

UTILIZACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS GRACE E IMÁGENES NOAA EN UN ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ (ARGENTINA)

María Cristina Pacino, Ayelén Pereira, Carlos Cotlier

CONICET - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – UNR

Av. Pellegrini 250 – 2000 – Rosario – Argentina

mpacino@fceia.unr.edu.ar, apereira@fceia.unr.edu.ar, ccotlier@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis multitemporal de la Cuenca del Plata en Argentina a través de datos gravimétricos GRACE e imágenes satelitales NOAA para el período 2003-2008. El objetivo de este estudio se centra en la detección, siguiendo dos metodologías diferentes, de la extensión y variación del área cubierta por el agua del río Paraná en la zona del Acuífero Guaraní; además de identificar aquellas zonas donde las crecidas o bajantes tuvieron mayor impacto.

A través de los resultados de este trabajo se pretende establecer una metodología económica de evaluación de la oscilación de la masa de agua del río Paraná en una zona estratégica de la cuenca, con el fin de realizar en un futuro próximo, un pronóstico de la misma y planificar un mejor uso y manejo de los recursos en la región.

Palabras claves: gravimetría satelital – teledetección – cuencas hidrográficas – NOAA - GRACE

ABSTRACT

In this work, the temporal variation of the La Plata Basin in Argentina is analyzed, by using the gravity data and satellite images from NOAA for the period 2003-2008. The main objective is to determine the extension and variation of the area covered by the water of the Paraná River in the Guaraní Water-bearing System, by following two different methodologies; and also the regions where the highest and lowest river levels had more impact are identified.

Through the results obtained in this study, an economic methodology to evaluate the Paraná River water mass changes for a strategic area of the basin is expect to be established, with the purpose of predict and plan a better use and management of the regional resources in the near future.

Keywords: satellital gravity – teledetection – hydrographic basins – NOAA - GRACE

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Puig et al. (2008), los ambientes acuáticos desempeñan importantes funciones naturales y proveen bienes y servicios para la humanidad: contribuyen a depurar el agua, a moderar el clima, a controlar inundaciones, a la recarga de aguas subterráneas, a la retención y exportación de sedimentos y nutrientes, y además son fuente de biodiversidad, de productos aprovechables, de valores culturales, recreación, turismo, etc. Actualmente se percibe una gran preocupación socioeconómica por el uso y manejo de estos ambientes acuáticos que se encuentran en creciente degradación, principalmente por la influencia de la actividad humana y la falta de controles en estas áreas de enorme importancia ecológica, económica y ambiental.

El Río Paraná nace en el estado de San Pablo (Brasil) de la confluencia de los ríos Grande y Paranaíba, aproximadamente a 20° de latitud Sur y 51° de longitud Oeste. En su recorrido por la Argentina hasta su desembocadura en el Río de La Plata recibe el aporte de numerosos

cauces de agua, como los ríos Iguazú, Salado y Carcarañá. Dentro de la cuenca del Río Paraná se ubica gran parte de la segunda reserva subterránea de agua dulce del mundo: el Sistema Acuífero Guaraní (Santa Cruz, 2009). Este reservorio está localizado en el centro-este de América del Sur, subyacente a cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.

El Sistema Acuífero Guaraní es un recurso de gran importancia económica y ambiental para la región y, en un futuro no muy lejano, para todo el mundo. El aprovechamiento de las aguas subterráneas ha aumentado mucho en los últimos 20 años debido al incremento de la demanda y, también, en función de la degradación de la calidad de las aguas superficiales como consecuencia del crecimiento poblacional y del desarrollo industrial y agropecuario.

Asimismo, los Esteros del Iberá están conformados por un sistema de lagunas y bañados que pertenecen a la cuenca del Río Paraná y constituyen un ecosistema de humedales de gran importancia por los procesos hidrológicos y ecológicos que en ellos ocurren, y la diversidad biológica que sustentan (Muzón et al., 2008).

Las misiones satelitales gravimétricas introducen un nuevo concepto en el modelado del campo gravitacional, ya que proveen valiosa información acerca del comportamiento geodinámico de nuestro planeta (Wahr et al., 1998, 2004). En particular la campaña satelital GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) es una misión conjunta de las agencias espaciales de Estados Unidos (NASA) y Alemania, y permite obtener variaciones mensuales del campo de gravedad para una determinada región o país. Además, a través de los resultados derivados de esta misión, es posible detectar cambios de masas de hasta 1 cm en un área de 600 km, obteniendo así la tendencia y amplitud de las oscilaciones gravitatorias para una determinada época y zona. Las técnicas geodésicas espaciales miden deformaciones en la superficie de la Tierra, las cuales pueden ser relacionadas con la redistribución de masas (Beutler, 2004).

La información provista por GRACE ha cambiado el modo de ver y construir modelos de gravedad. La idea clásica de la gravedad como magnitud invariable en el tiempo, ya no es aceptable. Cuando las masas se desplazan de un lugar a otro ya sea en la Tierra misma o en los océanos, superficies congeladas o dentro de la atmósfera terrestre, cambia el campo de gravedad. El campo gravítico terrestre cambia de un momento a otro debido principalmente a la masa de agua en movimiento sobre la superficie. Como el agua –en todas sus formas– tiene masa y peso, es posible pesar el océano, la lluvia y las capas de hielo.

GRACE observa el ciclo hidrológico y permite monitorear el agua que se evapora hacia la atmósfera, el agua que se precipita en forma de lluvia o nieve o el agua que se desplaza por la superficie en forma de ríos.

Wahr et al. (1998) y Chen et al. (2005, 2006) produjeron modelos globales de amplia aplicación en hidrología. Modelos regionales para cuencas hídricas también han sido elaborados para la cuenca del Mississippi por Rodell et al. (2005, 2007). Seo & Wilson (2005) han ensayado simulaciones de cargas hidrológicas para cinco cuencas de diferentes áreas y volumen de agua situadas en distintas partes del mundo (Amazonas, Mississippi, Lena, Huang He y Oranje).

Los datos provenientes de GRACE permiten medir la cantidad de humedad que se evapora del suelo y la distribución de agua en subsuelo. Esta capacidad de GRACE puede alertar a los hidrólogos sobre cambios en los acuíferos y fuentes de agua subterránea. Es muy difícil medir cuánta agua hay en el subsuelo y cuánto cambia de un año para otro. GRACE es una de las pocas herramientas de que se dispone para hacerlo. Puede ayudar a comprender la hidrología local, la evapotranspiración, las precipitaciones y el escurrimiento

de las aguas, y esto puede dar una idea de cuanta agua hay disponible en el subsuelo para riego y agricultura.

Por otro lado, de acuerdo con Gandía y Meliá (2005), la teledetección es una eficiente herramienta para el monitoreo de un área compuesta por diferentes características espectrales, radiométricas, temporales y espaciales. Una de las principales ventajas de la teledetección espacial es su capacidad para seguir fenómenos dinámicos, gracias a la cobertura cíclica que proporciona (Chuvieco E., 2002). Esta capacidad tiene muchas aplicaciones en el análisis de distintos procesos ambientales, como por ejemplo en el estudio de las variaciones de la masa de agua de un río y la determinación de las áreas de inundación.

Al tratarse de información adquirida por sensores ubicados en órbitas estables y repetitivas, a través de las imágenes satelitales es posible estudiar las variaciones que se producen en la superficie de la Tierra, ya sea debido a cambios estacionales, catástrofes naturales esporádicas (erupciones, incendios), continuas (deforestación) y naturales (inundaciones) o por la influencia del hombre. Esta información dependerá del ciclo de dicha variación, desde horas (huracán) hasta meses o años (desertificación). Además, las imágenes satelitales ofrecen datos de amplias áreas geográficas, lo que permite analizar procesos y patrones ambientales en gran escala y en forma directa, en lugar de inducirlos a través de mediciones locales. El análisis de cobertura y detección de cambios son herramientas centrales en la planificación y conservación de áreas naturales y en el armado de Sistemas de Información Geográficos.

La resolución espacial de las imágenes NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration Satellite) permite, entre otras aplicaciones, un análisis y evaluación de los recursos del agua en una región. El sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) otorga una buena resolución espectral y temporal, y un tamaño medio del píxel adecuado para el estudio de procesos dinámicos a escalas regionales (Shaw and Vennel, 2000).

AREA DE ESTUDIO

El estudio se centró sobre la cuenca del Río de la Plata, en el área correspondiente a Argentina, más precisamente en el tramo del Alto Paraná, límite Argentina- Paraguay (Figura1). Se analizó en detalle la zona correspondiente a los Esteros del Iberá en el norte de la provincia de Corrientes. La misma se ubica en el área definida entre los 27°30' y 29° de latitud Sur, y 56° 30' y 58° 30' de longitud Oeste aproximadamente.

El Río Paraná posee una longitud de 4.000 km. (es el segundo río en longitud de Sudamérica, después del Amazonas), su cuenca abarca 5 países (Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay y Bolivia) ocupando una superficie de 3.100.000 km², su caudal medio es de 17.300 m³/s y posee un delta de 14.000 km² originado principalmente por la deposición de sedimentos. El sistema presenta tres áreas hidrográficas: el río Paraguay, el Alto Paraná y el Paraná medio e inferior.

El área del Alto Paraná nace en Brasil y aguas abajo, constituye el límite paraguayo-brasileño y paraguayo-argentino hasta confluir con el río Paraguay; es el que recibe las mayores precipitaciones. Es importante destacar que el territorio argentino se ubica en el sector terminal de la cuenca, compartida con Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay, esto significa que está influido por todos los fenómenos que ocurren en las partes altas y medias de la cuenca, fuera de la

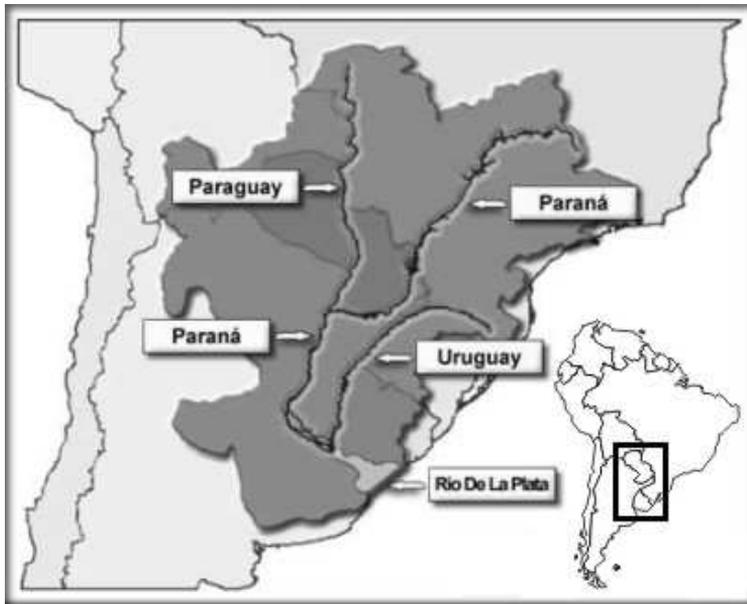


Figura 1. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río de la Plata

jurisdicción del país. En territorio argentino, la mayor contribución a las crecidas del río Paraná proviene del Alto Paraná Medio, seguidas por el Alto Paraná inferior (Codignoto y Medina, 2005).

El Acuífero Guaraní es un reservorio subterráneo transfronterizo de agua dulce, extendiéndose desde la Cuenca Sedimentaria del Paraná a la Cuenca Chaco-Paranaense. Está localizado en el centro-este de América del Sur, entre 12° y 35° de latitud Sur y 47° y 65° de longitud Oeste (Figura2). Tiene una extensión aproximada de 1,2 millones de km². Las reservas permanentes del Acuífero son del orden de los 45.000 km³.

Los Esteros del Iberá conforman una amplia red de pantanos y bañados que abarcan entre 15.000 y 25.000 km² en la provincia de Corrientes, en el noroeste de la República Argentina; constituyen el segundo humedal más grande del continente y forman parte de un sistema hidrográfico mucho más extenso (el macrosistema del Iberá, de unas 1.300.000 ha) en el que se desarrolla un ecosistema tropical de grandísima diversidad (Figura 3).

Este humedal es alimentado principalmente por lluvias, y la escasa pendiente y densidad botánica en los cuerpos de agua hacen que el drenaje del sistema sea marcadamente lento; el agua fluye hacia el sudoeste, hasta desaguar en el Paraná Medio a través del río Corrientes. El área exacta que ocupan los bañados varía con la altura de los ríos de la región, con los que están conectados subterráneamente. Los rasgos geomorfológicos más destacables son las lagunas de diversa conformación que componen el eje principal de la cuenca, conectadas entre sí por riachos y rodeadas de bañados permanentes. Junto con ellas se alternan escasas áreas de tierra seca, mayormente lomadas bajas y arenosas, y una gran extensión de bañados, es decir, terreno anegable o anegado.

INFORMACION DISPONIBLE

De campañas satelitales gravimétricas

Se tuvo en cuenta la información proveniente de la campaña gravimétrica satelital GRACE para la confección de mapas de amplitud de la gravedad para el período en estudio, a partir de los cuales se puede inferir la variación de masas de agua.

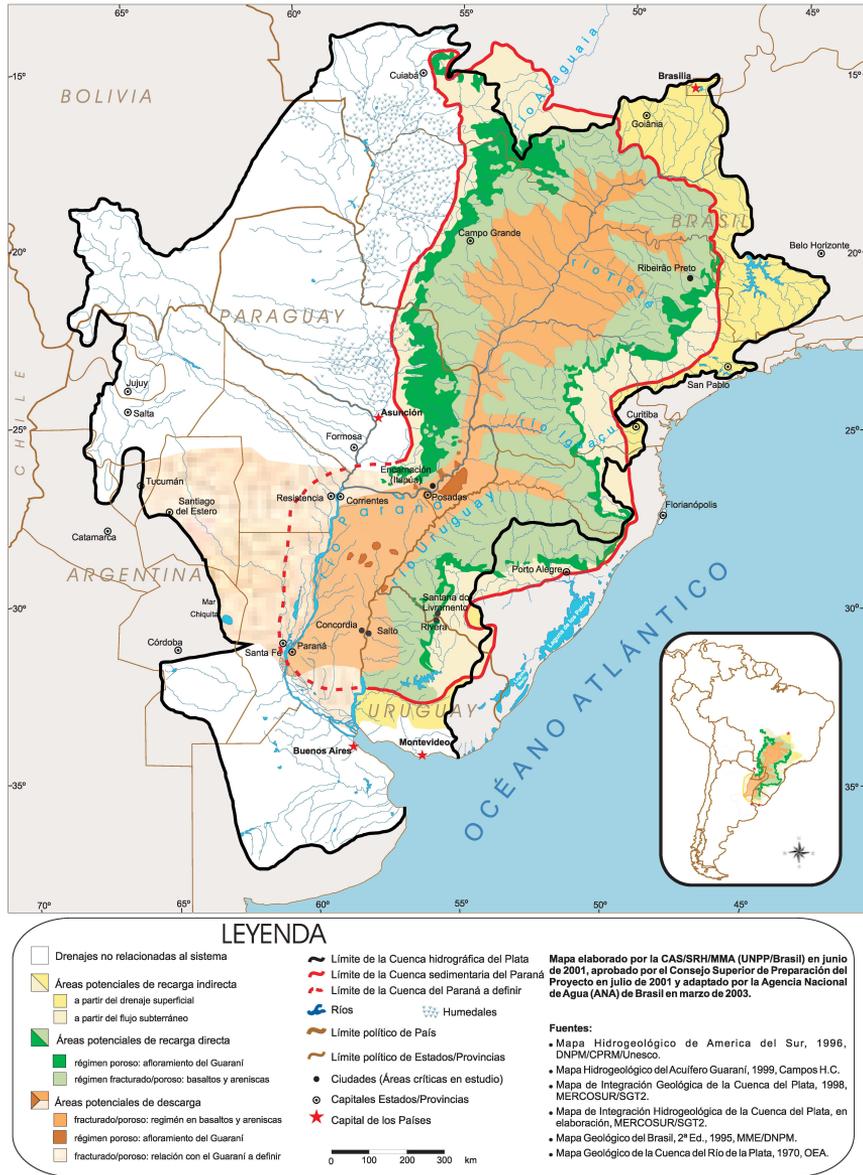


Figura 2. Ubicación geográfica del Acuífero Guaraní en la Cuenca del Plata.

La información GRACE se organiza en cuatro niveles, tres de ellos accesibles a los usuarios. Los distintos productos GRACE (Nivel 1B y Nivel 2) y la documentación soporte de los mismos se pueden consultar en los sitios de internet de las siguientes instituciones:

Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC); JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA); Information System & Data Center (ISDC) y GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam, Alemania). También, en Bettadpur (2003) se describen las características del producto GRACE nivel 2.

Debido a que los coeficientes armónicos esféricos de GRACE de grado y orden superior a sesenta son dominados por ruido, para realmente recuperar los cambios de altura en el geode o los cambios de masa a partir de información GRACE, se requiere un cierto nivel de suavizado para minimizar los errores de ruido espacial. Wahr et al. (1998) abordan con detalle este problema. En general se usan filtros del tipo gaussiano que suponen una distribución normal de los errores espaciales. La elección de la escala del filtro es crítica. El uso de este tipo de filtros está ampliamente documentada en Wahr et al., 2004; Tapley et al., 2004b; Chambers et al., 2004; Chen et al., 2005, entre otros.

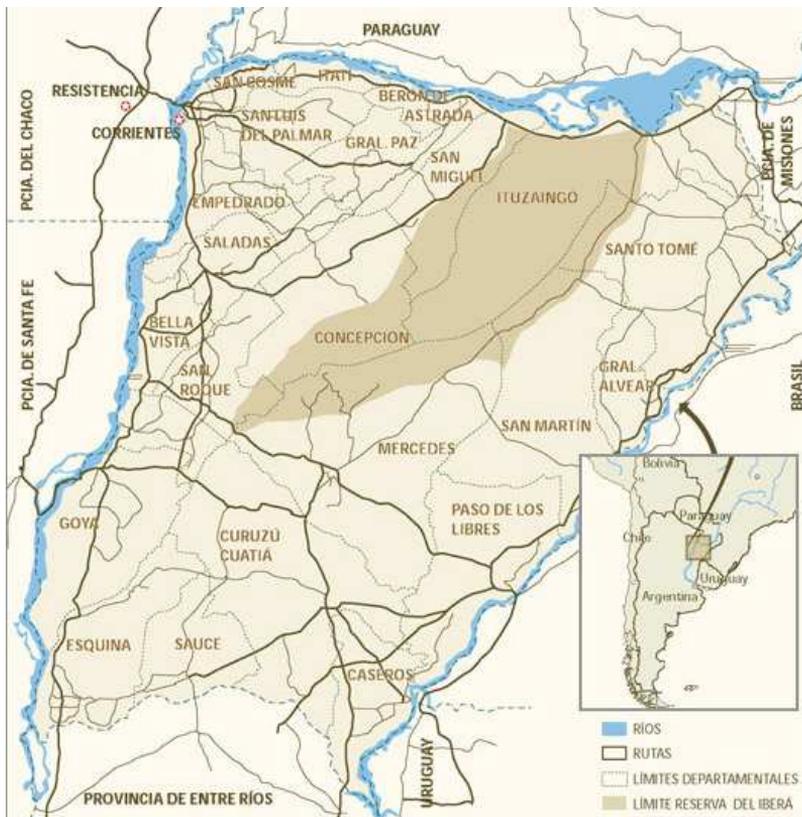


Figura 3. Ubicación geográfica de los Esteros del Iberá, Corrientes, Argentina.

Otras técnicas de filtrado y suavizado, basadas en las propiedades espectrales de los coeficientes armónicos GRACE han sido propuestas y ensayados por Chen et al. (2006), Rodell et al. (2007), Chao (2005). También Sasgen et al. (2006) proponen el uso de un método de premediación espacial basado en filtros óptimos Wiener.

Existen diferentes procedimientos para transformar la señal obtenida y procesada de GRACE en cambios de masa (Wahr et al., 1998). Los cambios de masa pueden pensarse como concentrados en una capa muy delgada en la superficie cuyo espesor es variable.

Entre los métodos de transformación cambio de gravedad-cambio de masa, principalmente podrían citarse dos, como los más utilizados (Forsberg and Reeh, 2006):

- Conversión de cambios de gravedad a cambios de masa al nivel de terreno considerando una aproximación simple de una capa de acuerdo con la clásica expresión $\delta g = 2 \pi G \sigma \delta h$ (siendo δg la variación de gravedades superficie, δh la variación en la altura de la capa, G la constante de gravitación universal y σ la densidad de la capa).

- Inversión formal de los cambios de gravedad en cambios de masa utilizando una inversión generalizada por mínimos cuadrados.

En función de la disponibilidad de programas de cálculo, se empleó para este estudio el primero de los métodos citados.

Los satélites de la misión GRACE vuelan a una altitud cercana a los 500 km. Como es sabido, el campo gravitacional disminuye con la altura y las cortas longitudes de onda se atenúan más que las largas. En consecuencia es necesario suavizar las cortas longitudes de onda para recuperar el set de masas sobre la superficie terrestre que causa el campo gravitacional provisto por GRACE desde su altitud de vuelo. Existen muchas opciones de suavización o filtrado, generalmente provistas como filtros Gaussianos de diferentes radios. Los radios más frecuentes utilizados para este tipo de datos son 1000, 700 y 500 km.

Las grillas-filtro con resolución de 500 km suelen ser muy ruidosas y su uso se recomienda sólo para la obtención de promedios o para su aplicación en conjunto con algún otro algoritmo de reducción de errores. Otra alternativa fue la utilizada en este estudio, que consiste en la retención de las tres primeras funciones ortogonales empíricas de las series temporales de mapas prefiltrados con el filtro Gaussiano de 700 km de resolución. Se están haciendo pruebas también con un suavizador por mínimos cuadrados desarrollado por Seo y Wilson (2005).

De imágenes satelitales

De acuerdo con Chuvieco (1998), la realización de un proyecto que implique la utilización de imágenes satelitales, requiere en primer lugar de la elección del sensor a utilizar y de las fechas de adquisición, lo cual estará definido por el objetivo y escala del trabajo.

En este proyecto se utilizaron imágenes de la constelación NOAA. Estos satélites, de órbita polar, surgieron en un principio con un fin meteorológico, pero con el paso del tiempo su aplicación se fue generalizando.

Se trata de satélites americanos de órbita polar, poseídos y operados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Los NOAA 14 y NOAA 15, lanzados respectivamente el 29 de mayo de 1994 y el 13 de mayo de 1998, vuelan a una altitud de 850 kilómetros, en una órbita inclinada con 99 grados comparados al plano ecuatorial. Cada órbita completa alrededor de la tierra toma 102 minutos y alcanza 14 órbitas por día. Estas órbitas son sol-síncronas, es decir las cruces del satélite a cierto punto siempre en la misma hora del día (Sobrino, 1992).

Los 2 satélites son fuera de fase; sobrevolando una misma área por lo menos 4 veces por día con un intervalo de aproximadamente 6 horas. Están equipado con un radiómetro (Advanced Very High Resolution Radiometer) que permite una adecuada resolución (1.1 kilómetros a la vertical del satélite) con superposición temporal. Este instrumento explora

una banda de 3000 kilómetros de ancho. De los diferentes sensores NOAA mencionados, se utilizó el AVHRR, debido a su buena cobertura temporal y bajo costo; además es el más adecuado para aplicaciones terrestres y a escalas regionales por su resolución espacial. Este sensor proporciona imágenes con una resolución de 1.1 km (en el nadir), en 5 bandas del espectro (Tabla I).

Tabla I. Rango espectral del sensor AVHRR- NOAA

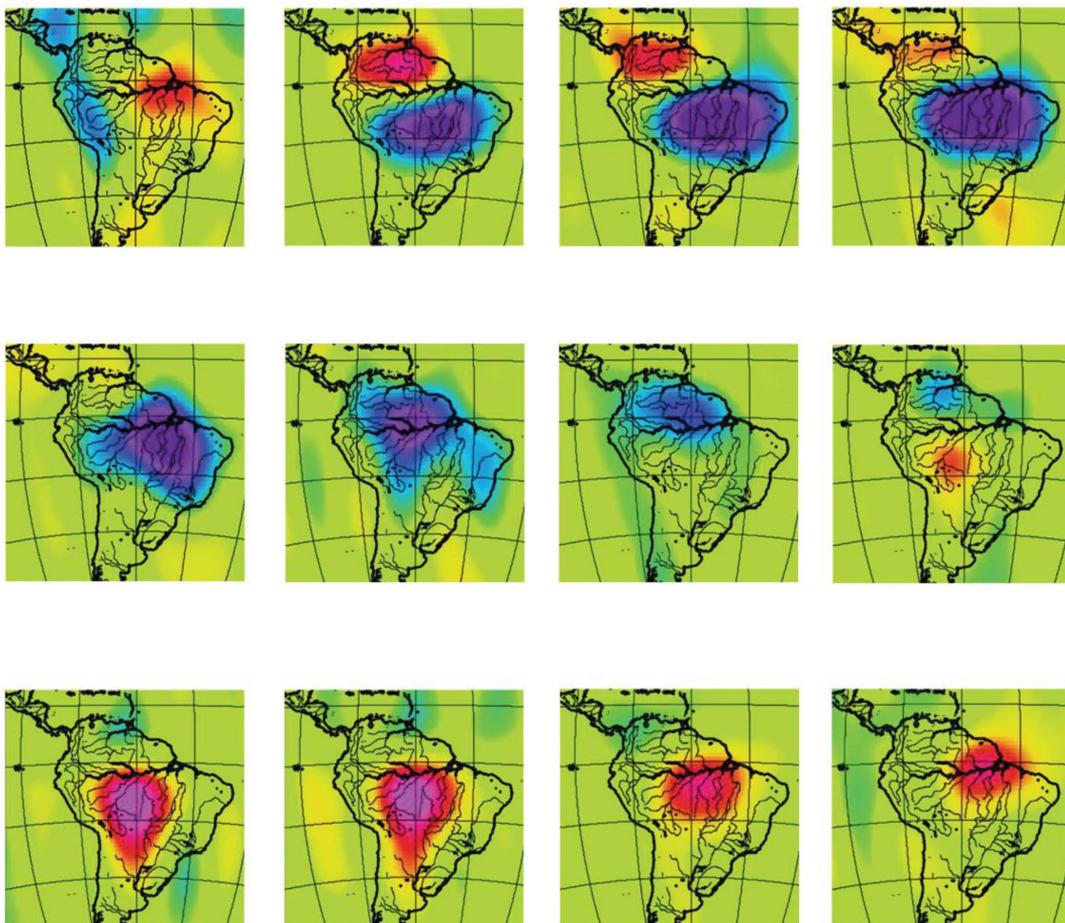
Canal	Long. de onda central (µm)	Rango espectral (µm)	Usos
1	0.630 (VIS)	0.58 – 0.68	Mapeo diurno de nubes, estudio de vegetación
2	0.862 (VNIR)	0.725 – 1.00	Demarcación Agua – Tierra, estudio de vegetación
3a	1.61 (NIR)	1.58 – 1.64	Detección de nieve y hielo
3b	3.74 (IR)	3.55 – 3.93	Mapeo nocturno de nubes, temperatura superficial del mar
4	10.80 (IR)	10.30 – 11.30	Mapeo nocturno y diurno de nubes, temperatura superficial del mar, incendios de campos y forestales
5	12.00 (IR)	11.50 – 12.50	Temperatura superficial del mar, incendios de campos y forestales, térmico

Las imágenes AVHRR utilizadas en este estudio corresponden al formato HRPT. La información ofrecida por este sensor se puede presentar en 3 formatos distintos: LAC (Local Area Coverage), es el de mayor resolución; HRPT (High Resolution Picture Transmission), se envía en tiempo real; y GAC (Global Area Coverage), de menor resolución que los anteriores.

METODOLOGIA

Para poder detectar los cambios más importantes del fenómeno de inundación en la cuenca del Río de la Plata, que involucra como principal afluente al río Paraná, debió realizarse en primer lugar un análisis para el período 2003-2009 del comportamiento de este curso de agua. Para ello se recurrió principalmente a dos fuentes de datos:

1. Datos del nivel de la capa de agua del río Amazonas y afluentes obtenidos por la misión GRACE a través de la NASA. Cabe destacar que el ciclo de este río suele tener influencia en el Paraná, por lo cual se tomaron como referencia los períodos de mayor variación del nivel del agua. A modo de ejemplo se muestra el caso para el año 2004 (Figura4).



Espesor de la capa de agua en cm (desvío con respecto al promedio) en la cuenca del río Amazonas, Brasil.

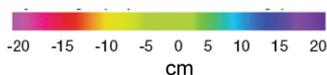


Figura4. Variaciones de la masa de agua en la cuenca del río Amazonas en el año 2004 obtenidas a través de GRACE (NASA). La imagen fue obtenida desde “Science Serving Society. Water management”, NASA, 2006. (<http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/>)

2. Información provista por la Prefectura Naval Argentina acerca de las crecidas y bajantes máximas del Río Paraná (Tabla II).

Tabla II. Datos provenientes de Prefectura Naval Argentina.

Año	Crecida máxima		Bajante máxima	
	Fecha	Altura (m)	Fecha	Altura (m)
2003	08-May	4,63	20-Sep	1,82
2004	21-Dic	3,90	15-Oct	1,55
2005	02-Mar	4,13	08-Sep	1,53
2006	10-Abr	3,32	18-Sep	1,45

De esta forma, se realizó la elección de las fechas de adquisición de las imágenes NOAA, resultando solamente disponibles: Septiembre del 2003, Octubre y Diciembre del 2004, Marzo del 2005 y Abril y Septiembre del 2006.

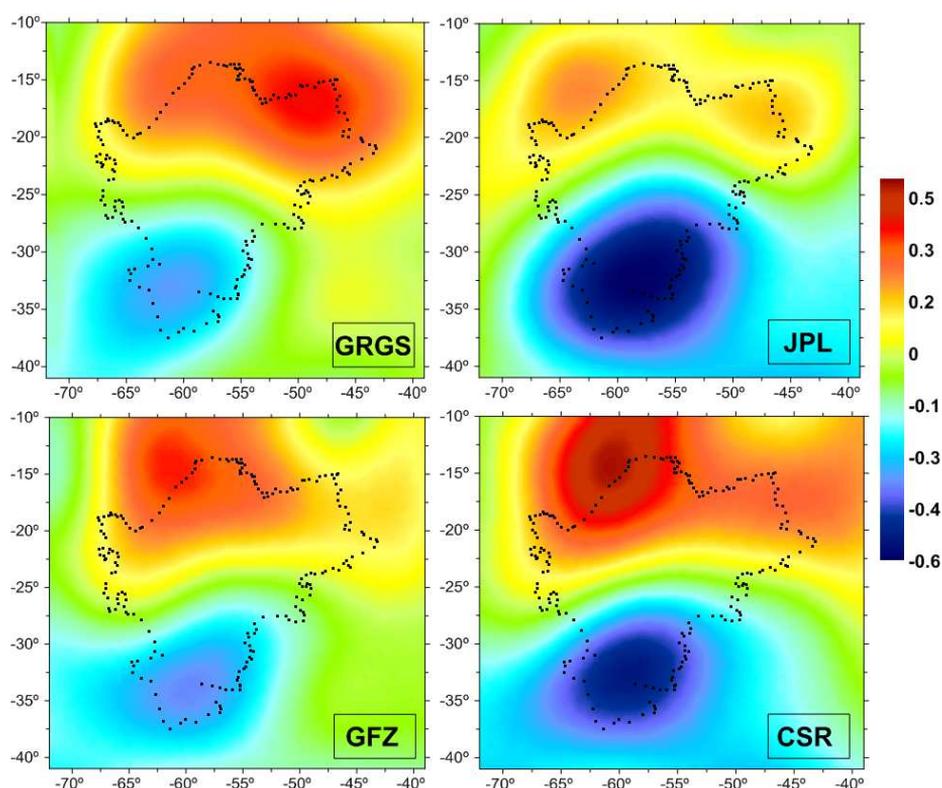


Figura 5. Tendencias gravimétricas a altitud de satélite (480 Km) dadas en μGal por año para el período 2003-2006, basadas en las soluciones GRGS-RL01, JPL-RL04.1, GFZ-RL04 y CSR-RL04, para la Cuenca del Plata.

Luego de definidos los períodos, se realizó una segunda selección de las imágenes, descartando aquellas que mostraban una elevada cobertura de nubes o presentaban una orientación que no permitía ver claramente el área en estudio.

Las imágenes satelitales se obtuvieron desde la Estación Terrena marca Dartcom del Centro de Sensores Remotos de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad de Rosario, Provincia de Santa Fe.

El sistema de captura de datos dispone del equipamiento necesario, tanto en hardware como en software, para la captura de imágenes HRPT del satélite NOAA y SeaWiFs (ambos de los Estados Unidos) y Feng Yun 1C y D (de la República Popular China).

La Estación Satelital permite la obtención de imágenes de diversos satélites que orbitan diariamente en el área que barre la antena, y dispone de la capacidad de capturar hasta 16 imágenes diarias de los satélites NOAA (12, 14, 15, 16 y 17) y el satélite Feng Yun 1C y 1D.

TRATAMIENTO DE LA INFORMACION

Información Gravimétrica

Los datos GRACE usados para este análisis son datos de Nivel-2 para el período Abril 2002 a Agosto 2009. Estos datos son provistos a través de internet por diversos centros de investigación. En este estudio se utilizaron los datos provistos cuatro centros de cómputos: CSR (Center for Space Research, University of Texas), JPL (Joint Propulsion Laboratories, California), GFZ (GeoForschungs Zentrum, Potsdam) y BGI-CNES (Bureau Gravimétrique International, Centre National d'Études Spatiales, Toulouse). Las características generales de estos datos se describen en Tabla III.

Tabla III. Descripción del conjunto de datos GRACE usados en este estudio. $(n,m)_{\max}$ es el máximo grado y orden de la expansion en armónicas esféricas.

	CSR	GFZ	JPL	BGI
Versión	RL04	RL04	RL04.1	RL01
Epoocas	74	68	70	202
Inicio	4-2002	8-2002	4-2002	8-2002
Final	7-2008	8-2008	4-2008	5-2008
$(n,m)_{\max}$	60	120	120	50

En todos los casos, los datos consisten en coeficientes del desarrollo en funciones armónicas esféricas (o coeficientes de Stokes) del potencial gravitatorio terrestre. La variación temporal de cada conjunto de datos se agrupa en secuencias mensuales, excepto para las soluciones del BGI-CNES, cuyos datos se proveen en periodos de 10 días (Lemoine *et. al.*, 2007, 2008). Como cada centro de análisis sigue una estrategia particular de procesamiento, los coeficientes armónicos esféricos que publican los distintos centros son diferentes (Klees *et al.*, 2008).

De acuerdo con Pereira et al. (2010), los parámetros que caracterizan la variación gravitacional, traducida en variación de masa, son tendencia, amplitud y fase. La metodología más usual para su modelización se basa en el desarrollo de un ajuste por mínimos cuadrados de las variaciones anuales en una función polinómica con términos de senos y cosenos.

La Figura 6 muestra la tendencia gravitacional en la cuenca del Río de la Plata y a la altitud de satélite (480 km) basada en las soluciones de los cuatro centros mencionados. Los gráficos indican algunas diferencias significativas entre las distintas soluciones GRACE.

A partir de la inversión generalizada de la tendencia gravitacional calculada, es posible derivar modelos de cambios de masa asumiendo un problema lineal de la forma $\bar{y} = A \cdot \bar{x}$, donde el vector de observación \bar{y} es la tendencia de gravedad de Figura XX, \bar{x} es el vector paramétrico y A es la matriz de respuesta. Este problema puede resolverse satisfactoriamente aplicando la inversión generalizada de Tychonov (Sandberg Sorensen and Forsberg, 2008; Forsberg and Reeh, 2006).

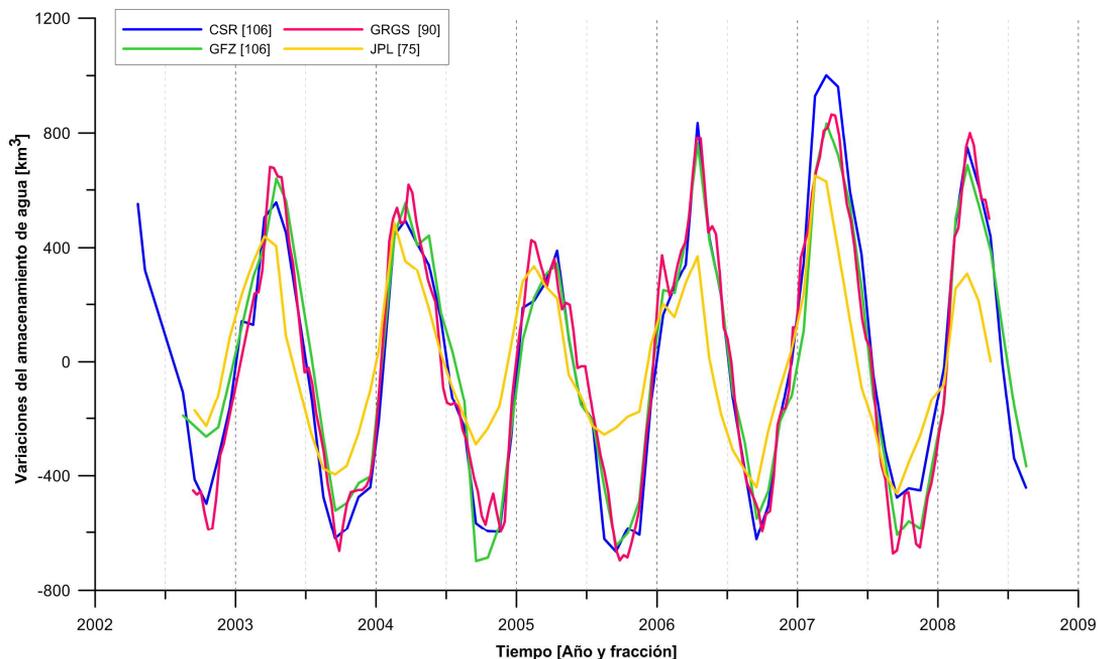


Figura 6. Variaciones del almacenamiento de agua en la Cuenca del Plata estimado a partir de los 4 centros GRACE, expresado en km^3 de agua equivalente. La fase anual de las variaciones estimadas para cada centro se indica entre paréntesis en la leyenda.

Los resultados del cálculo se muestran en Figura 7, donde pueden verse los cambios mensuales en el reservorio de agua calculados a partir de cada solución gravimétrica mensual provista por los centros mencionados y expresados en km^3 de masa de agua equivalente. Las principales fuentes de incertezas que intervienen en el proceso de conversión de datos GRACE en variaciones de masa son (Vaz de Almeida, 2009):

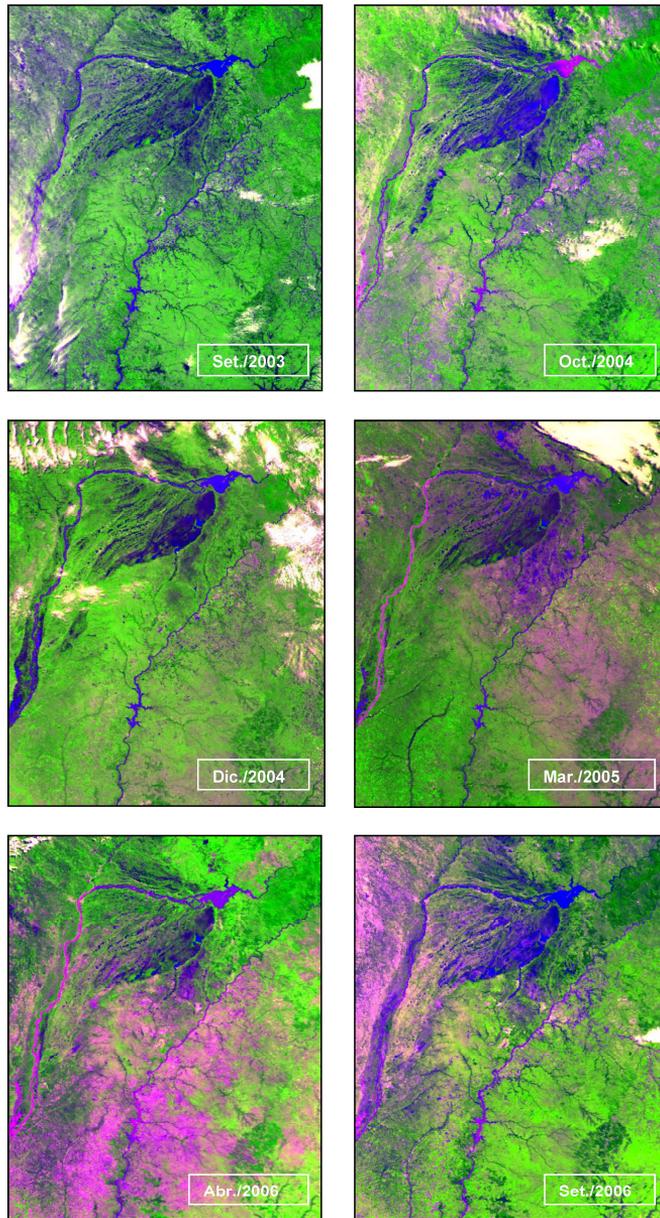


Figura7. Imágenes en falso color de parte de la cuenca del Río Paraná.

-Los errores de comisión de los coeficientes de Stokes, los cuales de acuerdo a la evaluación en la Cuenca Amazónica (la cual cuenta con el doble de la superficie que la Cuenca del Plata) realizada por Vaz de Almeida (2009), implicaron una imprecisión de ≈ 130 mm en la estimación del EWH.

-Los errores de omisión debido al truncamiento de los coeficientes de Stokes en los modelos periódicos de geopotencial, los cuales para $N=50$ resultan en 10-15 mm de EWH para un radio de 450-500 km.

-El efecto de filtración (*leakage*) de señales geofísicas provenientes del océano y áreas continentales externas a la cuenca (como cuencas vecinas por ejemplo), puede llegar a los ≈ 21 mm de error en el EWH. Este error disminuye con el aumento de la distancia a la desembocadura del sistema hidrográfico.

Las figuras 5 y 6 muestran claramente como GRACE detecta los cambios de masa en el área de la Cuenca del Río de La Plata. En particular puede advertirse la existencia de una fuerte tendencia gravimétrica negativa en la zona sur de la cuenca, que puede relacionarse con el comportamiento del río Paraná y sus variaciones estacionales. Además, la serie temporal muestra que los resultados derivados de los cuatro centros de cómputo indican máximos en los meses de Abril y mínimos en los meses de Octubre.

Interpretación de Imágenes

La extracción de información temática de imágenes satelitales puede llevarse a cabo de maneras diferentes: mediante la interpretación visual o la interpretación digital de la información. La metodología a utilizar depende del objetivo del trabajo, de su aplicación final y de las características del área en estudio. El tratamiento digital permite realizar operaciones complejas de manera precisa, simplifica la determinación de cambios temporales y garantiza una clasificación más rápida de la zona en estudio; el análisis visual es muy útil cuando se trata de determinar áreas de gran heterogeneidad, auxilia al método digital aislando sectores de confusión en las imágenes o estratificando sectores para aplicar tratamientos específicos. Ambas técnicas se complementan y pueden emplearse en forma integrada (Tateshi y Ebata, 2004). En este trabajo se aplicaron ambos tratamientos para la interpretación de las imágenes.

A través del software HRPT CHRPT Grabber se capturaron las imágenes obteniéndose así archivos de datos para cada una; luego utilizando el programa SIAMIV, se convirtieron esos archivos a formatos utilizables en software de procesamiento de imágenes, como el ENVI.

Mediante el programa SIAMIV se realizó la calibración radiométrica y georreferenciación de cada imagen. Esto último se llevó a cabo teniendo en cuenta 2 parámetros: la georreferenciación propia de la imagen y los mapas vectoriales incluidos en el software que contienen cursos de agua, límites, etc.

Una vez procesada cada imagen con SIAMIV para la zona en estudio, se generaron los archivos para procesarlos con el programa ENVI. Las imágenes digitales están formadas por una matriz numérica, por lo cual es posible realizar algoritmos algebraicos y generar una nueva imagen resaltando el fenómeno de interés y sus características.

Para poder detectar el límite de los cuerpos de agua en la imagen, es decir el límite agua-vegetación/tierra, se procedió a realizar con el programa ENVI una operación matemática entre bandas: el cociente entre la banda 1 (rojo, R) y la banda 2 (infrarrojo cercano, IRC). La reflectancia del agua en la banda 1 presenta valores altos, y en la 2, bajos; por lo tanto el cociente entre ambas bandas resulta en valores muy elevados. Como ocurre exactamente lo contrario para la vegetación/tierra, mediante esta operación se detecta con facilidad el contraste entre cuerpos de agua y vegetación.

Luego de realizado el cálculo de este índice mediante el cociente R/IRC para cada imagen y para la zona de detalle, el siguiente paso fue generar imágenes en falso color 12(B1/B2) en RGB (Figura8), para obtener una mejor visualización del fenómeno. Como resultado, se pueden detectar los cuerpos de agua en azul, la vegetación en verde y el suelo desnudo, construcciones, etc., en magenta. En el caso de los cuerpos de agua, el índice más alto corresponde a azules más claros, las azules oscuros se relacionan principalmente con zonas anegadas y bañados, y el color magenta a sedimentos en suspensión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de los resultados derivados de la misión GRACE es posible detectar cambios de masas de hasta 1 cm en un área de 400 km², obteniendo así la tendencia y amplitud de las oscilaciones gravitatorias para una determinada época y zona. Las técnicas geodésicas espaciales miden deformaciones en la superficie de la Tierra, las cuales pueden ser relacionadas con la redistribución de masas (Beutler, 2004).

GRACE observa el ciclo hidrológico y permite monitorear el agua que se evapora hacia la atmósfera, el agua que se precipita en forma de lluvia o nieve, o el agua que se desplaza por la superficie en forma de ríos. Asimismo, es capaz de monitorear cambios en el espesor equivalente de agua continental con una precisión de 1,5 cm (Wahr et al., 2004).

En las imágenes mostradas en la Figura 8 se puede observar para la cuenca del Río de la Plata, la amplia zona de anegamiento en el área del Paraná medio en Septiembre de 2006. También se puede detectar en esta misma área la alta concentración de sedimentos en suspensión en Marzo del 2005 y Abril del 2006. Esto mismo ocurre en la imagen correspondiente a Octubre del 2004, pero concentrado en la zona donde se ubica el Complejo Hidroeléctrico Yaciretá Apipé. En la imagen de Septiembre de 2003 se puede observar la enorme cantidad de zonas anegadas, no solo en el Paraná medio, sino también en los Esteros del Iberá.

Analizando en detalle la zona de los Esteros del Iberá, observando el alto contraste entre el azul y el verde y el anegamiento del área circundante, se puede apreciar la mayor crecida en Octubre de 2004. En cambio, en este set de imágenes se detecta la bajante máxima en Abril de 2006, donde se reduce en gran medida el área cubierta por el agua, subsistiendo en azul algunas lagunas de carácter permanente. En el año 2004 se da un caso particular: la altura máxima del nivel del agua y la mínima se dan con sólo 3 meses de diferencia, esto se puede observar fácilmente en la imagen satelital.

Si comparamos los mismos períodos, pero en diferentes años, se puede detectar que para Septiembre/2003 versus Septiembre/2006, existen más zonas inundadas en la última fecha, y con niveles más altos de sedimentos en suspensión y suelos desnudos. Para Marzo/2005 versus Abril/2006, las áreas afectadas por anegamiento y sin vegetación son mayores en el segundo mes.

Estos resultados coinciden con los datos de Tabla II suministrados por Prefectura Naval Argentina. Por último, se puede observar en la Figura 9, la variación de la gravedad para el período en estudio en el área de la cuenca del Río Paraná, lo que evidencia un importante movimiento de masas de aguas superficiales y subterráneas en la zona.

CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas satelitales (gravimetría y teledetección) para el estudio de las variaciones de masas de agua resultó una herramienta eficiente y de gran utilidad para la

obtención de esta información. La metodología empleada para el tratamiento de la información resultó ser la adecuada. Los productos GRACE son de libre acceso y, tras un adecuado procesamiento, proveen resultados de alta confiabilidad. Por otro lado, la teledetección aplicada a la hidrología, supone un ahorro de tiempo, objetividad y fiabilidad en el estudio de los recursos hídricos de una región.

Los cambios mensuales de masas de agua derivados del procesamiento de la información suministrada por GRACE a través de cuatro centros de cómputo se ajustan entre sí de modo aceptable. En efecto, las diferencias en amplitud y fase en los ciclos anuales y semi-anuales resultan prácticamente nulas, con excepción de los resultados derivados de los modelos JPL, que resultan algo menores tanto en amplitud como en fase. Además, los periodos de crecientes y bajantes detectados a través de GRACE guardan estrecha relación con los obtenidos a partir del análisis de los datos de NOAA.

Se puede concluir en base a lo expuesto y para el período elegido, que con ambas metodologías se detectan las mayores crecidas en la cuenca del Río de la Plata ocurren durante la época primaveral, lo que posiblemente se vincula con las precipitaciones caídas aguas arriba en Brasil, la naciente del río. A partir del otoño, y durante el invierno, los caudales disminuyen en coincidencia con los meses de sequía. Las inundaciones son predominantes en la región, y el riesgo de inundación se amplifica ya que los caudales aumentan el efecto del incremento de las lluvias. En la zona de los Esteros del Iberá se detectan las bajantes máximas para los meses Marzo-Abril, y los picos de crecida ocurren en la época primaveral principalmente. En una próxima etapa, se compararán los resultados obtenidos a partir de gravimetría satelital e imágenes satelitales con datos climatológicos e hidrométricos in situ.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente soportado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (PICT 01590) y por la Universidad Nacional de Rosario (Proyecto ING XX)

REFERENCIAS

- Bettadpur, S., 2003. GRACE level-2 gravity field product user handbook. *CSR Publ. GR-03-01, Univ. of Texas, Austin, <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace>*.
- Beutler, G., 2004. Revolution in Geodesy and Surveying. FIG Article, July 2004, 19 pp.
- Chambers, D.P., J. Wahr, and R.S. Nerem, 2004. Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE. *Geophysical Research Letters*, 31, L13310.
- Chao, B. F., On inversion for mass distribution from global (time-variable) gravity field, *J. Geodynamics*, 39, 223-230, doi:10.1016/j.jog.2004.11.001, 2005.
- Chen JL, Rodell M, Wilson CR, Famiglietti JS, 2005. Low degree spherical harmonic influences on GRACE Water storage estimates. *Geophys Res Lett* 32(14):L14405.
- Chen JL, Wilson CR, Famiglietti JS, Rodell M, 2006. Attenuation effect on seasonal basin-scale water storage changes from GRACE time-variable gravity. *J. Geodesy*, DOI 10.1007/s00190-006-0104-2.
- Chuvieco E. , 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, N° 10: 39-48.
- Chuvieco E., 2002. Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Ariel Ciencia. 431 pp.

- Codignotto J.O. y R. A. Medina. 2005. Morfodinámica del Delta del Río Paraná y su Vinculación con el Cambio Climático. Actas XVI Congreso Geológico Argentino, CD-Room, Artículo n° 215, 8p. Actas (3): 651-656. La Plata
- Forsberg R., Reeh N. (2006). Mass change of the Greenland ice sheet from GRACE. Proc. First meeting of the International Gravity Field Service: Gravity Field of the Earth 2006, Springer Verlag.
- Gandia, S. y Meliá, J., 2005. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Ed. Ecir S.A. 288 pp. ISBN: 8470652508
- Klees, R., X. Liu, T. Wittwer, B. C. Gunter, E. A. Revtova, R. Tenzer, P. Ditmar, H. C. Winsemius, H. H. G. Savenije (2008). A Comparison of Global and Regional GRACE Models for Land Hydrology. Survey Geophysics 29 : 335-359. DOI 10.1007/s10712-008-9049-8.
- Lemoine J.M., Bruinsma S., Biancale R. (2008). 10-day gravity field solutions inferred from GRACE data. Proc. IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Earth Observation 2008.
- Lemoine, J.-M., Bruinsma, S., Loyer, S., Biancale, R., Marty, J.-C., Perosanz, F., Balmino, G., (2007). Temporal gravity field models inferred from GRACE data. Advances in Space Research 39 (2007) 1620-1629, doi:10.1016/j.asr.2007.03.062.
- Muzón, J., Von Ellenrieder, N., Pessacq, P., Lozano, F., Garré, A., Lambruschini, J., Ramos, L., Weigel, M. S., 2008. Odonata from Iberá Wetlands (Corrientes, Argentina). Rev. Soc. Entomol. Argent., 67 (1-2): 59-67.
- Puig, A., C. R. M. Baigún, P. G. Minotti, P. Kandus, R. Quintana, R. Vicari, R. Bo, N. Oldani, J.M. Nestler. 2008. Resource use in the Parana River Delta (Argentina): Moving away from an ecohydrological approach?. Ecohydrology and Hydrobiology. Lodz: University of Lodz, ISSN 1642-3593
- Baigú, C. R. M., A. Puig, P. G. Minotti, P. Kandus, R. Quintana, R. Vicari, R. Bo, N. Oldani, J.M. Nestler. (2008) Resource use in the Parana River Delta (Argentina): moving away from an ecohydrological approach?. *Ecohydrology and Hydrobiology* 8:2, 245-262
- Rodell M, Rowlands D, Klosko S, Lemoine F, Luthcke S, Chen JL, Famiglietti JS, Wilson CR, 2005. Ground water storage variability in the Mississippi River Basin and potential estimation using GRACE. Eos Trans AGU 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract H11G-06
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J. S., Nigro, J., Wilson, C. R., 2007. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. Hydrogeology Journal (2007) 15: 159–166 DOI 10.1007/s10040-006-0103-7
- Sandberg Sørensen, L., Forsberg R. (2008). Greenland Ice Sheet Mass Loss from GRACE data. Proc. IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Earth Observation, 2008. In Press.
- Santa Cruz, J. N., 2009. Sistema Acuífero Guaraní: El conocimiento hidrogeológico para su uso sostenible. Ciencia Hoy: 19 (112)
- Sasgen, I., Z. Martinec, and K. Fleming (2006), Wiener optimal filtering of GRACE data, Stud. Geophys. Geod., 50(4), 499–508.
- Seo, K.W., Wilson, C.R., 2005. Simulated estimation of hydrological loads from GRACE, J. GEODESY, Vol. 78, Is. 7-8, PP. 442-456.
- Shaw, A.G. P. and Vennel, R. 2000. A front –following algorithm for AVHRR SST Imagery. Remote Sensing of the Environment, 72: 317-327.

- Sobrinho, J. 1992. Teledetección. Ed. Univ. Valencia. 419 pp.
- Tapley, BD, Bettadpur, S, Ries, JC, Thompson, PF, Watkins, MM., 2004b. GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, JUL 23, VL 305, IS 5683.
- Tateshi, R., Ebatam, A., 2004. Analysis of phenological change patterns using 1982- 2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, 2287-2300.
- Vaz de Almeida F. G., 2009. Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: Aplicação na bacia Amazônica. Tesis de Doctorado en Ingeniería presentada en la Escuela Politécnica de la Universidad de San Pablo, Brasil.
- Wahr, J., Molenaar, M. and Bryan, F., 1998. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 103, 30205-20229.
- Wahr, J, Swenson, S, Zlotnicki, V, Velicogna, I., 2004. Time-variable gravity from GRACE: First results, *Geophysical Research Letters*, JUN 9, 2004, VL 31, IS 11, PP. 4.

Recibido: 5 de marzo de 2011

Aceptado: 21 de septiembre de 2011