

## 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras



Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras / Virginia Venturini ... [et.al.]. - 1a ed. - Santa Fe : Universidad Nacional del Litoral, 2014. E-Book.

ISBN 978-987-692-039-1

1. Hidrología. 2. Educación Superior. 3. Actas de Congresos. I. Venturini, Virginia CDD 551

Fecha de catalogación: 30/06/2014

## Respuesta hidrológica del Bañado de Maldonado en la planicie costera del Río de la Plata: eventos extremos de abril de 2013

Kruse Eduardo<sup>1</sup>, Braga Federica<sup>2</sup>, Tosi Luigi<sup>2</sup>, Carol Eleonora<sup>2</sup>, Laurencena Patricia<sup>3</sup>, Deluchi Marta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 La Plata, Argentina.

<sup>2</sup>- Institute of Marine Sciences, National Research Council, Arsenale Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia, Italy.

<sup>3</sup>- Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 La Plata, Argentina.

Mail de contacto: kruse@fcnym.unlp.edu.ar

### RESUMEN

El 2 de abril de 2013, inundaciones sin precedentes a causa de las lluvias extremas (cerca de 400 mm en pocas horas) ocurrieron en La Plata y sus alrededores, las cuales ocasionaron pérdidas de vidas humanas y un gran perjuicio socioeconómico. Las cuencas ubicadas al sudeste del ejido urbano, fueron significativamente afectadas. Esta zona con características semirurales, ha experimentado recientemente un fuerte proceso de urbanización. La falta de datos hidrológicos en la región representa una importante limitación en la gestión del agua. El objetivo de este trabajo es evaluar la respuesta hidrológica de la planicie costera frente a eventos de precipitaciones extremas. La interpretación de las imágenes satelitales seriadas del 5 de abril (ASTER), 9 de abril (SPOT5), 13 de abril (Landsat 7) y 21 de mayo de 2013 (SPOT5) asociadas a las características hidrológicas y topográficas, permitieron analizar la evolución de las zonas inundadas y conocer de forma indirecta la respuesta hidrológica de la llanura costera a los eventos extremos de precipitación.

**Palabras clave:** inundación, imágenes satelitales, balance hidrológico

### ABSTRACT

On April 2, 2013 unprecedented flash floods due to extreme rainfalls (approximately 400 mm in a few hours) occurred in La Plata and its surroundings causing loss of human live and great socioeconomic harm. The southeastern part of La Plata was an important flooded area. The lack of hydrological data at regional scale represents a significant constraint to the water management planning. This work aims to evaluate the hydrological response to the extreme precipitation events. Herein, we analyzed the satellite images acquired on April 5 (ASTER), April 9 (SPOT5), April 13 (Landsat7) and May 21, 2013 (SPOT5) and the topographical setting of the coastal plain. We suggest that the quantification of the evolution of the stored water in the low flooded areas of coastal plain is an indirect way to know the response of the coastal plain to the extreme precipitation events.

**Keywords:** flash floods, satellites images, hydrological balance

## 1 INTRODUCCIÓN

Las catastróficas inundaciones ocurridas en la ciudad de La Plata y alrededores en abril de 2013 ocasionaron pérdidas de vidas humanas y un gran perjuicio socioeconómico. La falta de una red hidrometeorológica adecuada a esas circunstancias plantean distintos interrogantes acerca del comportamiento hidrológico y cierta debilidad en la simulación de situaciones extremas dada la escasez de datos de caudales y precipitaciones que permitan la verificación de los modelos hidrológicos aplicados. Ello influye directamente en las posibles acciones a llevar adelante para mitigar la afectación frente a situaciones de inundaciones de cierta magnitud.

El escurrimiento superficial de la región ubicada al sudeste del ejido urbano se produce hacia un área de bañados naturales, situados en la planicie costera, que actúan como un medio regulador de la descarga hacia el Río de la Plata. Como consecuencia de ello existe una dificultosa vinculación hacia el río, que se produce fundamentalmente por algunos pequeños canales artificiales, cuya escasa magnitud dificulta su identificación a la escala de trabajo de este estudio. Esta situación se presenta con mayor claridad en aquellas cuencas que no muestran una modificación significativa de la planicie costera como consecuencia de las actividades antrópicas. Tal es el caso del tramo terminal que incluye a las cuencas del A° Maldonado, A° El Pescado y afluentes menores (Fig. 1), que presentan características suburbanas y actualmente muestra un importante proceso de urbanización.

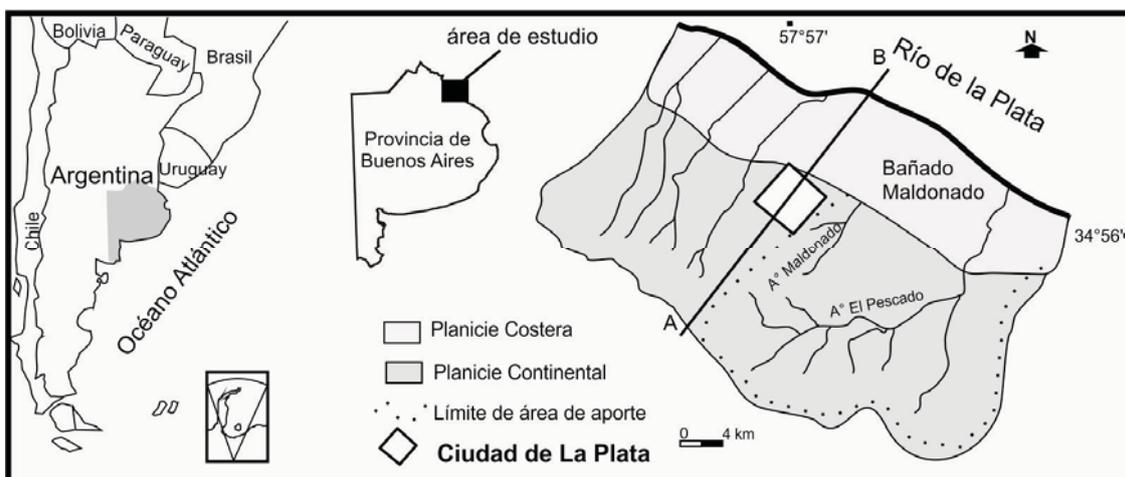


Figura 1 - Ubicación del área de estudio

El 1 y 2 de abril de 2013 se registraron lluvias extremas en el Noreste de la Provincia de Buenos Aires. En La Plata el fenómeno comenzó en la tarde del 2 de abril, alcanzando un valor acumulado de 392,2 mm según el dato proporcionado por la estación Observatorio (U.N. La Plata). En otros sitios se registraron altos valores, 273 mm en la estación Julio Hirschhorn (U.N. La Plata) y algunos registros particulares superaron los 300 mm. Estas lluvias intensas abarcaron a las cuencas del entorno de la ciudad, incluyendo al A° El Pescado, Maldonado y afluentes.

Según el informe del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (2013) el registro para el 2 de abril en el Observatorio, es el récord de su serie histórica (1909-2013), superando en más del 140 % el valor diario máximo anterior. El máximo histórico anterior corresponde a 240 mm registrados el 28 de febrero de 2008 en la estación pluviográfica que operaba el Laboratorio de Hidrología, en 520 y 28 (Edelap-UNLP). La magnitud de la lluvia caída en La Plata excedió significativamente los parámetros de diseño que habitualmente se emplean para el proyecto de redes de desagües pluviales, lo cual generó la inundación de las áreas más deprimidas asociadas a cauces fluviales que se encuentran enmascarados por el desarrollo urbano.

La falta de datos hidrológicos representa una importante restricción en el conocimiento de la relación hidrológica entre el área de escurrimiento en la planicie continental y el área de

almacenamiento superficial temporario de los bañados en la planicie costera. Ello resulta fundamental para la gestión del agua y para el desarrollo de medidas que disminuyan los efectos de situaciones hidrológicas extremas. El objetivo de este trabajo es evaluar la respuesta hidrológica de la planicie costera frente a eventos de precipitaciones extremas.

## 2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, situada hacia el este del ejido urbano de La Plata, incluye una planicie continental y una planicie costera. La primera se desarrolla en una llanura con interfluvios anchos y valles amplios. El área conserva características suburbanas, con actividad florihortícola en la cuenca alta, mientras que en los sectores medios está experimentando un progresivo proceso de urbanización. En la planicie costera se desarrolla un área cuya rasgo geomorfológico principal es el bañado Maldonado y que en general muestra una escasa influencia de las actividades humanas.

El clima es templado – húmedo, con una precipitación media de 1.079 mm/año, y una temperatura media anual de 15,7 °C, con una humedad relativa promedio del 77 % a lo largo del año. Las características climáticas indican la existencia de excesos de agua que permiten la infiltración, escurrimiento y también almacenamiento de agua en los sectores deprimidos. La velocidad media del viento anual es de 18.9 km/h, con una mayor frecuencia de las direcciones Este y Nor-Este. De acuerdo al balance hídrico, el clima de la región es B2C'2“r”a’ (en el sistema de Thornthwaite), correspondiente a un clima húmedo (B2), microtermal (C'2), lo que indica que posee valores de evapotranspiración mayores a 570 mm, con nula o pequeño deficiencia de agua (“r”) y porcentaje de la concentración estival de la eficiencia termal inferior a 33.9 % (a’).

La serie anual de las precipitaciones (1909 – 2011) indica la alternancia de ciclos húmedos y secos, con una máxima anual ocurrida en 1914 con 1926 mm y una mínima de 416,5 mm en 1916. En este período de registros las precipitaciones anuales presentan una leve tendencia al aumento (entre 960 y 1050 mm) que está en el orden del 10%.

En el área se pueden diferenciar dos sectores morfológicos distintos: Planicie Continental, donde las cuencas están bien definidas y Planicie Costera, donde se desarrollan los bañados (Fig. 1). La Planicie Costera se dispone en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata con un ancho variable entre 5 y 8 km. Las alturas no exceden los 5 m.s.n.m, predominando valores de cotas por debajo de los 3 msnm, con pendientes topográficas próximas a 0,5 m/km. Esta condición limita notoriamente el flujo superficial, dificultando la llegada natural de las aguas provenientes de la Llanura Continental hasta el nivel de base regional, constituido por el Río de la Plata. Es un ámbito de descarga parcial del sistema subterráneo, con presencia de suelos mal drenados, donde se emplazan áreas deprimidas (Bañado Maldonado). Este sector está en parte canalizado para posibilitar el desagüe al Río de la Plata. La presencia de cordones o albardones costeros de arena o conchilla, generalmente ubicados por encima de la cota 2,5 m.s.n.m, dispuestos paralelamente a la línea de ribera, constituyen a su vez barreras al escurrimiento superficial.

En la Planicie Continental se incluyen las cuencas del A°. Maldonado, A° El Pescado y otros afluentes menores con cotas que varían entre los 5 y los 30 msnm. Los suelos de esta zona son de buena calidad y bien drenados.

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de evaluar la respuesta hidrológica de la planicie costera se utilizaron imágenes satelitales obtenidas por los sensores Landsat ETM+, ASTER y SPOT-5 para el período comprendido entre el 5 de abril y el 21 de mayo de 2013. Dichas imágenes permitieron identificar y definir la extensión de las áreas anegadas y verificar el tiempo de residencia medio del agua.

Únicamente la imagen ASTER del 5 de abril de 2013 se seleccionó para efectuar la estimación en detalle del volumen de agua por haber sido obtenida más próxima al evento y por presentar una resolución espacial adecuada para dicho análisis (15 m). Las imágenes Landsat ETM+ y SPOT se utilizaron para visualizar cualitativamente la evolución espacial y temporal del evento.

Se efectuó la corrección geométrica de las imágenes y se determinaron las áreas inundadas a partir del producto ASTER L-1BE. La imagen Landsat ETM+ (Nasa, 2011) del 5 abril de 2013 presenta vacíos de información causados por fallas del sistema por lo que fue usada sólo para análisis cualitativos.

Para mejorar el contraste de los valores de pixel de agua y no agua (superficie vegetada) se empleó el índice de diferencia normalizada del agua (NDWI), considerando el verde (Green) y el NIR (infrarrojo cercano) (Rouse et al, 1973, McFeeters, 1996)

El índice tiene un valor positivo en el área con agua, mientras que el suelo desnudo y la vegetación tienen generalmente un valor negativo (McFeeters, 1996). Dada la similitud de respuesta del comportamiento del área urbana y el agua, se emplea la banda roja donde el área urbana se caracteriza por un valor medio mucho más alto respecto al agua. En la imagen ASTER del 5 de abril de 2013 se aplica el índice NDWI y las áreas con NDWI positivo y alta respuesta en el rojo son eliminadas. Finalmente se observó que los valores de NDWI del agua son más altos respecto al suelo húmedo, por lo que se ha definido un umbral capaz de distinguir las áreas anegadas de las áreas con humedad.

El área anegada obtenida mediante imágenes satelitales a través de esta metodología fue vectorizada con los datos del DEM para el cálculo del volumen de agua. Para el armado de este DEM (Fig. 2) se utilizaron ménsulas con cotas obtenidas de la Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires, trayectos cinemáticos obtenidos con GPS con cota obtenida mediante el modelo tdaGEOBA (transformación de alturas elipsoidales en alturas en m.s.n.m. en la Provincia de Buenos Aires) sobre caminos a nivel del terreno natural, puntos sobre la playa obtenidos mediante la técnica GPS "Stop and Go", cotas obtenidas del SRTM filtrado, en un grillado de la superficie de la Tierra en celdas de 90 m x 90 m, en las zonas despejadas y despobladas en donde no existían datos. Para realizar el modelo final los puntos, acotados en m.s.n.m., fueron procesados por el "Golden Software Surfer 7". Con este programa se confeccionó una grilla equiespaciada mediante el método de interpolación Kriging puntual, utilizando un modelo de semivariograma lineal (Kruse et al, 2014). Para la estimación del volumen total se computaron los volúmenes parciales, considerando las superficies comprendidas entre cotas equidistantes cada 0,50 m hasta alcanzar el máximo nivel de anegamiento obtenido de las imágenes satelitales

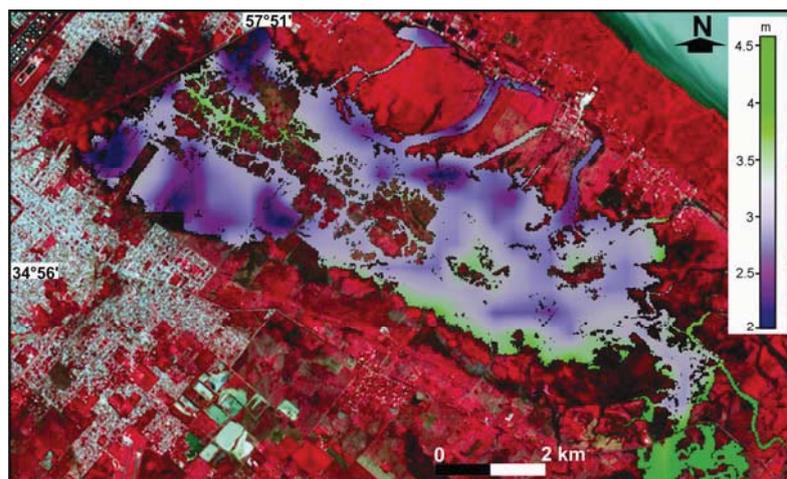
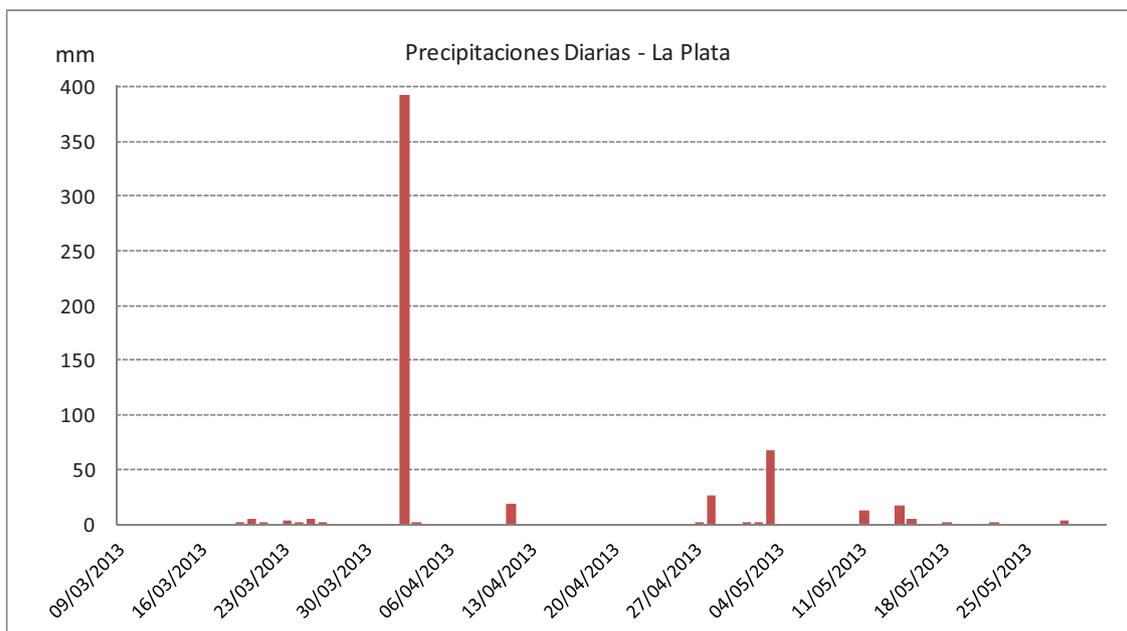


Figura 2 - Modelo digital del terreno (DEM) del bañado

## 4 RESULTADOS

En el mes de marzo de 2013 las precipitaciones presentaron valores inferiores a los medios, y prácticamente las lluvias ocurridas a partir del día 9 fueron insignificantes (Fig.3). A fines de este mes el bañado Maldonado carecía de agua, lo cual se puede verificar con imágenes satelitales

previas al evento.



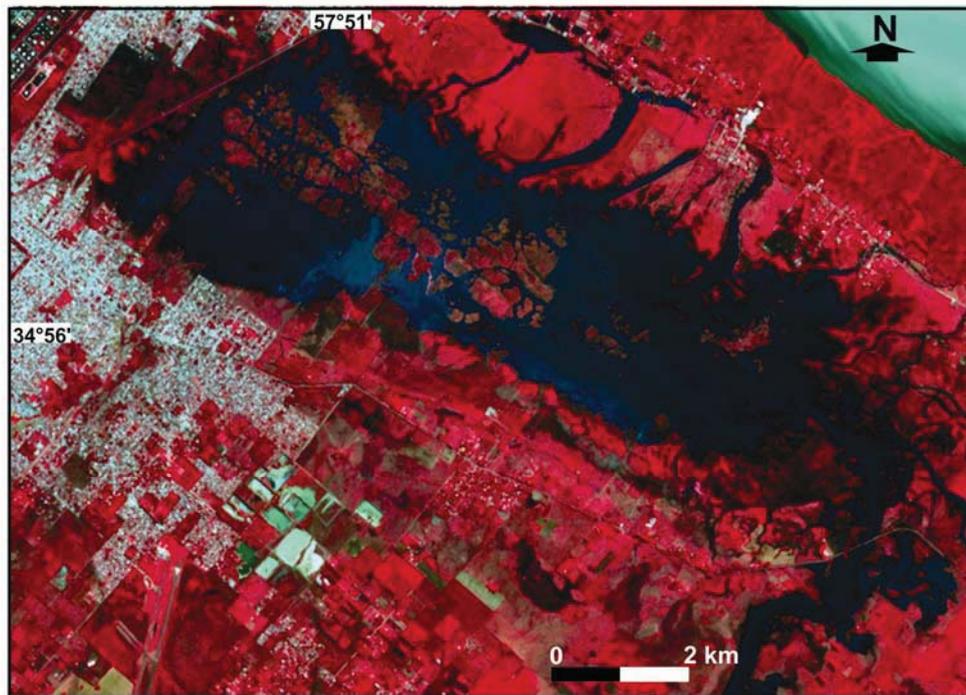
**Figura 3** - Precipitaciones diarias ocurridas entre marzo y mayo de 2013 en la estación Observatorio (U.N.L.P.)

En la imagen ASTER falso color de la Fig. 4 es posible identificar el área anegada y no anegada el 5 de abril de 2013. El color azul muy oscuro corresponde a la superficie ocupada por el agua. El área anegada comprende la casi totalidad del bañado Maldonado. Existen canalizaciones para facilitar el drenaje al Río de la Plata, que debido a sus dimensiones y la resolución de la imagen, no son fácilmente reconocidas. Hacia el sector SE se identifica el arroyo El Pescado, con un ancho considerable, dado que el agua está ocupando la planicie de inundación. Dentro del área urbana, al SO, se extiende el arroyo Maldonado, de menores dimensiones con respecto al anterior apareciendo en la imagen con poco contraste.

A partir del análisis de la imagen del 5 de abril (Fig. 4) y el DEM del área de estudio, se calculó que el volumen de agua almacenado en el bañado fue de  $14,4 \text{ hm}^3$ . Los máximos espesores de agua en el bañado son del orden de 3,5 m.

El escurrimiento superficial desde el área de aporte representada por la cuenca del A° El Pescado, Maldonado y afluentes menores (Fig.1) en la planicie continental fue relativamente rápido, ya que en la imagen analizada sólo sectores restringidos a la planicie de inundación de los arroyos continuaban anegados como consecuencia de las precipitaciones extremas del 2 de abril.

En el balance hidrológico del período de análisis que es prácticamente 48 hs, (tiempo transcurrido entre el evento de lluvia y la evaluación de la imagen), es posible plantear que el almacenamiento de agua en el bañado se relaciona esencialmente con la precipitación en el sitio y el aporte del escurrimiento superficial y subterráneo desde la planicie continental. Las demás variables presentan magnitudes prácticamente despreciables. La evapotranspiración sería muy baja, no sólo por el tiempo transcurrido sino también por el estado de saturación de la atmósfera en ese momento. La infiltración es rechazada debido a que los niveles freáticos se encuentran en superficie. La descarga superficial hacia el Río de la Plata es de una magnitud menor como consecuencia de la exigua red de drenaje natural y artificial existente.



**Figura 4** - Imagen ASTER en falso color del 5 de abril de 2013

La precipitación ocurrida de 392 mm, corresponde a un volumen en el área del bañado de 1,6 hm<sup>3</sup>. La diferencia con el volumen calculado luego de la tormenta es de 12,8 hm<sup>3</sup>, correspondiendo este valor al aporte recibido por escurrimiento superficial y subterráneo desde la planicie continental.

La interpretación visual de la secuencia de imágenes posteriores al 5 de abril muestra cualitativamente como se produce el agotamiento de los volúmenes almacenados en el bañado. En la imagen del 13 de abril (Fig. 5) sólo se aprecian sectores restringidos con presencia de agua (canales y sectores preferenciales de escurrimiento superficial) y suelos con un alto contenido de humedad. El agua en superficie ha disminuido notoriamente, concentrándose hacia el oeste del bañado, lo cual es identificable por tonos negros. El área anteriormente inundada aparece en esta imagen ocupada por vegetación natural observable en tonalidades rojizas. Se reconocen algunos canales que estaban cubiertos completamente por agua y los que eran identificables en el área del bañado reducen su ancho, al igual que el arroyo El Pescado donde el agua queda circunscripta al cauce.

Las imágenes del 6 de mayo (Fig. 6) y del 21 de mayo (Fig. 7) indican prácticamente la inexistencia de agua en superficie. La imagen SPOT5 del 21 de mayo (Fig. 7) sólo muestra presencia de humedad, definida en tonos grises. Aparece mayor proporción de superficies con tonalidades rojizas (vegetación), algunas delimitadas por formas geométricas (parcelamiento) y se ponen en evidencia caminos que en la imagen del 3 de abril (Fig. 4) están bajo agua.

Las precipitaciones ocurridas durante mayo fueron algo superiores a las medias para ese período. Los mayores registros se produjeron entre el 6 y el 21 de mayo (Fig. 3), y aunque son precipitaciones aisladas que se encuentran dentro de los rangos propios de la zona, no tuvieron una manifestación en el incremento de las áreas anegadas en el bañado.

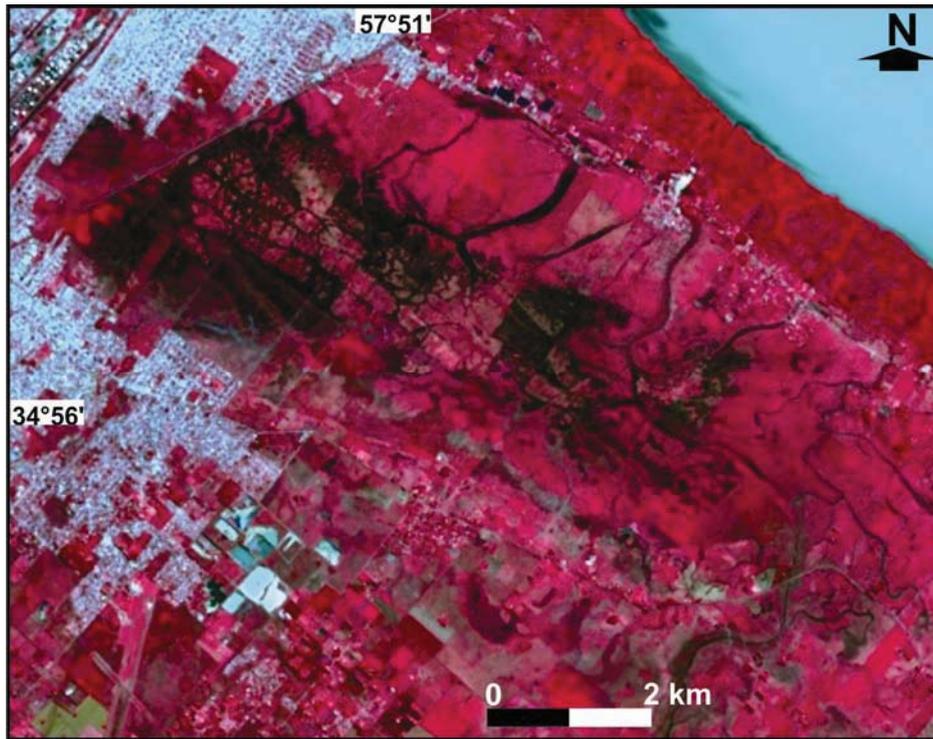


Figura 5 - Imagen Landsat 8 en color natural del 13 de abril de 2013

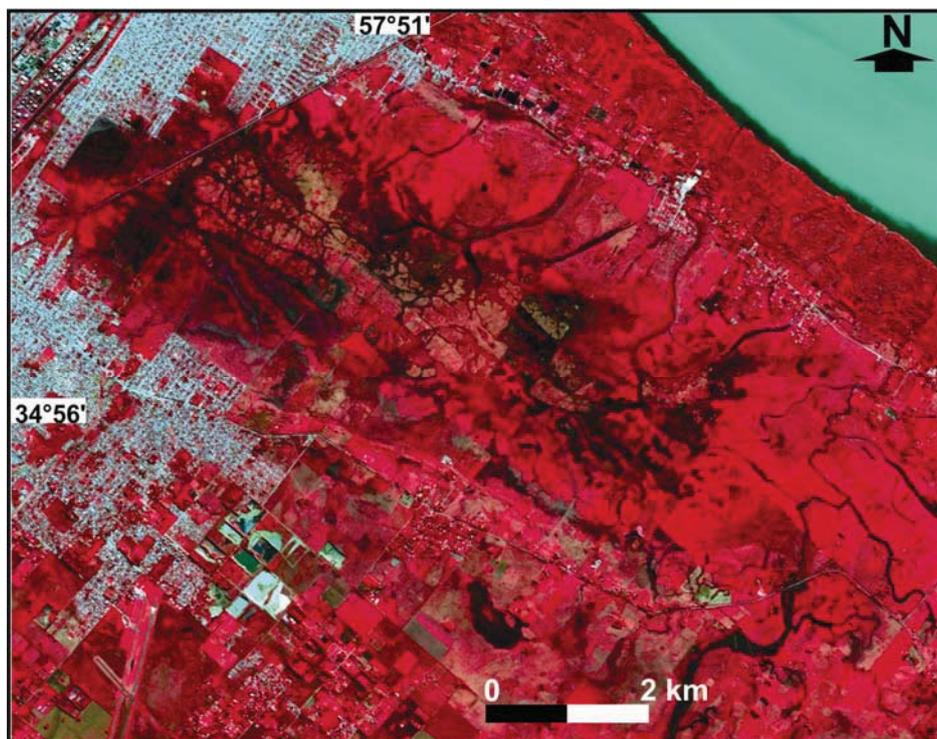
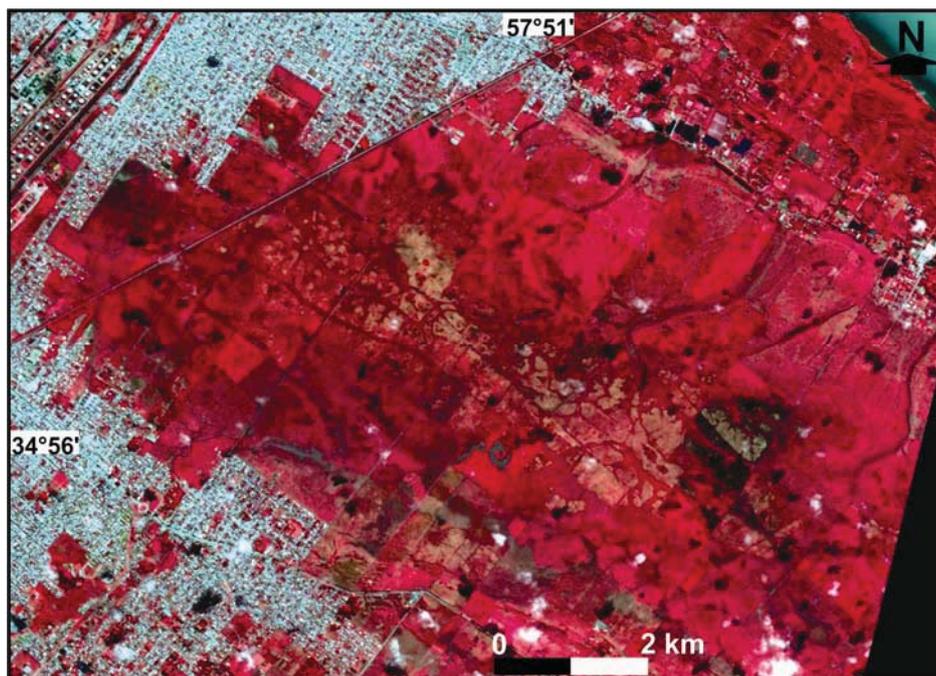


Figura 6 - Imagen SPOT5 en falso color del 6 de mayo de 2013



**Figura 7** - Imagen SPOT5 en falso color del 21 de mayo de 2013

Se puede observar mediante el análisis visual de las imágenes secuenciales que el agotamiento del sistema luego de una inundación extrema se produce principalmente por los efectos de la evapotranspiración y por la infiltración profunda de carácter constante. La descarga a través de los canales artificiales es de escasa magnitud y sólo tiene influencia en el momento de máximo anegamiento que vincula el bañado con el Río de la Plata.

## 5 CONCLUSIONES

La interpretación de imágenes satelitales seriadas constituye una herramienta de utilidad para efectuar una evaluación cualitativa del comportamiento hidrológico frente a eventos extremos, como el ocurrido en una región de llanura (sudeste de la ciudad de La Plata) en abril de 2013.

La condición prácticamente natural de la planicie costera hace que los bañados constituyan áreas de almacenamiento temporario de los volúmenes escurridos desde la planicie continental en un evento de precipitaciones extremas (392 mm/año en 8 horas). Las componentes influyentes en el balance hidrológico a corto plazo (48 horas) lo constituyen la precipitación en el sitio y el escurrimiento desde la planicie continental. El agotamiento del agua almacenada en los bañados se produce progresivamente como consecuencia de la evapotranspiración y la infiltración profunda.

La destrucción de los bañados a partir de actividades humanas (procesos de urbanización e industrialización) modifica sustancialmente su comportamiento natural y puede generar efectos no deseados en el desarrollo de la región con consecuencias negativas para la población, especialmente en su función como reguladores de eventos extremos

Si bien las imágenes satelitales posibilitan una evaluación preliminar del comportamiento hidrológico en sucesos de tal magnitud resulta imprescindible la instalación y operación de una red hidrométrica e hidrometeorológica que posibilita una cuantificación detallada de este tipo de fenómenos, lo cual resulta básico para la planificación y ordenamiento de esta región.

## REFERENCIAS

Kruse, E., Sarandón, R. y F. Gaspari. 2014. Impacto del cambio climático en el Gran La Plata. PIIT AP Universidad Nacional de La Plata: Kruse, Sarandón y Gaspari compiladores. Editorial Universidad Nacional de La Plata (en prensa)

Liscia, S. 2013. Estudio sobre la inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril en las ciudades de La Plata, Berisso y Ensenada. Informe Técnico Departamento de Hidráulica. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. (en [www.sedici.unlp.edu.ar](http://www.sedici.unlp.edu.ar): abril-2014)

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*, 17:7, 1425-1432.

NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). ASTER L1B. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. 2001.

Rouse, J.W., R.H.Haas, J.A.Schell, and D.W.Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.