



## Predicción de ocurrencia de escorrentía a partir de datos GRACE, hidrométricos y pluviométricos en el curso inferior del Río Paraná

Arecco, M. A.<sup>(1)</sup>; Oreiro, F.<sup>(2)</sup>; Clavijo, J.J.<sup>(3)</sup>; Pradelli, A.<sup>(4)</sup>

(1) Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ing. Geodesta-Geofísico, Av. Las Heras, 011-4514-3014, ma\_arecco@yahoo.com.ar.

(2) Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ing. Geodesta-Geofísico, Av. Las Heras 2214, 011-4514-3014, mail fernandooreiro@yahoo.com.ar.  
Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, Av. Montes de Oca 2124, 011-4301-0061 int. 4047.

(3) Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ing. Agrimensor, Av. Las Heras 2214, 011-4514-3014, mail jjclavijo@gmail.com.

Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

(4) Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Agrimensor, Av. Las Heras 2214, 011-4514-3015, apradelli@gmail.com.

### RESUMEN

El análisis del almacenamiento del agua superficial, el agua subterránea y la humedad del suelo resulta fundamental si se pretende determinar la predisposición a inundaciones de una determinada región. En este trabajo se presenta un análisis multitemporal (2002-2015) de la cuenca del río Paraná a partir de datos gravimétricos de la misión GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), de precipitación del programa TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), hidrométricos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos e imágenes satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). El objetivo es establecer una metodología que permita estudiar el comportamiento de la cuenca en distintas situaciones de saturación del suelo y definir el comportamiento del escurrimiento de la misma en función de la capacidad de acumulación de agua que se evalúa a través del espesor equivalente de agua que proporciona la misión GRACE. El análisis general de los datos utilizados incluyendo su distribución geográfica muestra la existencia de casos característicos que permiten describir el comportamiento del escurrimiento del agua a través de las variables estudiadas (gravedad, precipitación y alturas hidrométricas).

**PALABRAS CLAVE:** Cuenca río Paraná; Precipitación; GRACE; Espesor Equivalente de Agua; Altura Hidrométrica.

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La cuenca del río Paraná es una de las cuencas más extensas de Sudamérica, sólo superada por la del río Amazonas y forma gran parte de la extensa cuenca del Río de la Plata (Fig. 1). El río Paraná es el sexto río de llanura más importante del mundo y moviliza un caudal de aproximadamente 16.000 m<sup>3</sup> por segundo.

El análisis del escurrimiento y almacenamiento del agua superficial y el agua subterránea resulta fundamental si se pretende determinar la predisposición a inundaciones de una determinada región. En particular el curso inferior del río Paraná,





## DATOS Y METODOLOGÍA

Para evaluar la respuesta de la cuenca en distintas situaciones de saturación del suelo se realizó un análisis multi-temporal en el periodo del 2002 al 2015, a partir de datos gravimétricos de la misión GRACE (<http://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land/>), del programa de precipitación TRMM <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged> imágenes satelitales MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod02.php>) y datos hidrométricos de alturas de ríos de la Argentina de la Subsecretaría de Recursos Hídricos ([http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso\\_bd.php](http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php)).

Se procesaron las grillas de EEA y de precipitaciones calculando los promedios mensuales. Esto cálculos se realizaron en toda el área de la cuenca, sin embargo, sólo se procesaron las escalas hidrométricas del río Paraná y sus ríos afluentes dentro del territorio de la República Argentina. Por otra parte, para una mejor evaluación de la respuesta de dichos ríos a las precipitaciones, las escalas hidrométricas se evaluaron en tres áreas, alta, media y baja (Tabla 1).

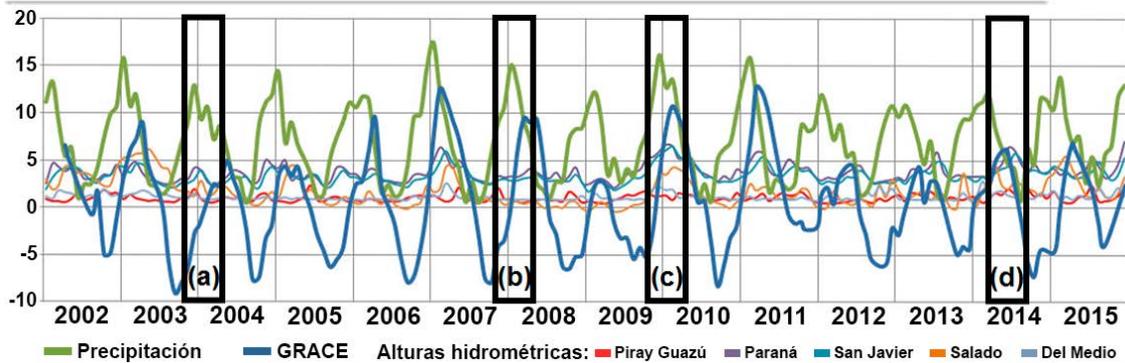
**Tabla 1.-** Coordenadas geográficas de las estaciones hidrográficas más relevantes con escalas hidrométricas. Están ordenadas según el área.

Estación	latitud	longitud
Iguazú	-25°40'36"	-54°25'17"
Itati	-27°15'58"	-58°14'39"
Corrientes	-27°28'30"	-58°49'60"
Paso Quebracho	-30°59'29"	-59°39'41"
Helvecia	-31°06'15"	-60°05'00"
Pueblo Andino	-32°40'24"	-60°51'57"
Cnel. Bogado	-33°21'38"	-60°34'33"
Pto. Gaboto	-32°25'47"	-60°48'49"
La Emilia	-33°23'58"	-60°20'02"
Ruta Prov. N°18	-33°01'45"	-60°40'55"

La combinación de la evolución de la altura observada en las escalas hidrométricas, el EEA y las precipitaciones en el período considerado permitió escoger cuatro casos característicos en los que se registraron (ver recuadros en la Fig. 2):

- Valores de precipitaciones menores y no se manifestó escorrentía.
- Abundantes precipitaciones y no se manifestó gran escorrentía.
- Abundantes precipitaciones y se manifestó gran escorrentía.
- Valores de precipitaciones menores y se manifestó gran escorrentía.

Los lapsos de tiempo de los cuatro casos extremos adoptados para el análisis cualitativo se muestran en la tabla 2.



**Figura 2.-** Evolución del promedio mensual de la altura observada en las escalas hidrométricas, del EEA y de las precipitaciones en el lapso ene-2002 a ene-2016. Las alturas de las escalas hidrométricas se encuentran en una escala diferente para una mejor visualización. Los recuadros negros indican los casos característicos elegidos para el análisis del trabajo.

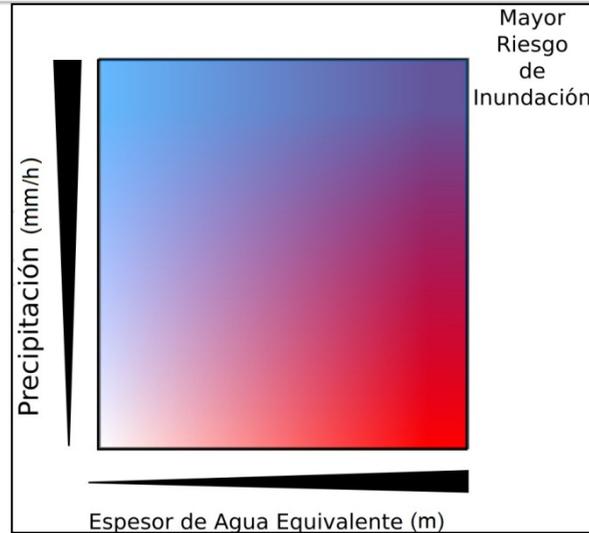
**Tabla 2.-** Lapsos extremos considerados.

Inicio	final
oct-dic 2003	ene-mar 2004
oct-dic 2007	ene-mar 2008
oct-dic 2009	ene-mar 2010
marzo 2014	junio 2014

La metodología para el análisis multi-temporal consistió en la superposición de las grillas del EEA de GRACE y las grillas del programa de precipitaciones TRMM correspondientes a los lapsos seleccionados. La grilla de EEA se representó en tonos que van del blanco al rojo, correspondiendo el color rojo a los espesores equivalente de agua positivos (mayor humedad del suelo) y el blanco a los espesores negativos (menor humedad del suelo). Mientras que la grilla de precipitaciones se representó en tonos que van del blanco al azul, correspondiendo el azul oscuro a las mayores precipitaciones y el blanco a precipitaciones escasas o nulas.

La Figura 3 muestra la paleta de la combinación de los colores rojo y azul que representan todas las posibilidades desde los casos en los que el riesgo de inundación es menor (blanco) a los casos en que el riesgo de inundación es mayor (púrpura). La combinación de la paleta de colores permite además de identificar los casos extremos, identificar en forma simultánea la combinación de los casos analizados de las precipitaciones y los EEA. En el caso en que una variable sea mayor que la otra, se destaca el color correspondiente a esa variable. Por ejemplo en regiones en donde EEA es bajo y la precipitación es importante, se destacará el color azul, mientras que si el EEA es alto y la precipitación es baja, se destacara el color rojo.

El análisis es cualitativo ya que las grillas representan valores entre máximos y mínimos en medidas de longitud pero fuera de escala. Los valores negativos del EEA implican un déficit de agua respecto de una media.



**Figura 3.-** Paleta de colores que indica del menor riesgo de inundación (blanco) al mayor riesgo de inundación (púrpura). Los ejes de la paleta están fuera de escala, la representación es cualitativa.

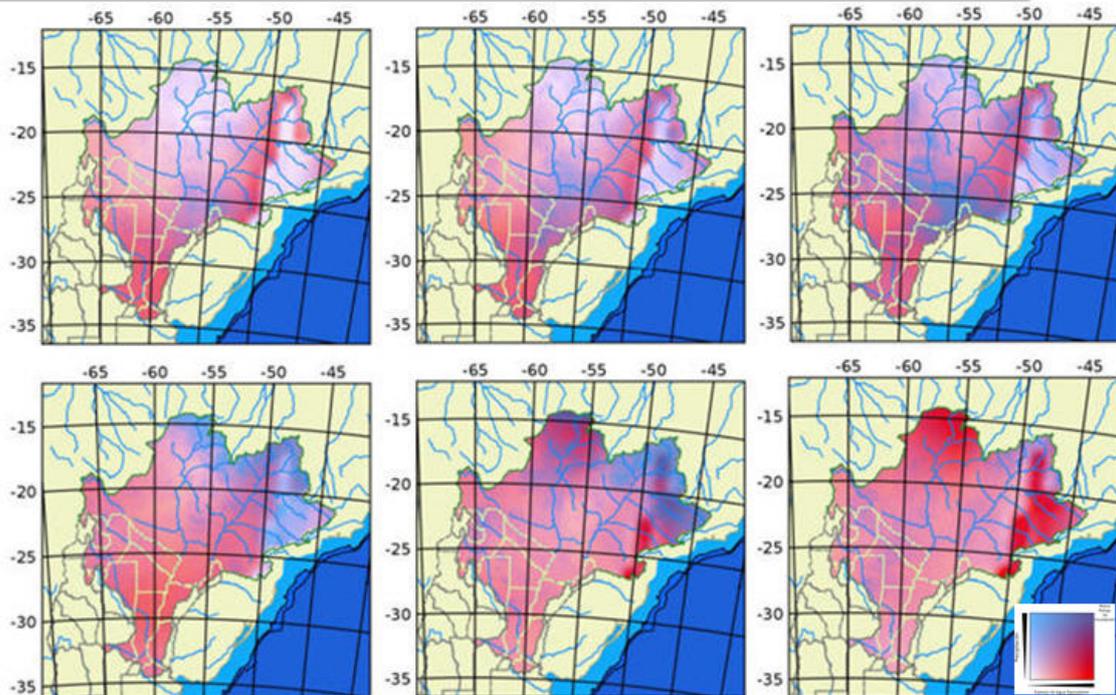
Las imágenes MODIS se obtuvieron en las bandas 6 al rojo, 5 al verde y 1 al azul, en falso color con el propósito de resaltar la carga de agua en superficie, procesadas con el programa GDAL.

## RESULTADOS

Los resultados se muestran en tres series de seis mapas correspondientes a los años 2003-2004, de octubre a marzo (Fig. 4); 2007-2008, de octubre a marzo (Fig. 5); 2009-2010, de octubre a marzo (Fig. 6) y una última serie de cuatro mapas correspondientes al año 2014, de marzo a junio (Fig. 7). Por otra parte se presentan imágenes satelitales MODIS en falso color, de los mismos períodos en los que diferencian los casos de mayor escorrentía de los que no hubo (Fig. 8 a 11).

La serie de seis mapas de la Figura 4 representa el lapso de tiempo que va de octubre de 2003 a marzo del año siguiente, en sentido creciente del tiempo y de izquierda a derecha. Esta serie representa el caso a, valores de precipitaciones menores sin registrarse gran escorrentía.

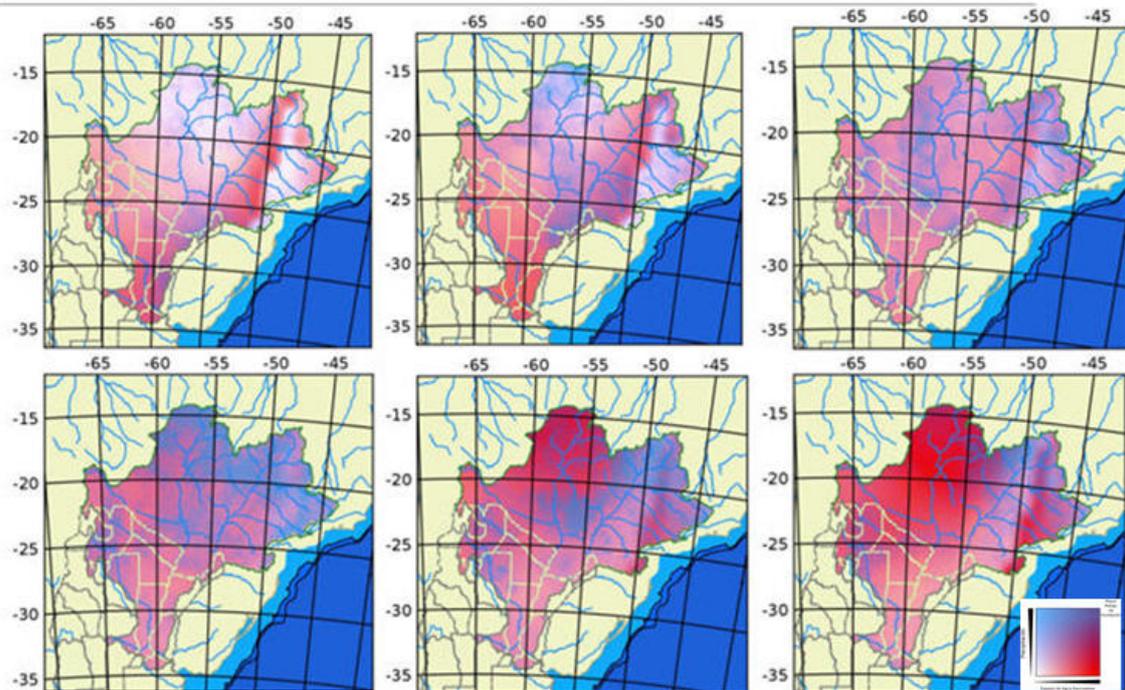
Esta serie de mapas muestra inicialmente un EEA bajo ante un rango poco abundante de precipitaciones, las mayores precipitaciones se registran en la cuenca del Paraguay. Mientras conforme avanza el tiempo, y van aumentando las precipitaciones el EEA paulatinamente se incrementa. La respuesta de aumento de altura de los ríos de las zonas alta y media es similar a las de todo el periodo, mientras que la respuesta de los ríos de la zona sur resultó baja, sin registrarse escorrentía. En las imágenes no se identifica superposición de los colores rojo y azul, lo que indica que las precipitaciones que se registran se ubican en regiones con EEA negativo.



**Figura 4.-** Mapa de datos GRACE (en rojo) y precipitaciones (en azul). De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se muestran las grillas correspondientes a octubre, noviembre y diciembre del 2003 y enero, febrero y marzo del 2004.

La serie de seis mapas de la figura 5 representa el lapso de tiempo que va de octubre de 2007 a marzo del año siguiente, en sentido creciente del tiempo y de izquierda a derecha. Esta serie representa el caso b, abundantes precipitaciones sin registrarse gran escorrentía.

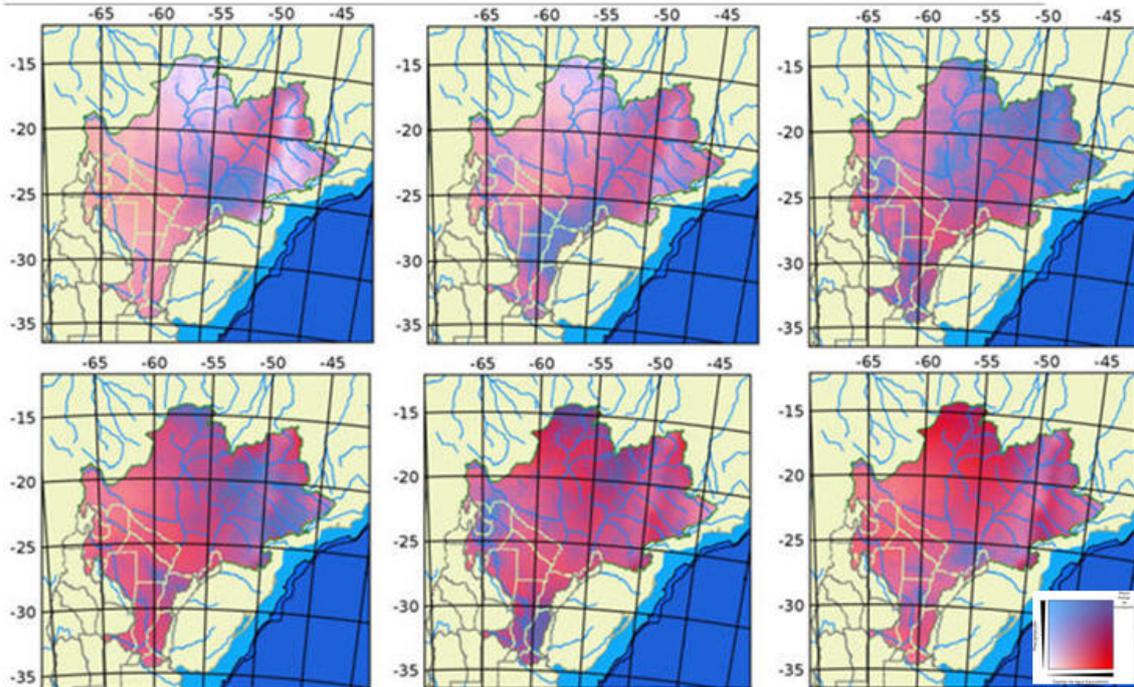
Esta serie de mapas muestra inicialmente un EEA bajo, mientras que las precipitaciones alcanzan el rango más alto del período considerado. En este caso también las mayores precipitaciones se registran en la cuenca del Paraguay. Mientras conforme avanza el tiempo, y van aumentando las precipitaciones el EEA paulatinamente se incrementa. La respuesta de aumento de altura de los ríos de las tres zonas, alta, media y baja es inmediata produciéndose escorrentía moderada. Puede identificarse en las imágenes la ausencia de superposición de los colores rojo y azul en la cuenca. A medida que se avanza en el tiempo, las regiones originalmente blancas se transforman en azul (mayor precipitación) y luego en rojo, indicando que inicialmente las precipitaciones se producen en las regiones con EEA negativo, aumentando luego su valor a positivo (rojo).



**Figura 5.-** Mapa de datos GRACE (en rojo) y precipitaciones (en azul). De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se muestran las grillas correspondientes a octubre, noviembre y diciembre del 2007 y enero, febrero y marzo del 2008.

La serie de seis mapas de la Figura 6 representa el lapso de tiempo que va de octubre de 2009 a marzo del año siguiente, en sentido creciente del tiempo y de izquierda a derecha. Esta serie representa el caso c, abundantes precipitaciones registrándose gran escorrentía.

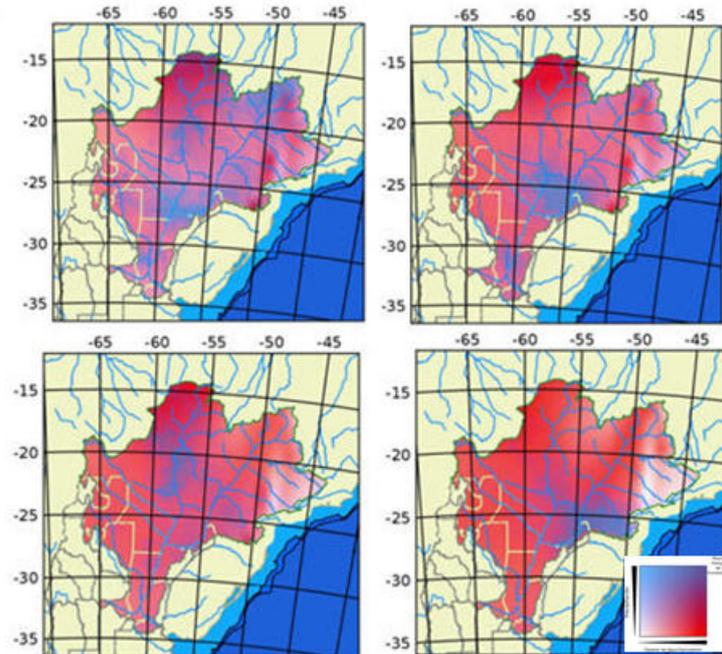
Esta serie de mapas muestra inicialmente un EEA relativamente alto ante un rango de precipitaciones importantes. Mientras conforme avanza el tiempo, aumentando las precipitaciones el EEA paulatinamente se incrementa. Las precipitaciones se localizan en las nacientes de los ríos Paraná y Paraguay principalmente. La respuesta de aumento de altura de los ríos de las zonas alta y media son las más altas del período considerado y además sostenidas en el tiempo, sin embargo parte los ríos de la zona baja no alcanzan los valores máximos. En este lapso se produce la mayor de las inundaciones, es decir, gran escorrentía. En las imágenes puede identificarse la superposición de los colores rojo y azul, indicando precipitaciones sobre valores de EEA alto, produciendo las inundaciones más importantes del período considerado.



**Figura 6.-** Mapa de datos GRACE (en rojo) y precipitaciones (en azul). De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se muestran las grillas correspondientes a octubre, noviembre y diciembre del 2009 y enero, febrero y marzo del 2010.

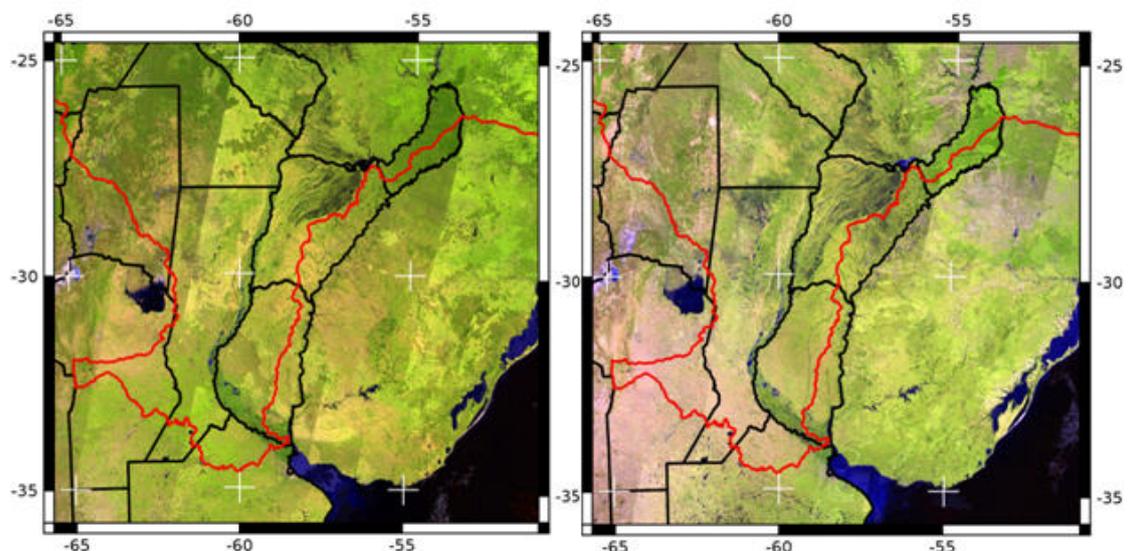
La serie de cuatro mapas de la Figura 7 representa el lapso de tiempo que va de marzo a junio de 2014, en sentido creciente del tiempo y de izquierda a derecha. Esta serie representa el caso d, valores de precipitaciones menores registrándose escorrentía.

Esta serie de mapas muestra inicialmente un EEA relativamente alto ante un rango moderado de precipitaciones. Mientras conforme avanza el tiempo, y van aumentando las precipitaciones el EEA paulatinamente se incrementa. La respuesta de aumento de altura de los ríos de las zonas, alta y media, es inmediata y de gran magnitud, mientras que la respuesta de los ríos de la zona sur resultó máxima al inicio del período produciéndose escorrentía. Las regiones en donde se identifican precipitaciones coinciden con valores de EEA positivos, observándose superposición de los colores rojo y azul en estas áreas.



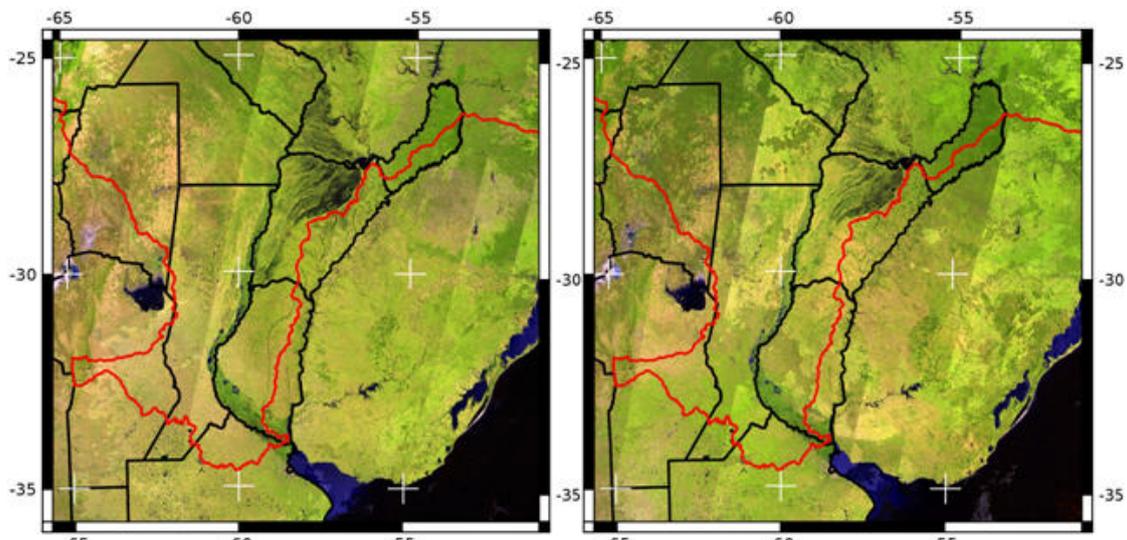
**Figura 7.-** Mapa de datos GRACE (en rojo) y precipitaciones (en azul). De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se muestran las grillas correspondientes a marzo, abril, mayo y junio del 2014.

Las imágenes satelitales MODIS de noviembre de 2003 y enero de 2004 muestra bajo a nulo nivel de escorrentía Las zonas más notables son la cuenca del Salado, en la provincia de Santa Fe, al Oeste de la provincia de Corrientes y en el delta del Paraná en la provincia de Entre Ríos (Fig. 8).



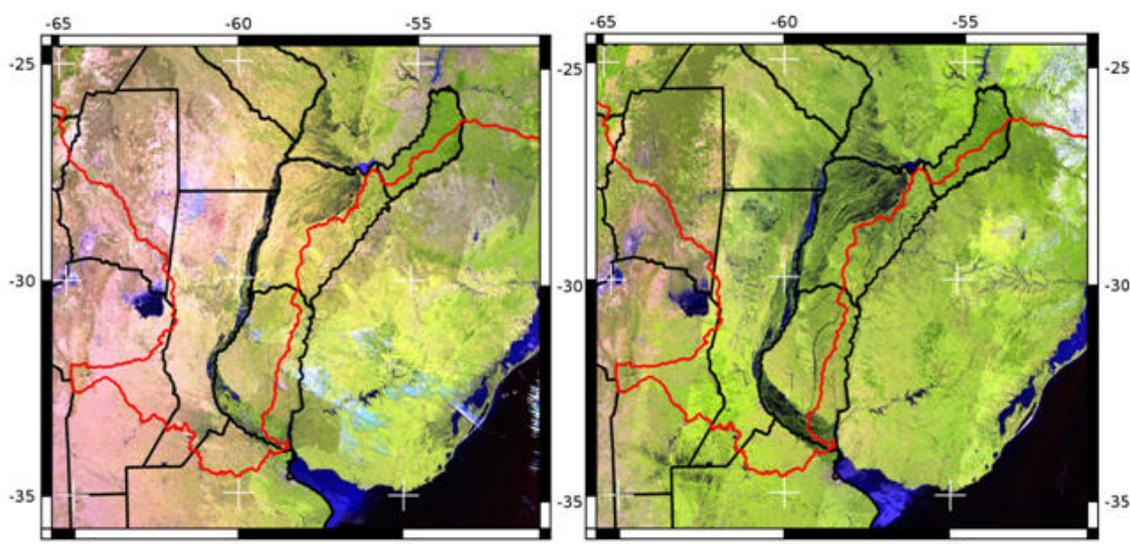
**Figura 8.-** Imágenes MODIS de la cuenca del río Paraná en la Argentina en el período nov2003-ene2004.

De igual modo en las mismas zonas notables se puede observar en las imágenes del período noviembre de 2007 y enero de 2008 el bajo nivel de contenido de agua en superficie (Fig. 9).



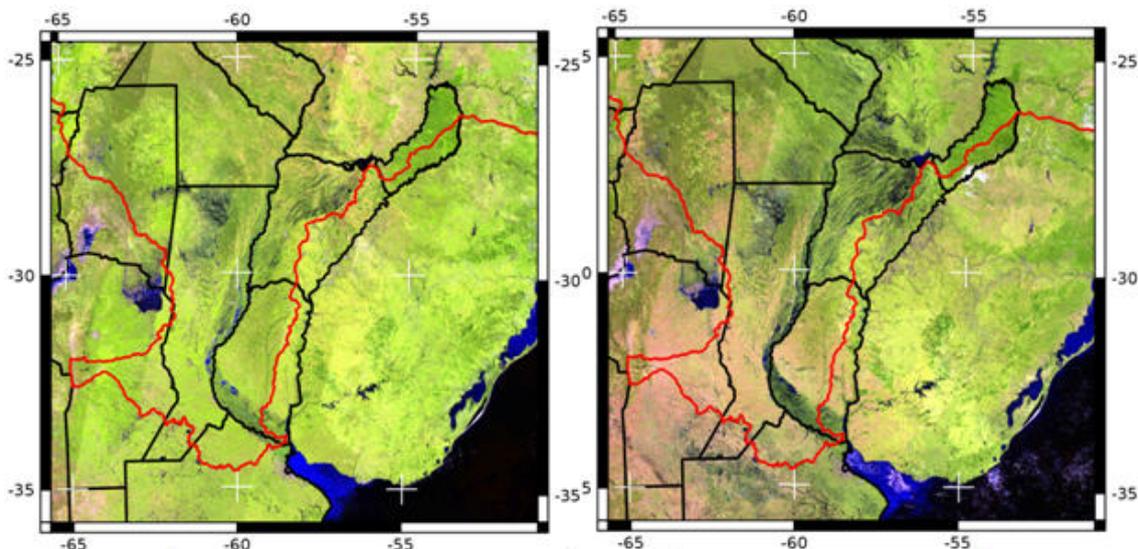
**Figura 9.-** Imágenes MODIS de la cuenca del río Paraná en la Argentina en el período nov2007-ene2008.

Las imágenes satelitales MODIS de noviembre de 2009 y enero de 2010 muestra un muy alto nivel de escorrentía (Fig. 10). Puede verse un muy importante nivel de escorrentía al Norte y Oeste de la provincia de Corrientes, a lo largo del curso medio del Paraná y en el delta del Paraná.



**Figura 10.-** Imágenes MODIS de la cuenca del río Paraná en la Argentina en el período nov2009-ene2010.

Así mismo las imágenes MODIS de marzo de 2014 y junio del 2014 muestran un muy alto nivel de escorrentía en las zonas destacadas en colores oscuros (Fig. 11).



**Figura 11.-** Imágenes MODIS de la cuenca del río Paraná en la Argentina en el período mar2014-jun2014.

## CONCLUSIONES

El análisis general de los datos utilizados incluyendo su distribución geográfica mostró la existencia de casos característicos que permitieron describir el comportamiento del escurrimiento del agua a través de las variables estudiadas (gravedad, precipitación y alturas hidrométricas). La diferencia entre los máximos de precipitación y de las alturas hidrométricas de los ríos representa la capacidad de amortiguación de la cuenca, que está relacionada al EEA que se evalúa a través de los datos de GRACE.

La metodología de trabajo aplicada no utiliza valores medios de precipitación y EEA para toda la cuenca, debido a que estos valores no permiten analizar la superposición geográfica de los fenómenos analizados. El análisis geográfico de la ocurrencia de precipitaciones sobre los valores de EEA permite identificar la superposición de las variables estudiadas, pudiendo caracterizar casos representativos de superposición y su evolución a través de las alturas hidrométricas observadas. La superposición geográfica de los fenómenos analizados es la que determina la respuesta de la cuenca. Por ejemplo, en el caso b analizado la respuesta del EEA se maximiza en los últimos meses, en donde no se manifestaron inundaciones, mostrando así gran inercia a la reacción de grandes precipitaciones permitiendo absorber la mayor parte de las mismas.

Estos resultados pudieron confirmarse a través de las imágenes satelitales MODIS las cuales destacan el contenido de agua en la superficie del terreno.



A través de los resultados de este trabajo se pretende aportar una metodología adicional al estudio de la ocurrencia de inundaciones vinculada a la masa de agua de la cuenca del río Paraná, con el fin de planificar un mejor uso y manejo de los recursos en la región.

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Huffman, G.J. & Bolvin, D.T. 2014. Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis Data Set Documentation. TRMM 3B4XRT\_doc\_V7.

Oliveira, P.T.S., Nearing, M.A., Moran S.M., Goodrich, D.C., Wendland E., & Gupta H.V. (2014). "Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado". *American Geophysical Union*. 7100-7114.

Landerer F.W. and S. C. Swenson, Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, Vol 48, W04531, 11 PP, doi: 10.1029/2011WR011453, 2012.

Pacino M. C., Pereira A., Cotlier, C. (2011). Utilización de datos gravimétricos GRACE e imágenes NOAA en un análisis multitemporal de la masa hídrica de la cuenca del río Paraná (Argentina). *Geoacta*, 36, (2), 211-228.

Reager, J. T. Thomas, B. F. & Famiglietti J. S. Ackers, P. (2014). "River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time". *Nature Geoscience*. Vol. 7, June, pp. 588–592.

Swenson, S.C. 2012. GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2016-04-22] at <http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005>.

Swenson, S. C. and J. Wahr, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08402, doi: 10.1029/2005GL025285, 2006.