

Anticipando la crecida, cuarto capítulo. Mapas de niveles y duración de inundación.

*Lucas Storto*⁵, *Mariano Re*⁵, *Emilio Lecertua*^{5,6}, *Leandro Kazimierski*^{5,6}, *Magdalena Falco*^{1,2}, *Federico Ariel Robledo*^{1,2}, *Diego Moreira*^{1,2}, *Elodie Briche*², *Ana Murgida*³, *Ignacio Gatti*⁴, *Mariano Duville*⁴, *Hugo Partucci*³, *Blas Amato*³, *Marcos Saucedo*^{1,2}, *Claudia Campetella*^{1,2,7}.

(1) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN-UBA.

(2) Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA - UMI IFAECI/CNRS.

(3) Programa de Investigación en Recursos Naturales (PIRNA), Departamento de Antropología, FFyL-UBA.

(4) Instituto Geográfico Nacional (IGN-Argentina).

(5) Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA-Argentina).

(6) Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UBA.

(7) Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina).

E-mail: lucas.storto@yahoo.com.ar

RESUMEN: El Barrio La Ribera en Quilmes (Provincia de Buenos Aires), en la costa del Río de la Plata y con una población de unos 7000 habitantes, con frecuencia se encuentra sometido a eventos en los que la persistente acción de vientos moderados a fuertes del S/SE deriva en un considerable aumento de nivel del río provocando inundaciones (*Sudestadas*).

Enmarcado en el Proyecto Interdisciplinario *Anticipando la Crecida*, cuyo objetivo principal es la mejora de la gestión del riesgo de desastres asociados con eventos de lluvia intensos e inundaciones en esta zona, se presenta la generación de mapas de niveles y duración de inundación asociados a diferentes análisis estadísticos.

A partir de una estadística de niveles y duraciones de inundación y el modelo digital del terreno (MDT del barrio) se construyeron los respectivos mapas. La estadística vinculada a la situación del Río de la Plata corresponde a datos de la Estación Palermo en Buenos Aires del período 1989-2013. El MDT del barrio se construyó a partir de unos pocos puntos observados y una metodología de detección de isolíneas obtenidas del análisis de imágenes satelitales.

INTRODUCCIÒN

Según la Organización Meteorológica Mundial (Jacks et al., 2010), un peligro natural es una situación meteorológica determinada con potencial para infligir pérdidas o daños a la comunidad y al medio ambiente. Un desastre natural es un fenómeno extremo causado por un peligro natural que afecta gravemente el tejido de una comunidad y suele requerir la intervención del gobierno para devolver la comunidad a la normalidad. El impacto general de los desastres naturales puede reducirse significativamente gracias a la prevención y mitigación de desastres. La mitigación de desastres es el proceso de gestionar los riesgos asociados con desastres naturales potenciales de modo que se minimicen.

En este trabajo, enmarcado en el *Proyecto Interdisciplinario Anticipando la Crecida*, cuyo objetivo principal es la mejora de la gestión del riesgo de desastres asociados con eventos de lluvia intensos e inundaciones en el Barrio La Ribera en Quilmes (Provincia de Buenos Aires) en la costa del Río de la Plata, se presenta la generación de mapas de niveles y duración de inundación asociados a diferentes análisis estadísticos, considerados insumos necesarios para el planteo de un sistema de alerta para la zona.

Para la interpretación de la topografía de la Ribera de Quilmes se desarrolló una metodología de mejora de un modelo digital del terreno obtenido a partir de unos pocos puntos, mientras que para la generación de los mapas de niveles y duración de inundación se siguió la metodología planteada por Lecertua (2010).

MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

Resulta necesario para definir las características de una inundación costera contar una representación lo suficientemente precisa de los niveles altimétricos de la zona de estudio. En este caso, y con el objetivo de tener la mejor representación topográfica posible de la Ribera de Quilmes se construyó un Modelo Digital del Terreno (MDT) en base a la información proveniente de distintas fuentes. Los límites considerados del MDT están determinados por la traza de la AU Buenos Aires – La Plata, la costa del Río de la Plata, el Canal Alsina / IMPA y la calle Echeverría.

En primer lugar, se utilizó la información de un relevamiento topográfico realizado por la Unidad Ejecutora del Proyecto de la Ribera de Quilmes (UEPRQ, Municipalidad de Quilmes), que incluye la información altimétrica de 85 puntos de la zona inundable. En la Figura 1 se muestra el MDT resultante (MDT *Base*), conformando una capa *Raster* con celdas de 20 x 20 m producto de la interpolación mediante la técnica Distancia Inversa Ponderada (IDW, *Inverse Distance Weighting*) de los puntos relevados. Los mapas se elaboraron en base al sistema de coordenadas Gauss – Krüger en faja 5, en el marco POSGAR 98.

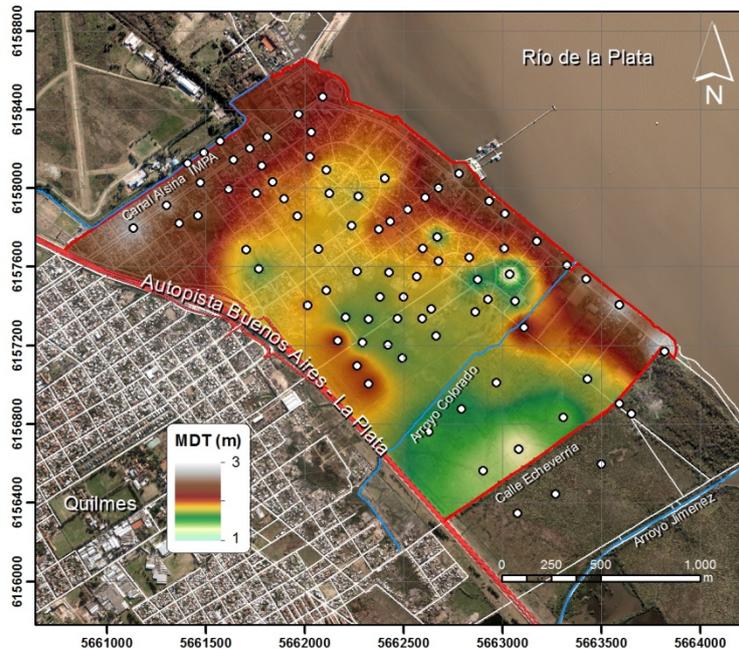


Figura 1.- MDT Base obtenido con los puntos de la UEPRQ.

Para mejorar la precisión del MDT Base, se desarrolló una metodología de incorporación de nuevos puntos a la interpolación basada en la obtención de isolíneas del terreno mediante máscaras de agua a partir de la composición de bandas de imágenes satelitales.

La zona de estudio se ubica en la intersección de dos regiones de cobertura del satélite *LANDSAT* (designadas como *Path 225 – Row 84* y *Path 224 – Row 84*). Inicialmente se colectaron todas las imágenes de ambas zonas de cobertura del período 1979-2014, no teniendo en cuenta a aquellas con una cobertura nubosa superior al 50%, ascendiendo a un total de 1020 imágenes. El análisis de esta información consistió en identificar aquellas que hayan registrado cuerpos de agua eventuales en la zona de la Ribera de Quilmes, resultando en un total de 42, algunas de las cuales se ilustran en la Figura 2.

Partiendo de la hipótesis de que la curva resultante de la intersección entre el espejo de agua captado por imagen satelital y el terreno está a una misma cota, se obtuvieron una serie de isolíneas del terreno para corregir el MDT de base aportando nuevos puntos para la interpolación. Las imágenes seleccionadas finalmente para el procesamiento fueron tres. Los criterios para su selección fueron los siguientes:

1. Q
 ue el evento de inundación esté asociado a una crecida del Río de la Plata, según la serie de niveles de la Estación Palermo y considerando como evento extremo aquel que supera el umbral de 2.70m M.O.P (referencia del Cero del Riachuelo con una diferencia de 0.556m con el Cero del IGN).
2. Que el tiempo transcurrido entre que se genera la imagen satelital y se produce el pico de la crecida sea lo más reducido posible.
3. Que las imágenes correspondan a cuerpos de agua eventuales de dimensiones variables, para obtener curvas a distintos niveles para realizar la interpolación.

Con estos criterios, las tres imágenes *LANDSAT* seleccionadas para realizar el procesamiento del MDT se especifican en la Tabla 1 y se muestran en la Figura 2 (del lado izquierdo). Las imágenes satelitales estudiadas fueron captadas por el sensor *Thematic Mapper* (TM) del satélite *LANDSAT 5*. En los tres casos el tiempo entre el pico y la generación de la imagen resultó menor a dos días.

Tabla 1.- Descripción de las imágenes satelitales empleadas en el procesamiento del MDT.

ID Imagen	Fecha	Distancia al pico
LT52250842000139CUB00	18/05/2000 09:20:11	1 día, 12:20:11
LT52250842007014COA00	14/01/2007 09:39:18	0 días, 04:39:18
LT52250842008321CUB00	16/11/2008 09:27:43	0 días, 12:27:43

Se utilizó el indicador MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) (Xu, 2006) calculado a partir de la composición de bandas de las tres imágenes satelitales seleccionadas. El MDNWI surge como una modificación del método propuesto por McFeeters (1996) conocido como NDWI (*Normalized Difference Water Index*). El NDWI se expresa como:

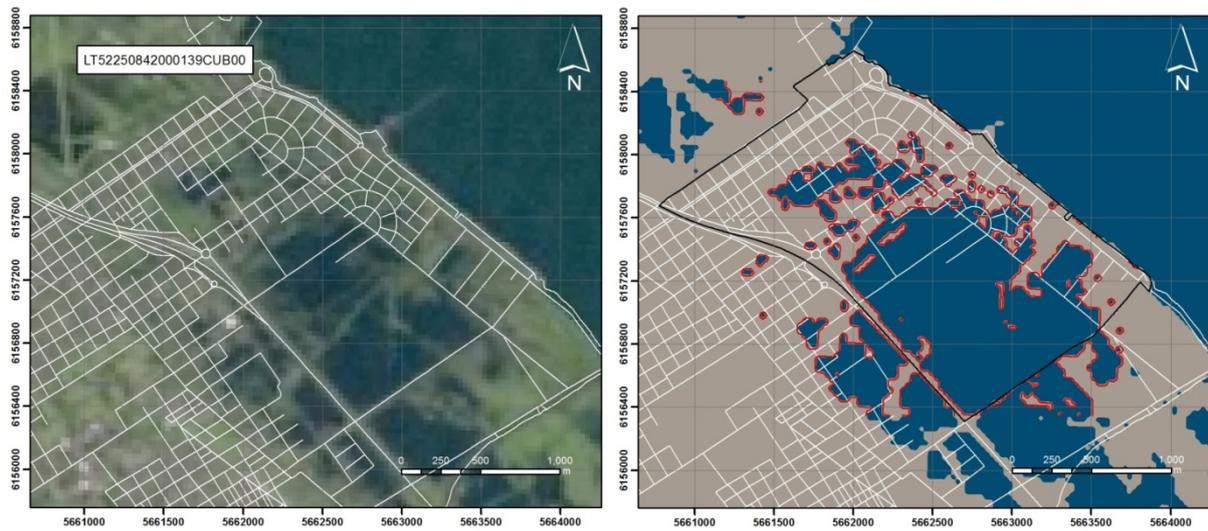
$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

donde *Green* es una banda verde, en nuestro caso la banda 2 del TM y *NIR* es una banda de infrarrojo cercano, como la banda 4 del TM. Este índice está pensado para: (1) maximizar la reflectancia del agua a través del uso de anchos de banda verdes; (2) minimizar la baja reflectancia del NIR que producen los cuerpos de agua; y (3) aprovechar la alta reflectancia del NIR producido por regiones de suelo y vegetación.. Como resultado de esta operación, en el *Raster* resultante, los cuerpos de agua tienen valores del índice positivos y por lo tanto se resaltan, mientras que la vegetación y el suelo usualmente tienen valor cero o negativo y se suprimen (McFeeters, 1996). Sin embargo, la aplicación del NDWI en regiones urbanizadas no alcanza satisfactoriamente ese objetivo. La información de agua extraída de dichas regiones está generalmente mezclada con la interferencia de las zonas urbanizadas.

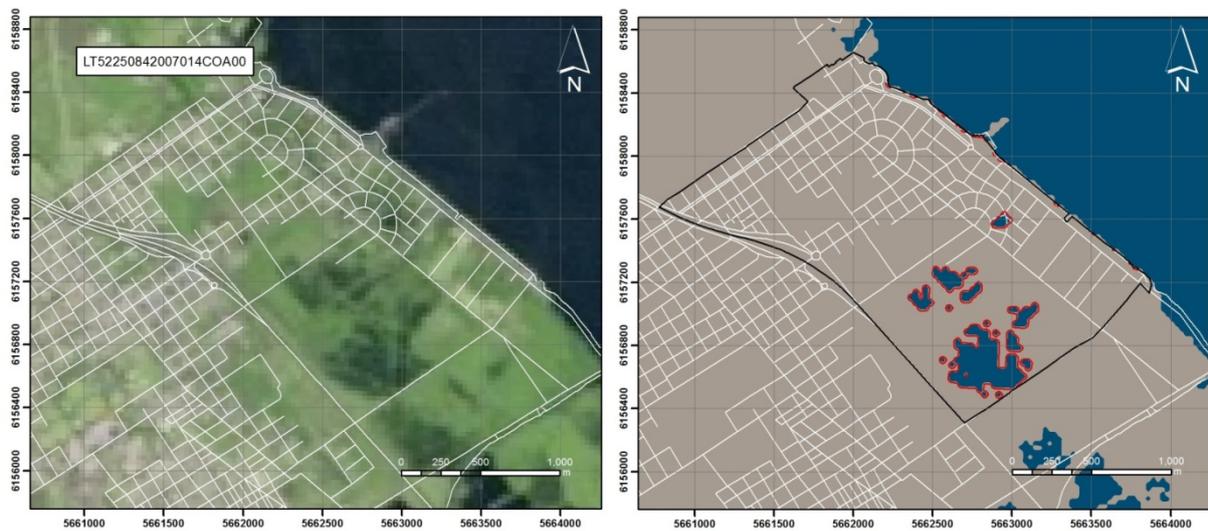
Según Xu (2006), si se utiliza una banda de infrarrojo medio (*Middle Infrared*, MIR) como la banda 5 del TM en lugar del infrarrojo cercano (banda 4), el nuevo índice asigna valores negativos a las zonas urbanizadas. Basado en esta suposición, el NDWI es modificado sustituyendo la banda NIR por la banda MIR. El NDWI modificado (MNDWI) se expresa como:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (2)$$

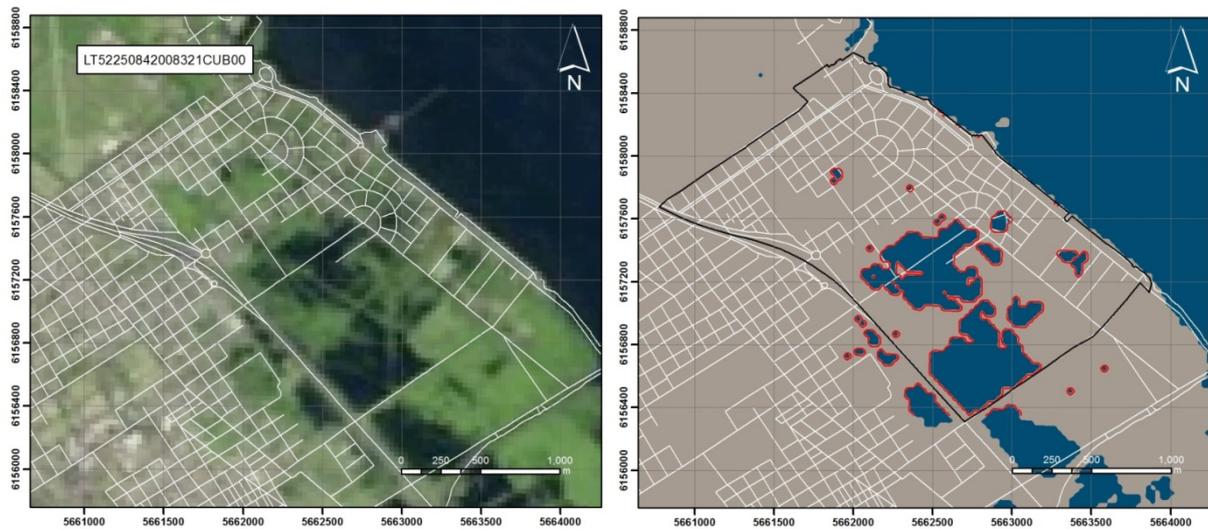
La aplicación del índice MNDWI para obtener los cuerpos de agua eventuales y las isolíneas correspondientes en la Ribera de Quilmes puede observarse en la Figura 2 (del lado derecho) junto con las imágenes satelitales seleccionadas.



a) Imagen del 18/05/2000



b) Imagen del 14/01/2007



c) Imagen del 16/11/2008

Figura 2.- Izquierda: imágenes LANDSAT seleccionadas para la detección de isolíneas del terreno (Tabla 1). Derecha: obtención de máscaras de agua e isolíneas del terreno según la composición de bandas MNDWI.

En el MDT *Base*, cada isolínea atraviesa varias celdas con distintos valores de cota. Para el procesamiento del MDT *Modificado*, se requiere asignar un valor de cota a cada curva de nivel en función de lo obtenido en el MDT *Base*. Se calculó por cada línea un promedio ponderado de la cota con un factor de ponderación igual a la longitud del tramo de isolínea que atraviesa cada celda del MDT *Base*. Esto se expresa como:

$$\bar{x} = \sum_1^i \frac{(l_i v_i)}{L} \quad (3)$$

donde l es la longitud del segmento en la celda, v es el valor de cota de la celda del *Raster* correspondiente a ese segmento y L es la longitud total de la línea.

Con las curvas de nivel obtenidas, sabiendo ahora qué valor de cota está asociado a cada una, se procedió a realizar una interpolación en la zona de estudio para obtener el MDT *Modificado*. El resultado de la nueva interpolación (método IDW) puede verse en la Figura 3, con las curvas de nivel de una de las imágenes satelitales a modo ilustrativo (LT52250842007014COA00).

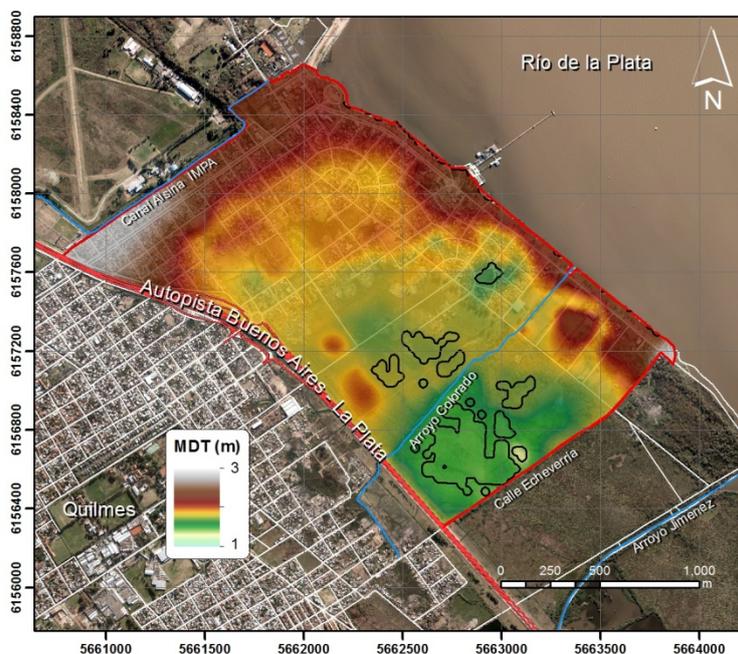


Figura 3.- MDT modificado con las isolíneas de la imagen captada el 14/01/2007.

ESTADÍSTICA DE NIVLES Y DURACIONES DE INUNDACIÓN

Los mapas de altura y duración de inundación se construyen en base a la información estadística de frecuencia de ocurrencia de eventos y recurrencia de eventos extremos. Los mapas que surgen a partir de la frecuencia de ocurrencia de alturas de inundación indican las áreas inundadas con una frecuencia al menos anual, mientras que los que se producen en base a períodos de retorno de eventos extremos muestran las áreas que se inundan con una periodicidad intra o interanual.

Frecuencia de ocurrencia de niveles

A partir de la serie temporal de valores horarios de nivel del Río de la Plata en la estación Palermo para el período 1989-2013 del SHN, se efectuó la estadística descriptiva de la misma y se detectaron eventos de tormenta significativos. En la Figura 4 se muestra la frecuencia acumulada de superación de niveles del río.

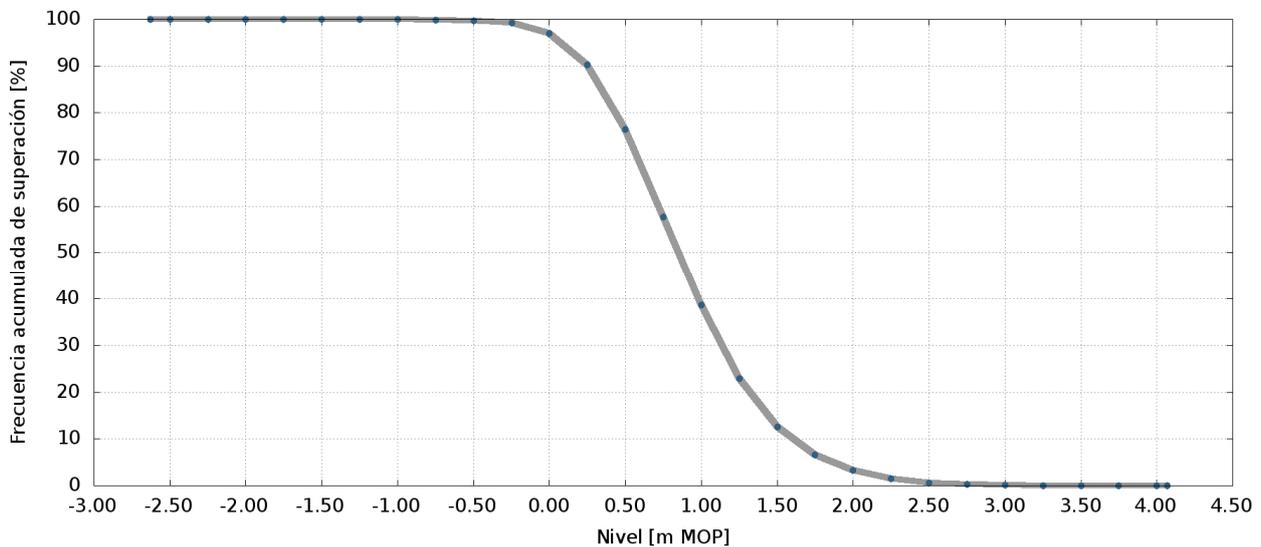


Figura 4.- Frecuencia acumulada de superación de niveles del Río de la Plata en Buenos Aires.

Distribución generalizada de valores extremos (GEV)

La teoría clásica de valores extremos describe como, para secuencias suficientemente largas de variables aleatorias independientes idénticamente distribuidas, los máximos de muestras del tamaño n , se pueden ajustar a una de tres familias básicas. Estas tres clases de distribución denominadas distribuciones de valores extremos de tipo I, II y II, son ampliamente conocidas como distribuciones de *Gumbel*, *Fréchet* y *Weibull* respectivamente. Estas distribuciones de valores extremos se combinan en una sola familia conocida como Distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV) expresada de la siguiente manera:

$$G(z) = \exp \left[- \left(1 + \gamma \cdot \frac{z - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \right] \quad (4)$$

Donde μ es el parámetro de localización, $\sigma > 0$ es el parámetro de escala y γ es el parámetro de forma. La unificación de las tres familias originales en una única familia, simplifica la implementación estadística. A través de la inferencia del parámetro de forma, los propios datos determinan el comportamiento más apropiado de la cola, y no es necesario analizar subjetivamente a priori que tipo de familia implementar (Coles, 2001). Entonces, la forma de la GEV puede ser de tres tipos, dependiendo del valor que adopte el parámetro de forma γ : *i)* $\gamma = 0$ distribución de cola liviana (Gumbel); *ii)* $\gamma > 0$ distribución de cola pesada (Fréchet); *iii)* $\gamma < 0$ distribución limitada (Weibull)

La forma de trabajar las series de datos con las distribuciones GEV es a través del agrupamiento en bloques de igual longitud, ajustando los máximos de cada bloque. Para esta técnica (*BM, Block Maxima Approach*), la elección del tamaño de bloque puede ser crítica dado que los bloques pequeños pueden conducir a incertezas, y los bloques que son demasiado grandes generan muy pocos máximos, conduciendo a malas estimaciones de la varianza (Coles, 2001).

Para el caso de estudio, el máximo de cada bloque equivale al valor máximo mensual de nivel y duración de la serie en estudio. La elección del período mensual en lugar de anual se justifica por la relativamente alta frecuencia anual de los eventos extremos (asociados a Sudestadas) y su relativamente corta duración (del orden del día), que hace que puedan considerarse independientes unos de otros (Lecertua, 2010).

Para identificar eventos extremos es necesario definir un umbral mínimo a partir del cual se considera que se está en una situación de inundación. Se tomó como umbral mínimo el valor 1.60 m MOP, un umbral que es superado al menos 1 vez por mes dentro de los 25 años de registro. A partir de ese valor, se definen distintos umbrales para el trazado de mapas de duración de inundación, pues la duración depende de la cota topográfica considerada. Se tomaron umbrales de 1.60 a 2.80m espaciados cada 0.40m. A medida que aumenta el valor de umbral la cantidad de eventos extremos disminuye, razón por la cual se debe adoptar un paso temporal mayor. El mismo se indica en la Tabla 2.

Se analizaron los valores máximos, tanto de niveles como de duración (Figura 5), de los eventos utilizando la familia de distribuciones GEV con el método de estimación de parámetros de máxima verosimilitud. Los resultados se indican en la Tabla 2, representando los parámetros de localización (μ), escala (σ) y forma (γ).

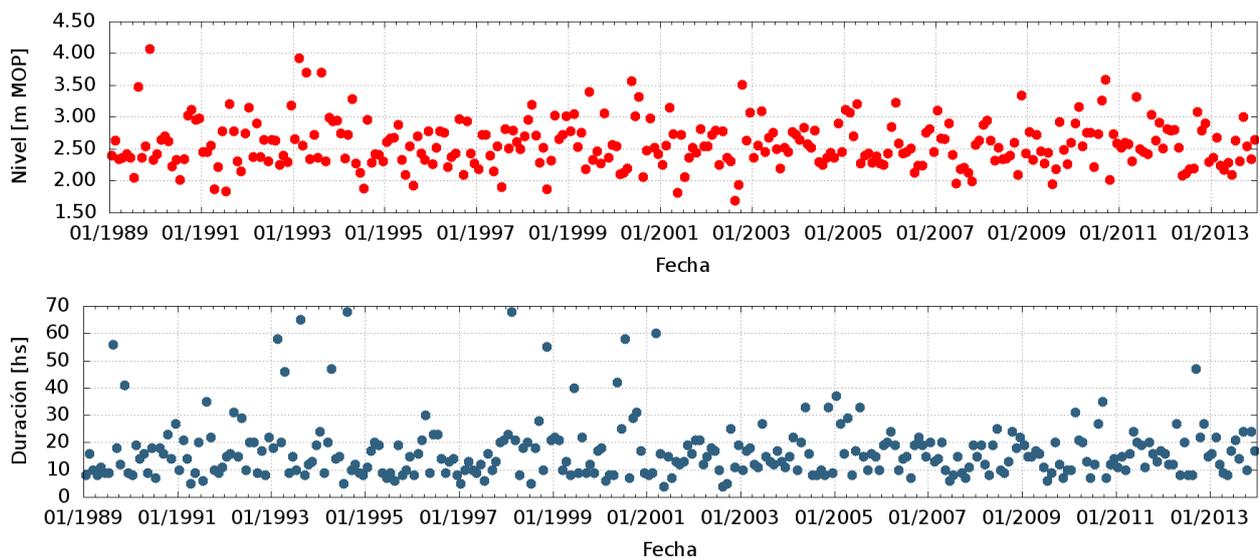


Figura 5.- Serie de máximos mensuales: a) nivel y b) duración.

Tabla 2.- Paso temporal (tamaño del bloque) y parámetros de las series para distintos umbrales.

Umbral [m MOP]	Paso [meses]	Pico			Duración		
		μ	σ	γ	μ	σ	γ
1.60	1.00	2.42	0.32	-0.093	11.85	5.54	0.251
2.00	1.04	2.44	0.27	0.022	6.86	3.44	0.229
2.40	1.53	2.61	0.19	0.224	4.21	2.67	0.228
2.80	4.69	2.98	0.15	0.269	3.83	2.44	0.247

Con las distribuciones ajustadas, se evaluaron distintos niveles y duraciones para tiempos de recurrencia de 4, 6, 12 y 24 meses en cada umbral, entendiendo tiempo de recurrencia como el intervalo medio entre ocurrencias sucesivas de eventos que superan un dado valor. La Tabla 3.1 representa niveles de inundación, es decir, el valor pico de la crecida. En la Tabla 3.2 se representan las duraciones.

Tabla 3.1.- Niveles (m MOP) para distintos períodos de retorno

Umbral [m MOP]	Recurrencia			
	4 meses	6 meses	12 meses	24 meses
1.60	2.79	2.92	3.12	3.30
2.00	2.78	2.91	3.11	3.32
2.40	2.88	3.00	3.23	3.48
2.80	3.21	3.31	3.51	3.72

Tabla 3.2.- Duraciones (hs) para distintos períodos de retorno

Umbral [m MOP]	Recurrencia			
	4 meses	6 meses	12 meses	24 meses
1.60	20	24	31	39
2.00	12	14	18	23
2.40	8	10	13	17
2.80	7	9	12	15

MAPAS DE INUNDACIÓN

Mapas de frecuencias de inundaciones

Los mapas de frecuencia de inundaciones se elaboran en función de la frecuencia de ocurrencia de niveles a partir del tiempo de superación por año. Las áreas inundadas quedan definidas a partir del mayor umbral de inundación, que está en correspondencia con el mínimo tiempo de inundación.

El tiempo de inundación se calcula a partir de la serie de niveles. Se define una serie de umbrales y a partir de ellos se cuenta la cantidad de días en los que el nivel estuvo por encima de cada umbral. Se considera que el umbral es superado en un día si al menos un registro de los valores horarios en el día supera dicho umbral. Luego, el mapa se construyó asignando esa cantidad de días (pasado a semanas) a cada umbral considerado, promediado por los 25 años de la muestra. El resultado se ilustra en la Figura 6.

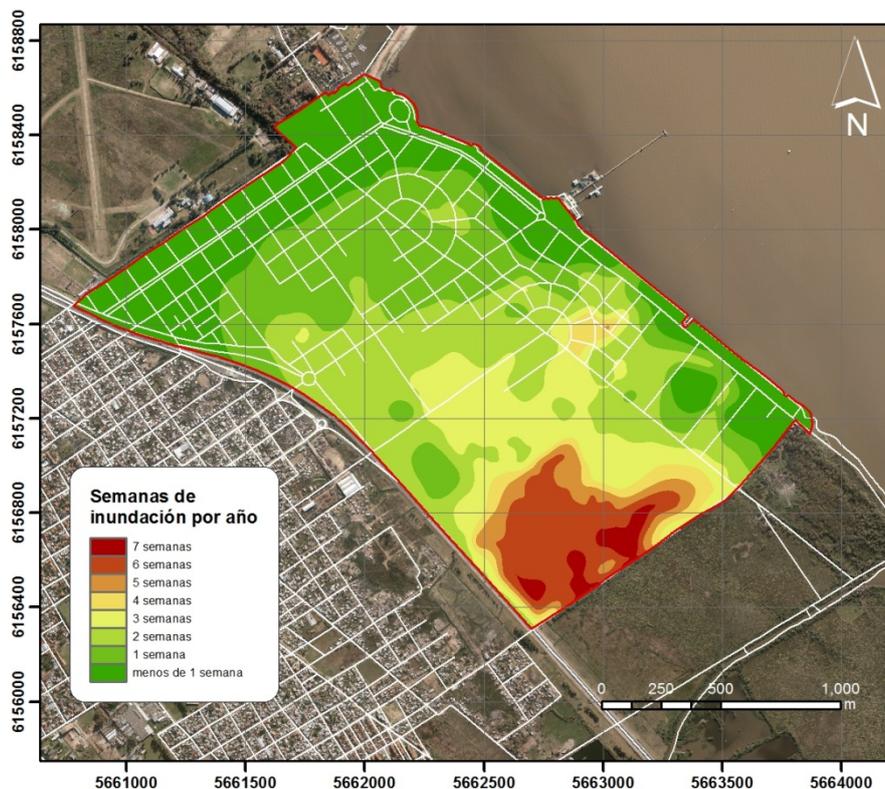
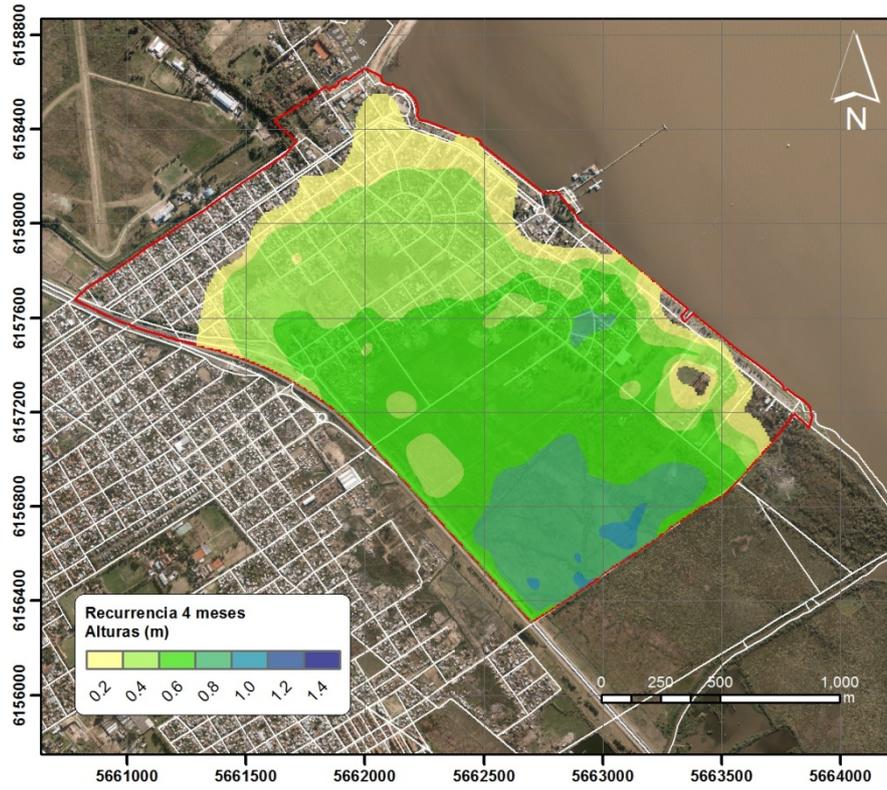


Figura 6.- Semanas de inundación por año.

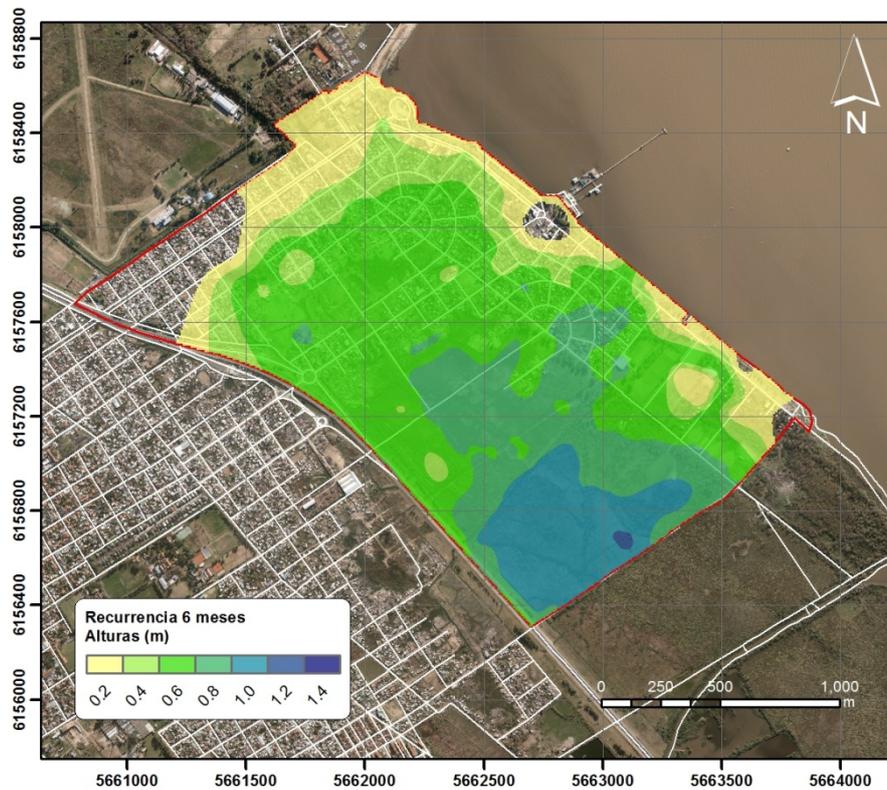
Mapas de Eventos Extremos

Posteriormente al cálculo de los valores de las Tablas 3.1 y 3.2, para cada recurrencia, se producen los mapas de altura y duración de inundación. Los mapas de altura de inundación se generan con una operación entre *Rasters*, restando el valor de la cota topográfica del MDT *Modificado* al valor del nivel asociado a cada recurrencia. Los mapas de altura de inundación se ilustran en la Figura 7. Para los mapas de duración de inundación se realizaron interpolaciones lineales con los datos de la Tabla 3.2 para obtener los valores de la cota topográfica correspondientes a duraciones discretas. Se adoptó una escala de duraciones de 3 a 24 horas

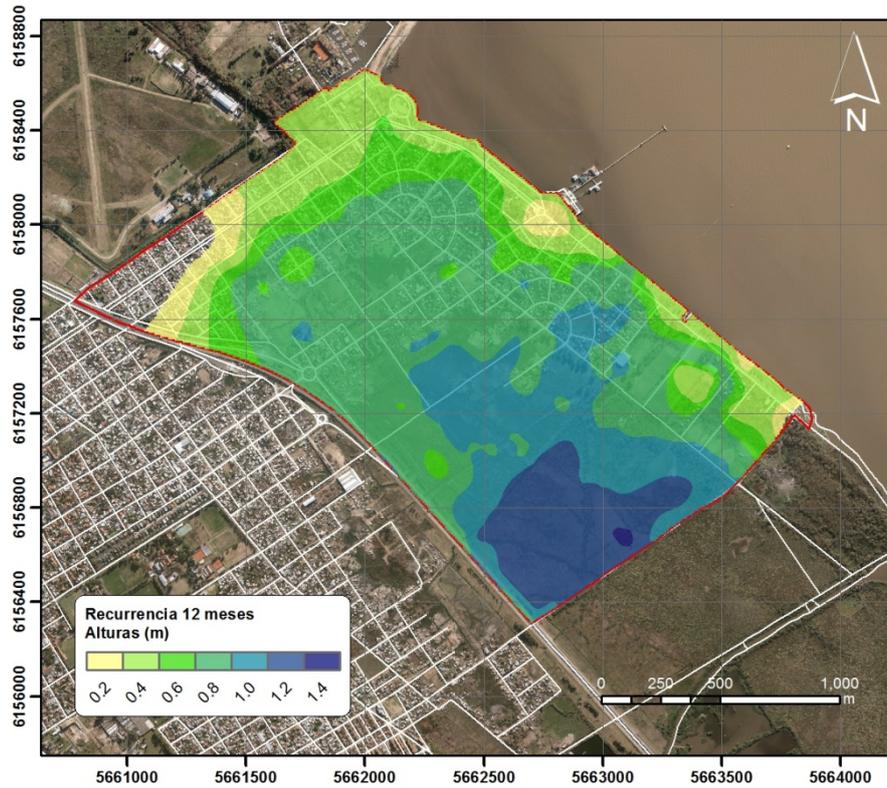
con un paso de 3 horas. Se debe tener en cuenta que se le asigna una duración cero a las zonas donde la cota supera el nivel máximo correspondiente a la recurrencia considerada. Estos mapas se ilustran en la Figura 8.



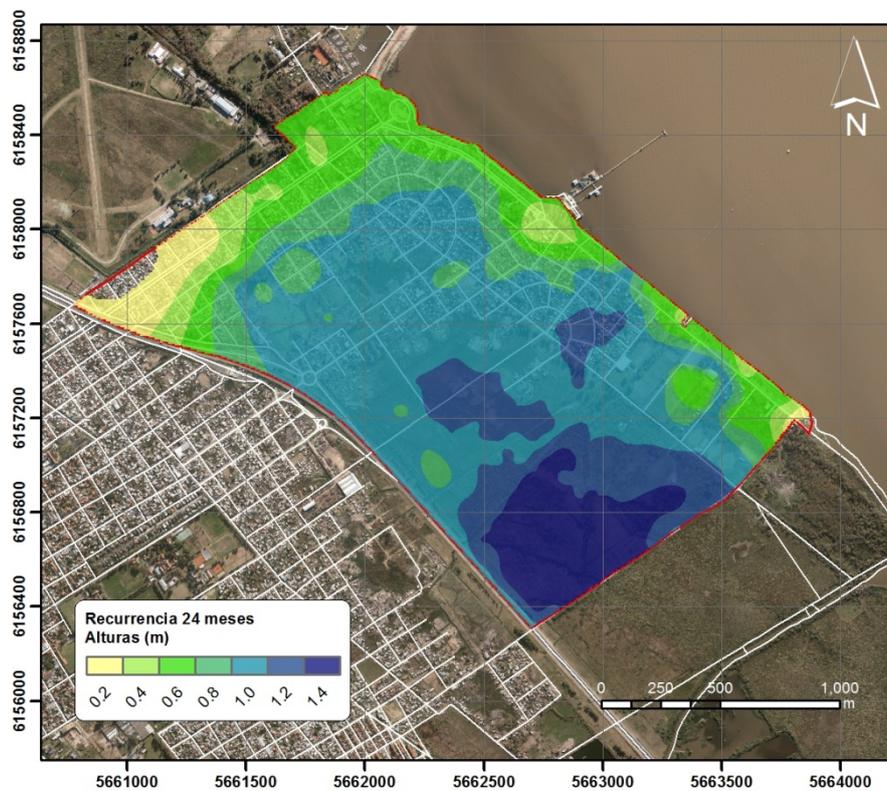
a) *Tiempo de Recurrencia: 4 Meses*



b) *Tiempo de Recurrencia: 6 Meses*

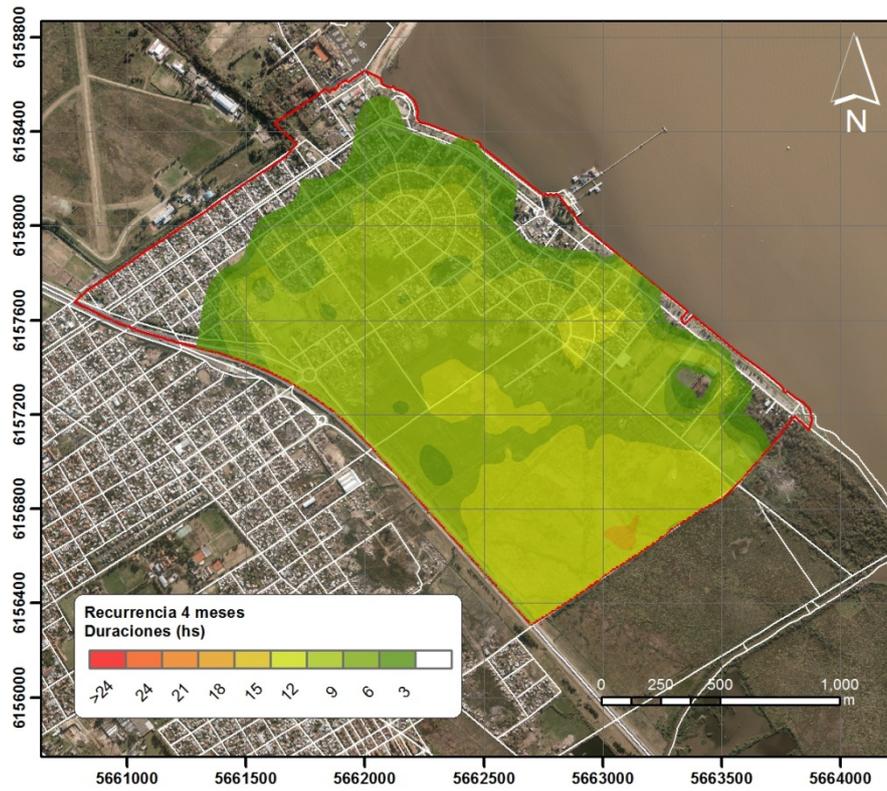


c) *Tiempo de Recurrencia: 12 Meses (1 Año)*

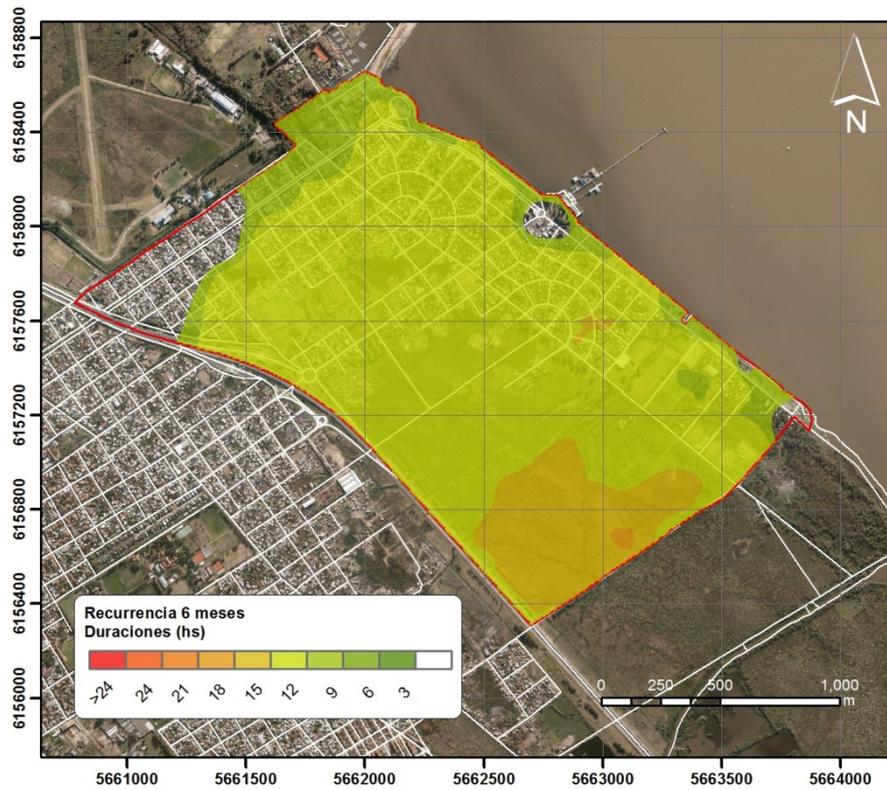


d) *Tiempo de Recurrencia: 24 Meses (2 Años)*

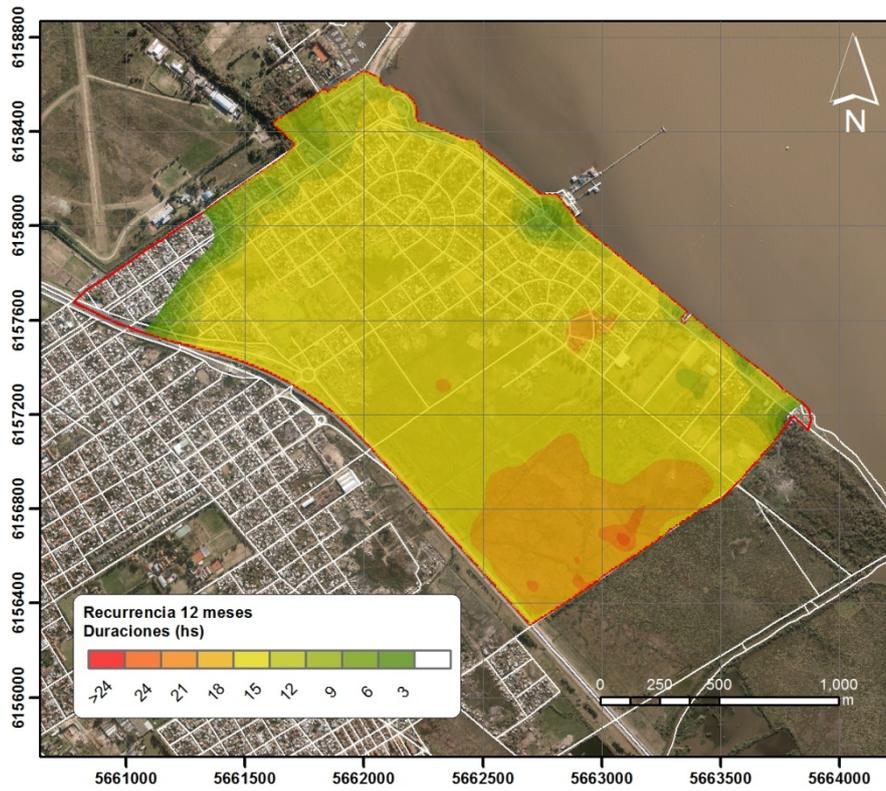
Figura 7.- Mapas de altura de inundación



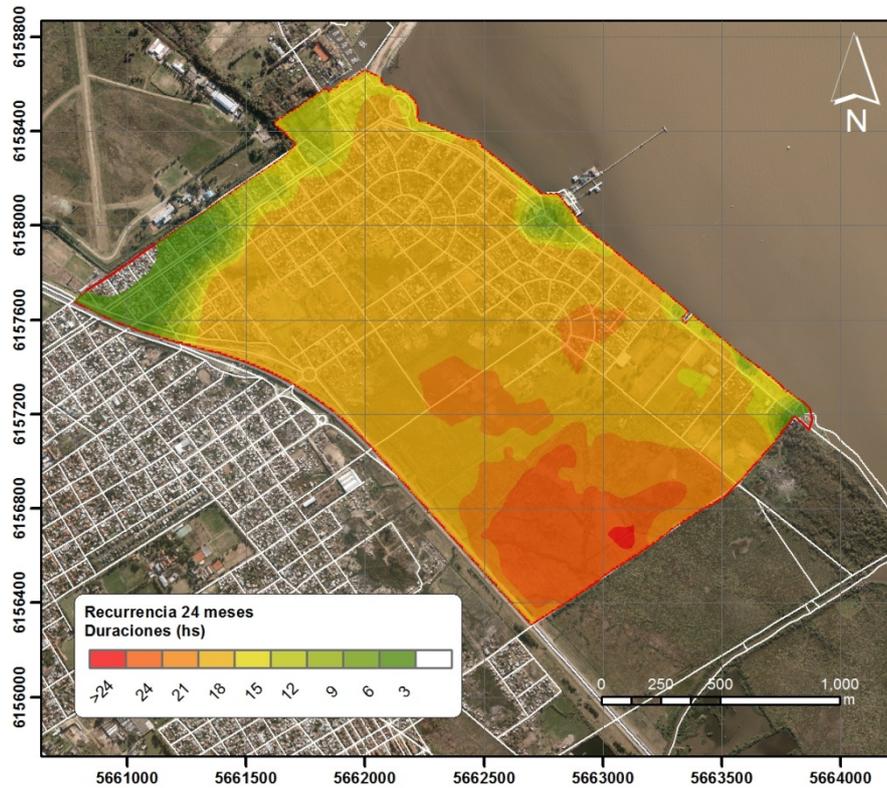
a) *Tiempo de Recurrencia: 4 Meses*



b) *Tiempo de Recurrencia: 6 Meses*



c) *Tiempo de Recurrencia: 12 Meses (1 Año)*



d) *Tiempo de Recurrencia: 24 Meses (2 Años)*

Figura 8.- Mapas de duración de inundación

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de un sistema de alerta a ser aplicado en La Ribera de Quilmes, es indispensable analizar las características de aquellos eventos que con mayor frecuencia implican un impacto sobre la costa. Un sistema de evacuación eficiente, además de estar preparado para los eventos más extremos (mayor recurrencia), también debe planificarse para este tipo de amenazas. Esto justifica el análisis de las recurrencias de 4 y 6 meses (intra-anales) y 1 y 2 años (inter-anales) presentado en este trabajo.

Los valores de altura de inundación calculados para las recurrencias intranuales (4 y 6 meses) se ubican en el rango 0.4-1.2 m MOP y las interanuales (1 y 2 años) en 0.8-1.4 m MOP. En cuanto a la variable duración de inundación, para las recurrencias intranuales se dan duraciones en el rango de 6-12hs, en cambio para las interanuales 12-24 hs.

Los productos obtenidos de este trabajo son los siguientes: se desarrolló una metodología GIS para mejorar modelos digitales del terreno basados en información proveniente de imágenes satelitales, se realizó la estadística de frecuencia de ocurrencia y de extremos de niveles y duraciones de inundación, y se generaron mapas de niveles y duración de inundación.

REFERENCIAS

- Coles, S., 2001. *An introduction to statistical modeling of extreme values*, London, Springer.
- Jacks, E., Davidson, J., Wai, H.G., Dupuy, Ch., Tutis, V. y Scharfenberg, K., 2010. *Directrices sobre sistemas de alerta temprana y aplicación de predicción inmediata y operaciones de aviso*, SMP-21 - WMO/TD No. 1559, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.
- Lecertua, E.A., 2010. *Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando el Cambio Climático*, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 7, pp. 1425-1432.
- Xu, H.Q., 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14, pp. 3025-3033.