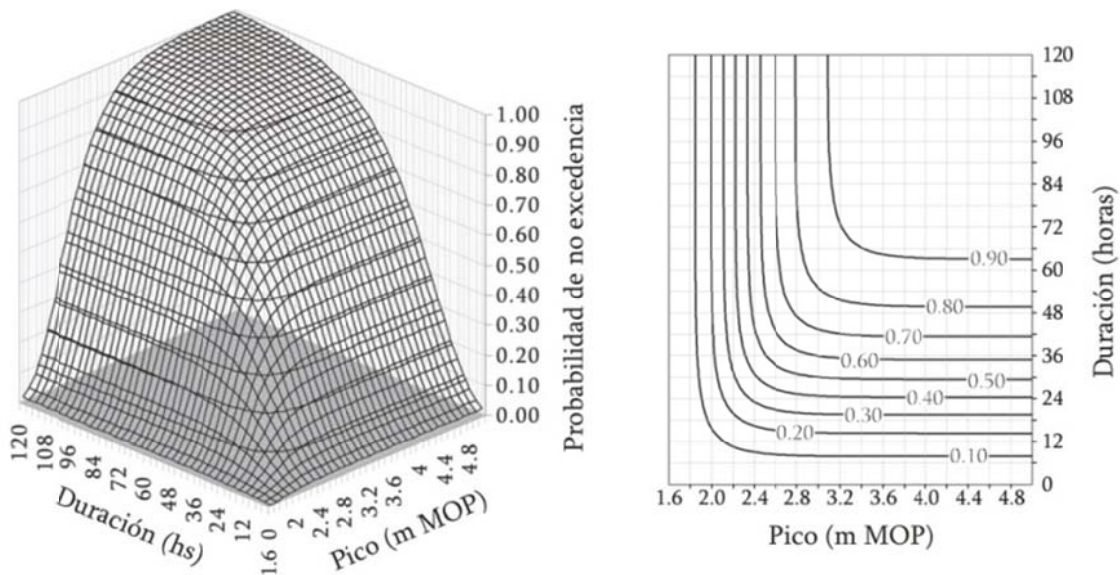


Figura 5.-Función de distribución conjunta y curvas de nivel de picos de tormenta y duraciones para el umbral mínimo (1.60 m).

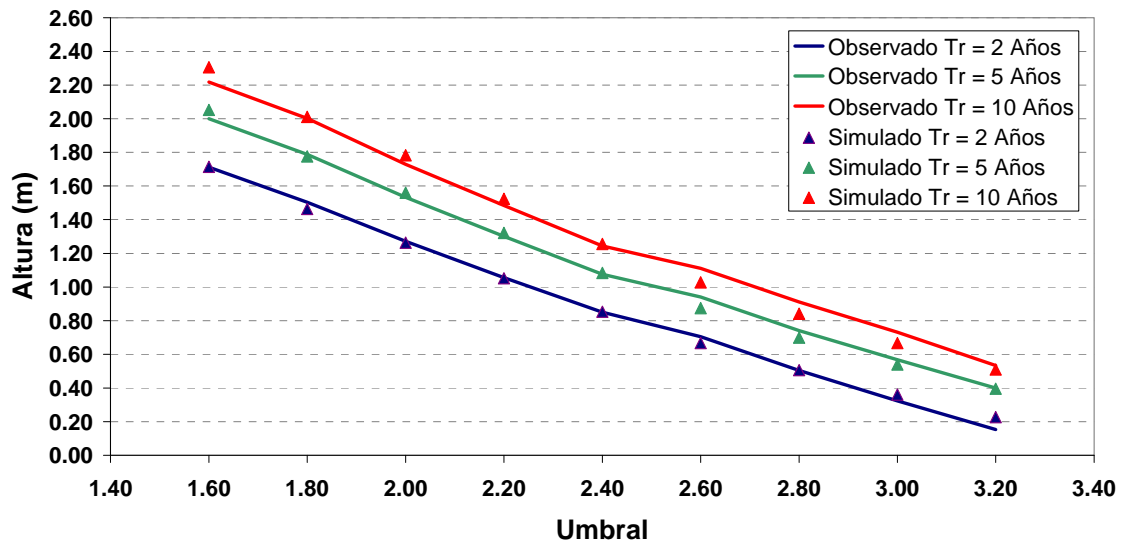
Dado que existen infinitas combinaciones de pico y duración para una determinada recurrencia, se utilizan las distribuciones condicionales para limitarlas. Estas distribuciones muestran los posibles picos o duraciones a partir de un valor de pico o duración. Con las distribuciones condicionales se puede elaborar información estadística acerca de la altura y duración de la inundación para los diferentes períodos de retorno.

Modelación matemática

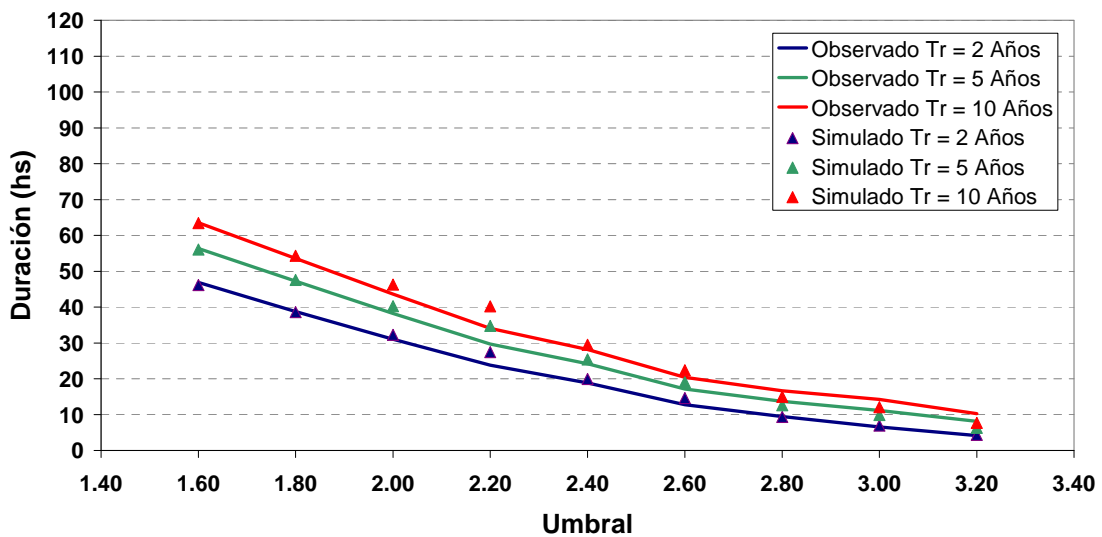
Para la simulación de niveles de agua en el Río de la Plata, se dispuso del modelo hidrodinámico bidimensional en el plano horizontal RPP-2D (Re y Menéndez, 2003, 2007), cuyo dominio incluye al Río de la Plata y a su Frente Marítimo de modo de poder simular, además de las ondas de marea astronómica, la generación de ondas de tormenta. El software de base utilizado fue el HIDROBID II (Menéndez, 1990), que resuelve numéricamente las ecuaciones hidrodinámicas para aguas poco profundas. 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 impuso como una condición de borde. El modelo consta de tres bordes oceánicos que constituyen contornos matemáticos: i) Borde Este (contorno impenetrable), ii) Borde Norte (contorno no reflejante), iii) Borde Sur, donde se impone la onda de marea astronómica. La información de campos de vientos utilizada corresponde a las series de reanálisis de NCEP/NCAR, discretizados temporalmente cada 24 horas (Kalnay et al., 1996).

El modelo hidrodinámico RPP-2D ya había sido calibrado y verificado en etapas, que incluyeron escenarios de marea astronómica predicha, nivel medio para condiciones actuales, curvas de frecuencia de niveles en Buenos Aires y simulación de grandes ondas de tormenta. En el presente estudio se repitieron, a modo de verificación, los ensayos de calibración, evaluándose además la utilización de campos de vientos con intervalos temporales de 6 horas (4 valores diarios), en lugar de las 24 horas (valor diario) originales.

El análisis estadístico presentado en el párrafo anterior fue replicado utilizando la serie de niveles simulados en Buenos Aires para el escenario de base. En el caso del análisis de frecuencia, se observó la misma tendencia entre el comportamiento de los eventos simulados y los observados. En cuanto al análisis estadístico de extremos, se evidenció una buena performance en cuanto a simulación de alturas de inundación, aunque una significativa sobrestimación de las duraciones (del orden del 60%) por parte del modelo. Esta discrepancia se adjudica a la baja resolución espacial y temporal de la información de los campos de viento. Por lo tanto, para cada umbral y para las distintas recurrencias, se ha calculado el factor que debe aplicarse al valor de las alturas y duraciones simuladas para que sean consistentes con las observadas. Estos resultaron relativamente independientes de la recurrencia, para cada umbral, por lo que se utilizó un valor promedio por umbral (Figura 6).



a) Altura de inundación



b) Duración de inundación

Figura 6.- Comparación resultante entre valores simulados y observados.

MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN

Los mapas de riesgo de inundación fueron construidos en base a los análisis estadísticos de los resultados del modelo correspondientes a las tres estaciones costeras (Tigre, Buenos Aires y La Plata). Se utilizó como base el Modelo Digital del Terreno (MDT) producido durante el proyecto

Impact of Global Change on the Coastal Areas of the Río de la Plata: Sea Level Rise and Meteorological Effects (Barros, 2005). Para una mejor interpretación de los mapas de riesgo de inundación se efectuó un procesamiento del MDT, interpolando los valores altimétricos cada 1000 m y construyendo una grilla de 250 m de lado.

Los mapas de frecuencia de inundación tienen como objetivo representar aquellas zonas que son susceptibles de inundaciones con una frecuencia al menos anual. Por lo tanto, fueron elaborados a partir del tiempo de superación promedio del umbral de inundación por año (0.5, 1, 2, 4, 8, 12 y 16 semanas). Se observa que las zonas más vulnerables se encuentran en el norte de la RMBA, en los partidos de Tigre y Escobar, incluyendo las zonas de islas, dónde las duraciones máximas de inundación son de hasta 8 semanas. Le siguen en importancia, al sur, los partidos de Quilmes y Berazategui, con duraciones de hasta 4 semanas y finalmente una franja lindante a las costas de Ensenada y Berisso (Figura 7).

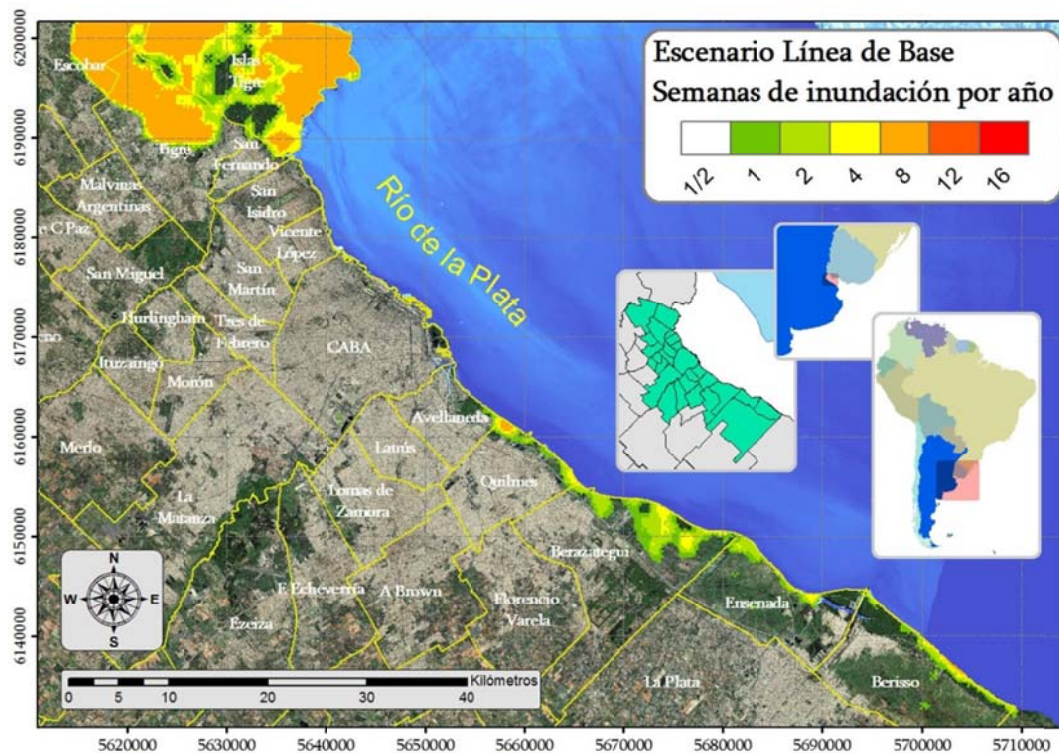
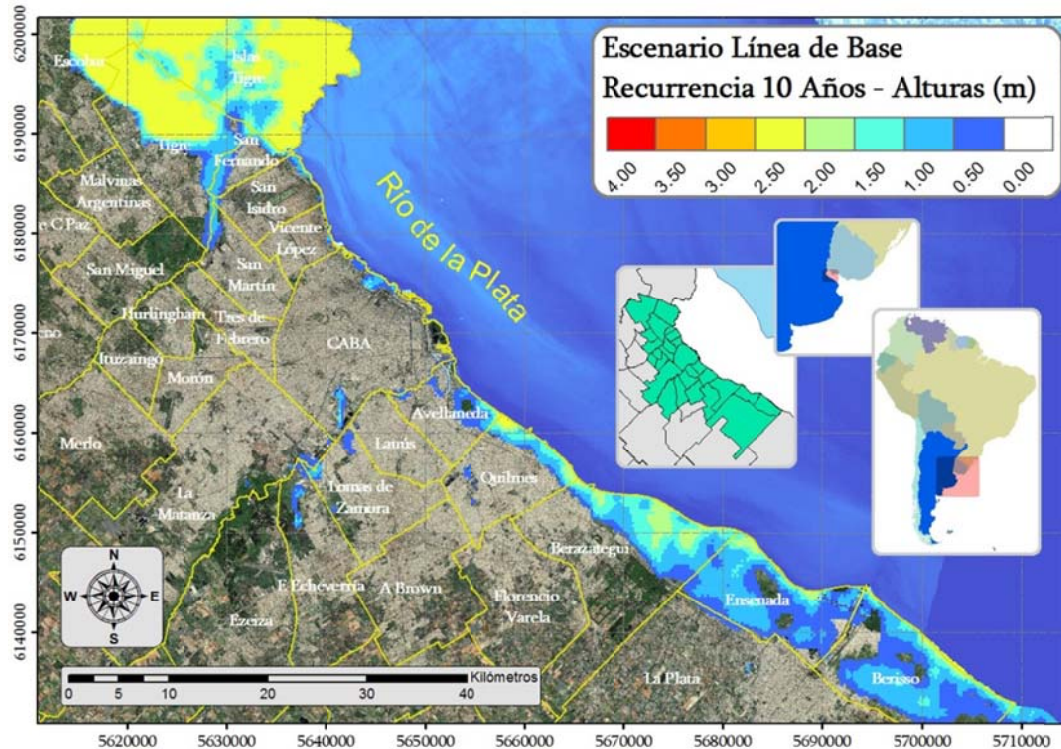


Figura 7.-Mapas de Riesgo de Inundación (Duración, Escenario Base).

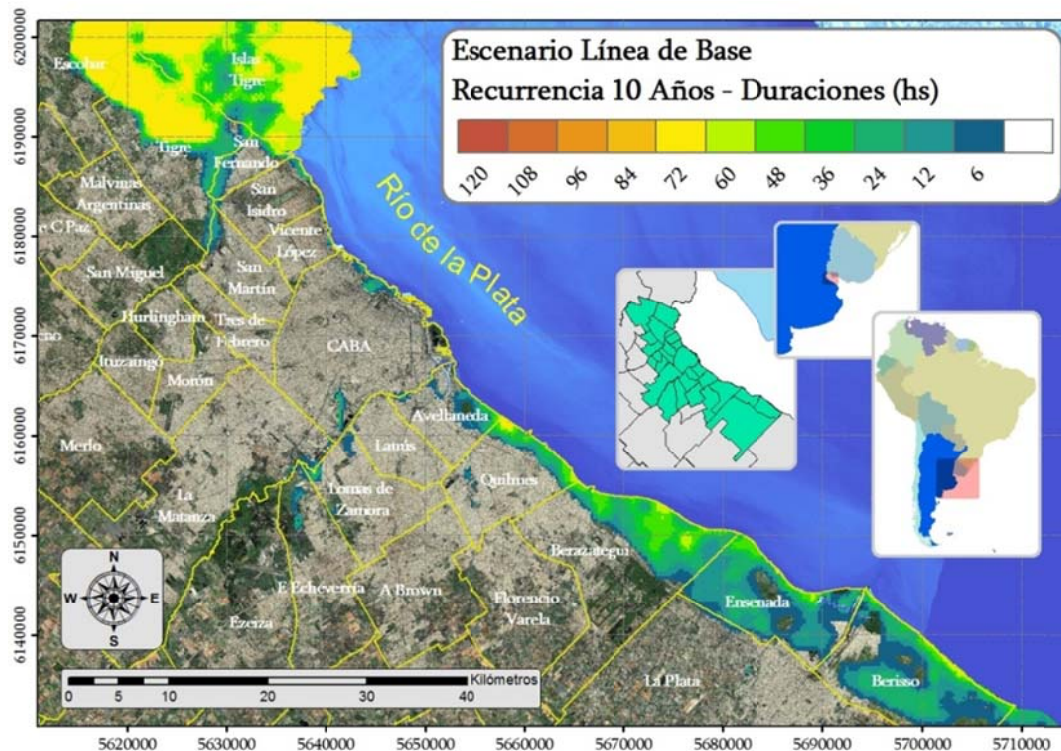
Para los eventos extremos se produjeron dos tipos de mapas de riesgo de inundación: de alturas y de duraciones máximas de inundación. Las áreas máximas de inundación se delimitan a partir del nivel pico. Luego, a partir de las distribuciones marginales (límite asintótico de las distribuciones conjuntas), se determina una duración y altura de inundación utilizando como valor umbral la cota topográfica de la zona inundada. Estos mapas se construyeron para las recurrencias de 2, 5 y 10 años.

En la Figura 8 se muestran los mapas de riesgo de inundación de alturas y duraciones para el escenario base con una recurrencia de 10 años, a partir de los cuales se infieren conclusiones acerca de las áreas inundadas. Los máximos valores de inundación se registran en las áreas correspondientes a la estación Tigre, en dónde las duraciones máximas son del orden de los 3 días (72 hs), con alturas de inundación de hasta 2.50 m. En zonas adyacentes a Tigre y Escobar (río Reconquista) las duraciones máximas son del orden diario (24 hs), y las alturas de hasta 1 m, análoga situación se registra en la costa norte de San Isidro. En las áreas correspondientes a la estación Buenos Aires se identifican áreas inundadas en la zona norte de la Ciudad Autónoma de

Buenos Aires (CABA), áreas lindantes al río Matanza–Riachuelo (límite sur de la CABA) y zona sur de Avellaneda, con duraciones máximas de 12 hs y alturas de hasta 1 m. En el partido de Quilmes las duraciones máximas son de 24 hs y alturas de 1.50 m. En las áreas costeras de la estación La Plata, se distinguen por un lado el partido de Berazategui, en dónde se registran alturas máximas de 1.50 m y duraciones de 36 hs. En Ensenada y Berisso predominan las duraciones máximas de 24 hs y las alturas son del orden de 1 m.



a) Alturas (m)



b) Duraciones (hs)

Figura 8.- Mapa de Riesgo de Inundación (Escenario Base). Recurrencia 10 Años

Escenarios futuros

Se simularon dos escenarios futuros de Cambio Climático, planteados a través de una simulación continua de una década. Los escenarios de modelación planteados incluyen al escenario de línea de base (1990-1999), y dos escenarios futuros (2030-2039 y 2070-2079).

Para las simulaciones de los escenarios futuros fueron considerados los mismos forzantes de caudales y marea que los del escenario base. Los forzantes que se modificaron fueron el nivel medio del mar y los campos de vientos. Respecto del nivel medio del mar, para la década del 2030 se planteó un aumento del nivel medio del mar de +19 cm mientras que para la década del 2070 un aumento de +50 cm, que son valores máximos del aumento del nivel medio, correspondientes a la envolvente de diferentes modelos utilizados en el IPCC (Re et al., 2004). Los campos de vientos para los escenarios futuros se obtuvieron del modelo climático HADCM3 (*Hadley Centre for Climate Prediction and Research de Inglaterra*) (Camilloni y Bidegain, 2002).

El aumento del nivel medio en las costas de la RMBA es prácticamente igual al aumento del nivel medio del mar. En cuanto a la frecuencia de niveles, se observa un traslado de las curvas de frecuencia para los escenarios futuros, lo que representa un aumento de la ocurrencia en los niveles más altos (prácticamente existe una duplicación del tiempo de inundación, entre el escenario base y el 2030 y el 2030 y 2070) (Figura 9). Las frecuencias relativas de duración de inundación no muestran cambios significativos, observándose igual comportamiento en toda la costa de la RMBA. En general, se observa una disminución en las frecuencias de las duraciones menores y un incremento en las de mayor duración.

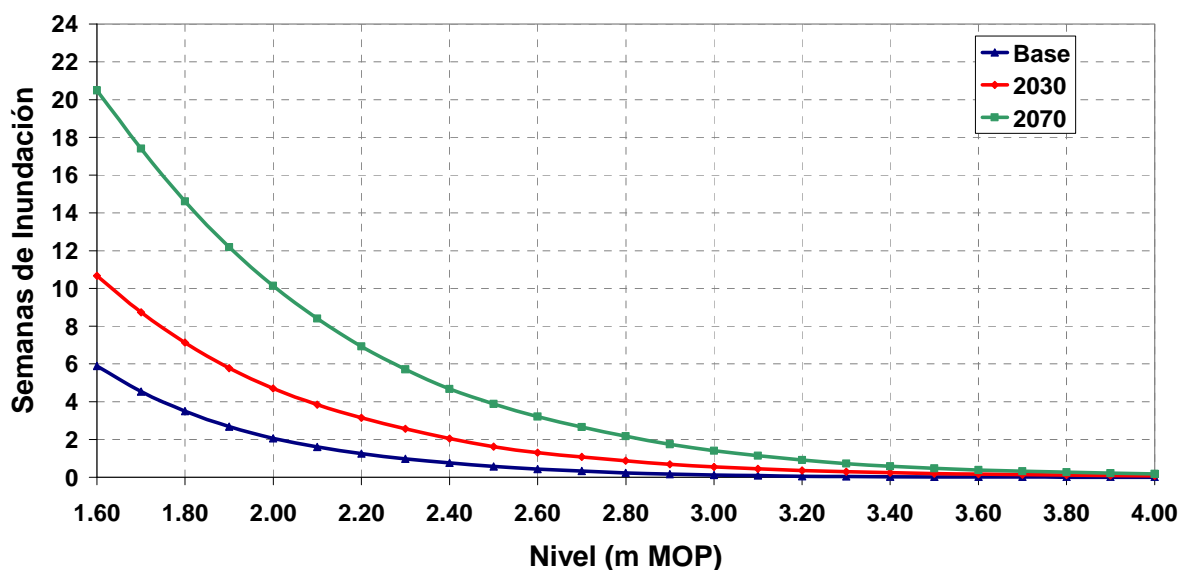
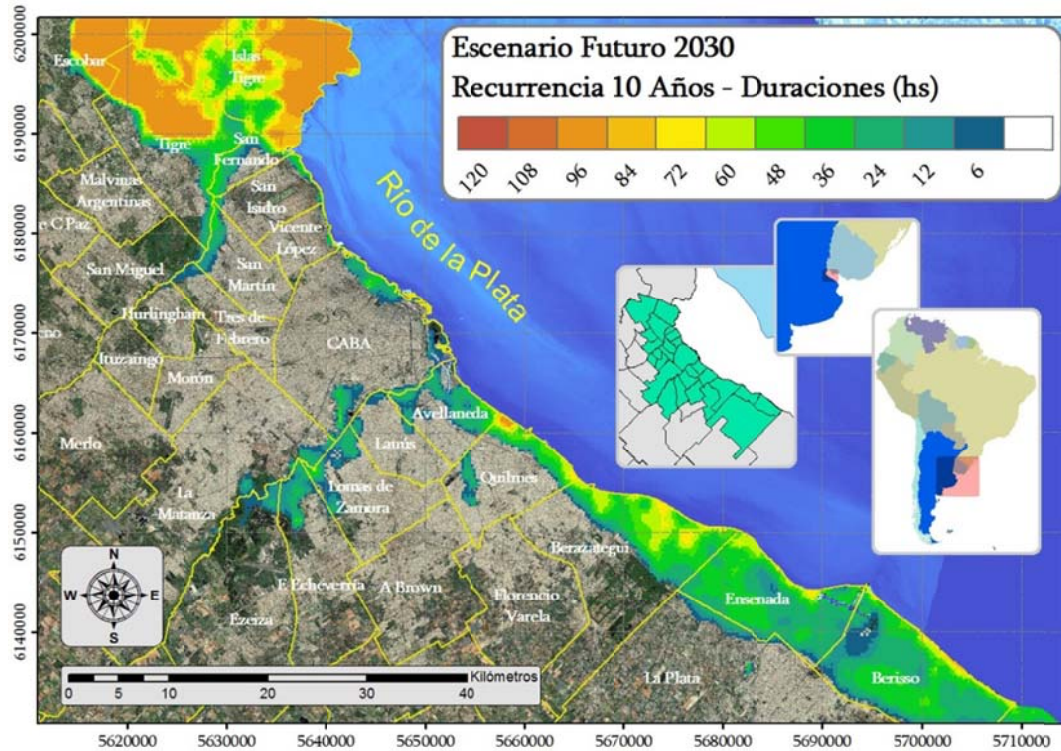


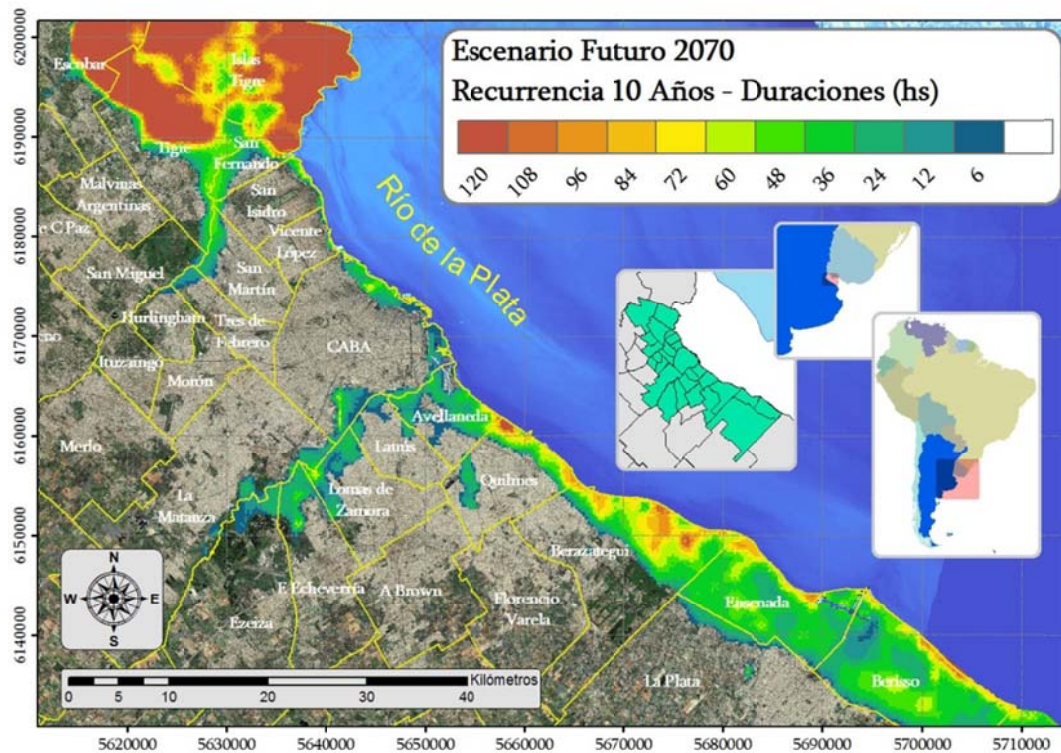
Figura 9.- Semanas de inundación promedio en las costas de la RMBA.

A partir del análisis estadístico para eventos extremos, se construyeron los mapas de riesgo de alturas y duración de inundación para los dos escenarios futuros (Figura 10). Al igual que en el escenario de línea de base se analizan los resultados para la recurrencia de 10 años. En general, las zonas más vulnerables son las mismas que se observan para el escenario base, pero con diferencias en los valores de alturas y duración de la inundación. En la zona norte de la costa de la RMBA las duraciones máximas pasan a tener un valor del orden de los 3 días a 4 días para el 2030 y 5 días para el 2070, con alturas de inundación de hasta 2.50 m en el escenario base y de hasta 4.00 m para los escenarios futuros. En las costas de la CABA, se encuentran duraciones máximas de 36 hs y 48 hs y alturas de hasta 1.50 m y 2.00 m, para el 2030 y 2070 respectivamente (para el escenario base se obtuvieron duraciones máximas de 12 hs y alturas de hasta 1.00 m). En la zona sur de la RMBA

(Quilmes) las duraciones máximas son de 48 hs y 60 hs y alturas de 2.00 m y 2.50 m para el 2030 y 2070 respectivamente (duraciones máximas de 24 hs y alturas de hasta 1.50 m para el escenario base).



a) Escenario 2030-2039



b) Escenario 2070-2079

Figura 10.- Mapas de riesgo de duración de inundación.

CONCLUSIONES

Se ha planteado e implementado una metodología original para la construcción de mapas de riesgo de inundación de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) por crecidas del Río de la Plata, que permite considerar simultáneamente la altura máxima y la duración de las inundaciones. Estos mapas proveen una información muy útil para la toma de decisión en cuanto a la gestión del riesgo. No sólo se construyeron los mapas de riesgo para las condiciones climáticas actuales, sino también para posibles escenarios futuros, dentro del contexto del Cambio Climático, lo cual permite definir tendencias de evolución del riesgo.

Los mapas de riesgo de inundación se construyeron en base a resultados obtenidos de simulaciones numéricas hidrodinámicas continuas sobre una ventana de tiempo de una década. Esto constituye una mejora sensible sobre la metodología anterior (Re et al., 2004), que se basaba en la simulación de eventos extremos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barros, V.R.** (2005). "Global Climate Change and the Coastal Areas of the Río de la Plata". *A Final Report Submitted to Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC)*, Project No. LA 26.
- Camilloni, I., Bidegain, M.** (2002). "Regional climate baselines scenarios for the Río de la Plata basin", *Assessments of Impacts and adaptation to climate change in multiple regions and sectors (AIACC) - Río de la Plata Workshop*, Montevideo, Uruguay.
- Escobar, G., Vargas, W.M., Bischoff, S.** (2004). "Wind tides in the Río de la Plata estuary: meteorological conditions", *International Journal of Climatology*, 24, 1159–1169.
- Fiore, M., D'Onofrio, E., Di Biase, F., Stadelmann, M.** (2001). "Statistical analysis of storm surges in Buenos Aires". *Join Assemblies of the International Association for the Physical Sciences of the Oceans and International Association for Biological Oceanography*, Mar del Plata, Argentina.
- Kalnay, E. et al.** (1996). "The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 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*, 6 (1).
- 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", *XIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF'2003*, Bahía Blanca, Argentina.
- 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*, Sao Pedro, Brasil.
- Re, M., Menéndez, A.N.** (2007). "Impacto del Cambio Climático en las Costas del Río de la Plata", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7 (1).
- Yue, S.** (2001). "The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event", *Advances in Water Resources*, vol. 24, pp. 179 – 185.