

Estimación de las variaciones de almacenamiento de agua en los esteros del Iberá a partir de datos gravimétricos satelitales

Andrea Valladares¹, Luis Guarracino^{2,3}, Leticia Rodríguez⁴ y Luis Vives⁵

¹ Subsecretaría de Recursos Hídricos. Esmeralda 255, C1035ABE, CABA, Argentina.

² Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Paseo del Bosque s/n, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

⁴ Universidad Nacional del Litoral, Centro de Estudios Hidroambientales. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina.

⁵ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff", UNC-PBA-CIC. República de Italia 780, (7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: andrei.valladares@gmail.com

RESUMEN

Los Esteros del Iberá, provincia de Corrientes, Argentina, conforman un humedal de aproximadamente 12.900 km², donde la escasa densidad geográfica de los registros hidrométricos y piezométricos limita la aplicación de métodos convencionales para la estimación de las variaciones del almacenamiento de agua y las componentes del balance hídrico. La misión espacial Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) provee una novedosa técnica de cálculo basada en mediciones de las variaciones espacio-temporales del campo de gravedad terrestre a escala regional. El objetivo del presente trabajo es analizar la aplicabilidad de GRACE para estimar las variaciones de las reservas de agua en los esteros del Iberá. Se compararon series temporales de los datos de GRACE, convertidos a alturas equivalentes de agua, con series de alturas hidrométricas en lagunas de la región. La correlación de las series muestra un buen ajuste, con un coeficiente de correlación lineal con valores entre 0,77 y 0,87.

Palabras clave: Esteros del Iberá, almacenamiento de agua, GRACE y monitoreo remoto.

ABSTRACT

The Ibera wetlands, Corrientes Province, Argentina, extend for approximately 12,900 km². Reduced areal density of hydrometric and piezometric records limits the application of conventional methods for estimating changes in water storage and water balance components. The space mission Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) provides an inventive calculation technique based on measurements of the spatial/temporal variations of the Earth's gravity field at regional scale. The aim of this paper is to analyse the applicability of GRACE to estimate water storage changes in the Iberá wetlands. In order to analyse the validity of this technique time series of GRACE data, converted to equivalent water heights, were compared with hydrometric heights series recorded at lagoons within the wetland. The correlation between both types of data shows a good fit, with a linear correlation coefficient between 0.77 and 0.87.

Keywords: Ibera wetlands, water storage, geophysical methods and remote monitoring.

Introducción

El objetivo del presente trabajo es analizar la aplicabilidad y resolución espacial de una técnica satelital basada en mediciones de gravedad para estimar las variaciones de las reservas de agua en la región hídrica de los esteros del Iberá, que está emplazada en la provincia de Corrientes, República Argentina (Figura 1). Se entiende por región hídrica superficial al territorio geográfico caracterizado por un tipo de escurrimiento superficial

homogéneo a través del cual es impracticable delimitar cuencas o subcuencas hídricas a la escala de trabajo utilizada (Ferreiro, 1983). La región hídrica del Iberá está conformada por una red de arroyos, esteros, lagunas y bañados interconectados en un área de muy baja pendiente con sentido de escurrimiento NE-SO que desagua en el río Corriente.

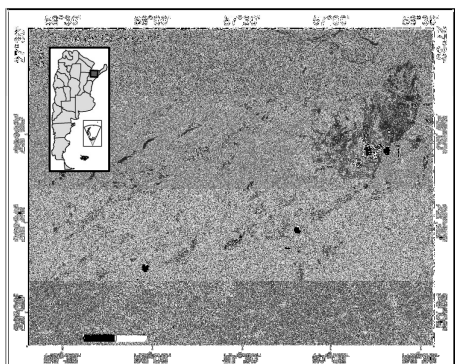


Figura 1. Esteros del Iberá. Estaciones hidrométricas: (1) Galarza, (2) Iberá y (3) Rincón del Diablo.

Los esteros del Iberá forman parte de un macrosistema mayor que se extiende desde la región de Ñeembucú (Paraguay) al norte, hasta la confluencia de los ríos Corriente y Paraná al sur, incorporando también el NO de la provincia de Corrientes. La superficie aproximada del humedal en territorio argentino es de 12.900 km² (Neiff, 2006).

El clima es subtropical húmedo. Según Neiff (2006) la temperatura máxima media se halla entre los 27 y 28 °C (enero y febrero) y la mínima media entre 16 y 17 °C (junio y julio). La precipitación anual en la estación de Carlos Pellegrini, período 1972 a 2012, tiene una media de 1384 mm y a partir del año 2003 se observan valores inferiores (Figura 2). Las precipitaciones sobre el sistema hídrico del Iberá decrecen en sentido NE-SO.

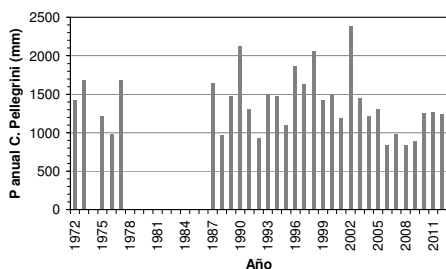


Figura 2. Precipitación anual en C. Pellegrini.

La baja densidad geográfica de registros hidrométricos y la casi inexistencia de registros piezométricos limitan severamente la aplicación de métodos convencionales para la estimación de las variaciones del almacenamiento de agua y las componentes del balance hídrico en los

esteros del Iberá. Una alternativa para la cuantificación de estas variaciones es la utilización de una técnica satelital que permita una estimación continua en el tiempo con una cobertura espacial homogénea.

La misión espacial Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) es un proyecto conjunto de la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) lanzado en el año 2002. El objetivo de esta misión es medir variaciones espacio-temporales del campo de gravedad terrestre que pueden ser utilizadas para estimar las variaciones de las reservas de agua.

La redistribución de masa en la Tierra provoca variaciones del campo de gravedad terrestre que pueden ser detectadas por GRACE (Tapley et al., 2004). Cuando se consideran escalas temporales menores a un año, las variaciones del campo de gravedad se pueden atribuir a variaciones en el almacenamiento integrado de agua (superficial y subterránea). Los datos de GRACE tienen una resolución espacial de aproximadamente 400 km y su resolución temporal es de 10 días.

Las variaciones de gravedad detectadas por los satélites pueden convertirse en alturas equivalentes de agua mediante el procedimiento descrito en el trabajo de Wahr et al. (1998). Esta conversión en altura de agua equivalente es realizada por diferentes centros internacionales, tales como el Grupo de Investigación Aeroespacial de Toulouse, Francia.

Con el fin de analizar la aplicabilidad de esta técnica en la región de los esteros del Iberá, se comparan las series temporales de variaciones de altura equivalente con datos de estaciones hidrométricas disponibles en lagunas.

Rodell *et al.* (2007) han utilizado esta técnica en la cuenca del río Mississippi para la estimación de las variaciones de almacenamiento subterráneo con resultados exitosos en subcuencas con una superficie mayor a 500.000 km². Cesanelli et al. (2011) han estimado la evapotranspiración mensual en la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires, incorporando la información de GRACE a la ecuación de balance hídrico. Por último, además de evaluar su performance para estimar variaciones de reservas de agua en lagunas, la información de GRACE será utilizada para validar los resultados de un balance hídrico integral aplicado a todos los esteros del Iberá actualmente en desarrollo (Valladares, 2013).

Materiales y métodos

En líneas generales las variaciones del almacenamiento de agua detectadas por

GRACE (ΔS) pueden expresarse del siguiente modo (Rodell et al., 2007):

$$\Delta S = \Delta S_{SUP} + \Delta S_{SUBT} + \Delta S_{ZNS} + \Delta S_{HIELO} \quad (1)$$

donde ΔS_{SUP} , ΔS_{SUBT} , ΔS_{ZNS} , y ΔS_{HIELO} refieren a la variación en el almacenamiento superficial, subterráneo, en la zona no saturada -ZNS- y en forma de hielo y/o nieve, respectivamente. Todos los términos de la ecuación (1) deben interpretarse como variaciones respecto a un valor medio estacionario para todo el período de análisis.

En la región bajo estudio, el último término de la Ecuación (1) es nulo. Por otra parte, dado que los niveles freáticos son poco profundos el almacenamiento de agua en la ZNS es poco significativo y las variaciones con respecto a un perfil de humedad estacionario resultan despreciables. Por ello, el término ΔS_{ZNS} también fue considerado como nulo (Guarracino et al., 2011). A partir de estas consideraciones la Ecuación (1) puede ser escrita de la siguiente manera para la región del Iberá.

$$\Delta S = \Delta S_{SUP} + \Delta S_{SUBT} \quad (2)$$

Para cumplir con el objetivo planteado se seleccionaron tres sitios distribuidos en distintos sectores de la cuenca en los que se disponía de series de altura hidrométrica en cuerpos de agua (Figura 1). Las tres lagunas, Galarza, Iberá y Rincón del Diablo, se ubican en el borde oriental de los esteros, en el sector norte, central y sur, respectivamente. En la Tabla 1 se detalla el lugar, la entidad hídrica en que se encuentra la escala hidrométrica (laguna o canal de acceso a la misma) y período de análisis.

Tabla 1. Detalle de los sitios de análisis.

Id	Entidad Hídrica/ Lugar	Período
1	Laguna Galarza	06/09/2002-
	(canal acceso)/ Paraje Galarza	31/01/2010
2	Laguna Iberá	29/07/2002-
	Carlos Pellegrini	31/12/2011
3	Laguna Sucia (canal acceso)/ Rincón	29/07/2002-
	del Diablo	08/02/2010

El intervalo de lectura en las diferentes escalas hidrométricas utilizadas no es constante. En ocasiones se contó con varios valores diarios, aunque no siempre el mismo número de registros por día, y en otras, con un

único valor diario. En todos los casos se calculó un valor medio diario con las alturas que estuvieran disponibles.

Las estaciones ubicadas en Galarza y Rincón del Diablo pertenecen a la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) y la ubicada sobre la laguna Iberá a la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRH). La serie correspondiente a la SsRH fue obtenida de la página Web <http://www.hidricosargentina.gov.ar/RedBasica.html>.

Las variaciones en las reservas de agua fueron calculadas a partir de los datos de altura equivalente (ΔH_{eq}) de agua estimados por el Grupo de Investigación Aeroespacial de Toulouse, Francia (Bruinsma et al., 2010). Estos datos derivados de la información relevada por la Misión GRACE representan valores medios cada 10 días referidos a un valor estacionario de referencia. El error medio asociado a los datos ha sido estimado entre 11 y 18 mm (Swenson et al., 2006; Cesanelli y Guarracino, 2011). Las series de altura equivalente corresponden al mismo sitio donde se encuentra la estación de medición de campo y fueron obtenidas de <http://grgs.omp.obs-mip.fr/index.php/eng/>.

Para realizar la correlación de las series se uniformizaron los datos satelitales y de campo para cada estación de medición. A cada una de las series temporales de la misión GRACE se le restó su valor medio para obtener de este modo variaciones respecto a un estado estacionario. A continuación se dividió cada dato por la cantidad de días del intervalo (10 días), de este modo se obtuvieron valores diarios promedios para los intervalos de 10 días.

El tratamiento de los datos de campo consistió en la estimación de los valores medios diarios para intervalos de 10 días, en coincidencia con los intervalos correspondientes a los datos de GRACE. En este caso el error asociado a los datos se encuentra en el rango de 1 a 10 cm dependiendo del tipo de instrumental y las condiciones en que se realizaron las mediciones. De manera análoga al tratamiento de los datos satelitales, se restó el promedio de cada serie a los datos de campo quedando los mismos expresados como variación de altura hidrométrica (ΔH) respecto al nivel medio de la serie (Figura 3). Se observa que la variación de altura hidrométrica en las lagunas de la región centro-norte es generalmente sincrónica, tanto en aguas altas como bajas, y homogénea. Además, se aprecia un pequeño retraso del momento de ocurrencia de algunos picos en el sentido del escurrimiento. En algunos intervalos el nivel de

la laguna en Rincón del Diablo presenta picos importantes así como un desfase hacia el final del período de análisis que la distinguen del

comportamiento de las dos lagunas ubicadas aguas arriba.

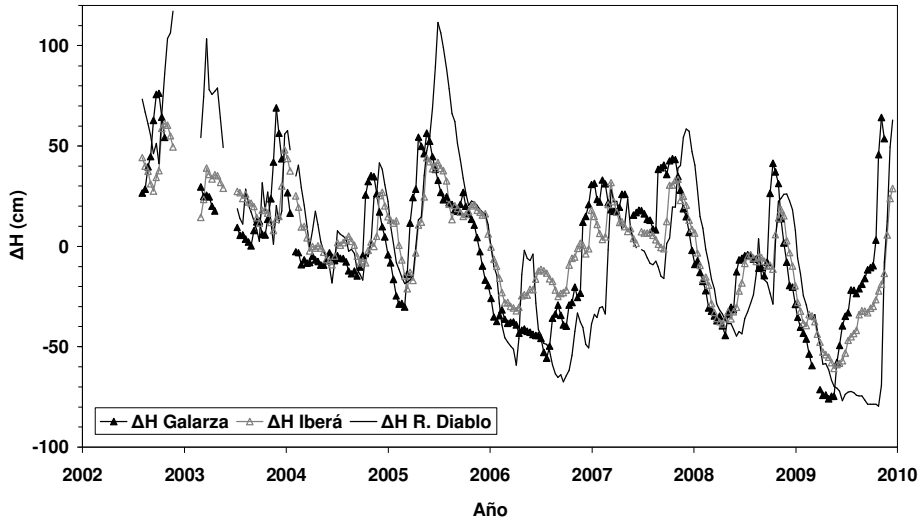


Figura 3. Variación media de la altura hidrométrica para intervalos de 10 días en Galarza, Iberá y Rincón del Diablo.

Resultados

En la Figura 4 se comparan las variaciones de ΔH observada y de ΔH_{eq} de la laguna Galarza. Se observa que la serie de datos satelitales tiene una amplitud menor pero presenta oscilaciones sincrónicas respecto a la serie estimada a partir de los datos de campo.

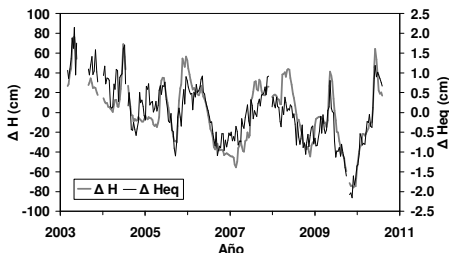


Figura 4. Variaciones de altura hidrométrica y de altura equivalente en la laguna Galarza.

Dado que se trata de series temporales que describen variables hidrológicas distintas, se analizará su grado de dependencia mediante el

cálculo del coeficiente de correlación lineal que resulta independiente de las escalas de medición de ambas series.

La correlación entre ambas series puede considerarse como muy buena ya que presenta un coeficiente de correlación lineal (R) de 0,84 (Figura 5). Resulta importante destacar que la serie de GRACE representa el fenómeno a escala regional y que se la está contrastando con datos hidrométricos puntuales.

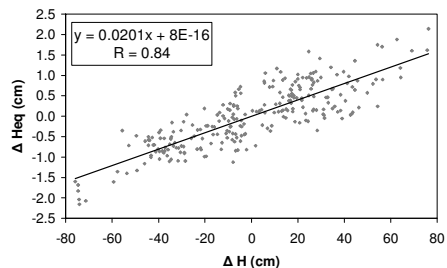


Figura 5. Dispersión de datos de campo y satelitales en la laguna Galarza.

El ajuste entre las series temporales pertenecientes a la laguna Iberá también presenta una buena correspondencia entre las variaciones de altura hidrométrica y de altura equivalente de agua, siendo su coeficiente de correlación lineal 0,87 (Figuras 6 y 7).

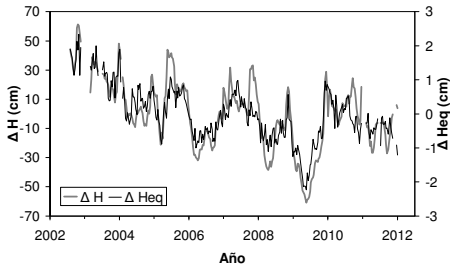


Figura 6. Variaciones de altura hidrométrica y de altura equivalente en la laguna Iberá.

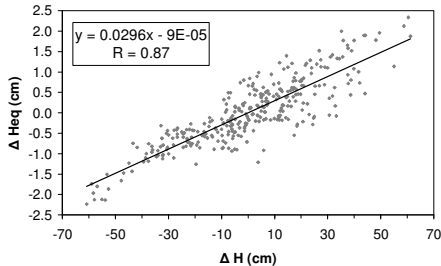


Figura 7. Dispersión de datos de campo y satelitales en la laguna Iberá.

Por último, se realizó el análisis para la estación Rincón del Diablo, ubicada aguas abajo de las anteriores. En este caso el ajuste entre las series correspondientes a las variaciones de los datos satelitales y de campo no es homogéneo para todo el período de análisis (Figura 8).

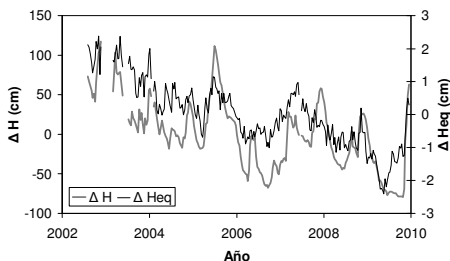


Figura 8. Variaciones de altura hidrométrica y de altura equivalente en Rincón del Diablo.

Se observa un comportamiento muy similar de las curvas en los años 2003, 2005 y 2009. Sin embargo, a mediados del 2006 el nivel de la laguna presenta un pico que no se distingue en la serie de altura equivalente. Estas discrepancias, asumiendo que los datos hidrométricos son confiables, no implican un error del método sino que evidencian un apartamiento de las condiciones locales (datos hidrométricos) de las regionales (datos de GRACE). A pesar de ello, el coeficiente de correlación lineal entre ambas series es bueno con un valor de 0,77, observándose una amplia dispersión de los valores analizados (Figura 9).

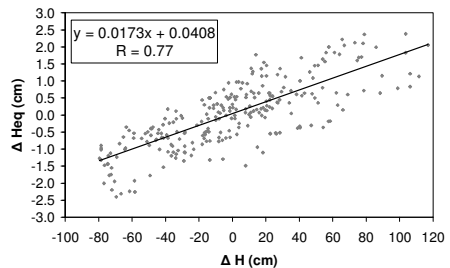


Figura 9. Dispersión de datos de campo y satelitales en Rincón del Diablo.

Conclusiones

El análisis realizado en los esteros del Iberá ha señalado un muy buen ajuste entre las variaciones de nivel hidrométrico en las lagunas y la altura equivalente de agua calculada a partir de datos gravimétricos satelitales de la misión GRACE.

Ese ajuste es especialmente bueno para las lagunas Galarza e Iberá, con un importante sincronismo en las variaciones observadas y con coeficientes de correlación lineal entre los datos satelitales y de campo de 0,84 y 0,87, respectivamente. La estación de Rincón del Diablo presenta una buena correlación entre los datos satelitales y de campo (0,77); sin embargo, el ajuste entre ambas series se deteriora en algunos intervalos del período de análisis mostrando una gran dispersión.

Los resultados obtenidos permiten concluir que los datos satelitales son sensibles a las variaciones de almacenamiento observadas en los cuerpos de agua superficial y que pueden ser utilizados para la caracterización hidrológica regional de los esteros, por ejemplo en sitios de interés donde se carezca de datos. La misión GRACE es considerada la única técnica satelital

que permite el monitoreo de las reservas de agua a escala global (Rodell et al., 2007). La principal limitación de la técnica es que no discrimina el origen de estas variaciones (superficial o subterráneo) y que su resolución es de tipo regional. En este sentido, la buena correlación obtenida entre las variaciones de nivel de las distintas lagunas y los datos de GRACE permitiría concluir que la región de los esteros se comporta como un único sistema hidrológico interconectado donde las variaciones observadas localmente se corresponden con las mediciones de tipo regional provistas por los satélites. Por otra parte, si se tiene en cuenta la ecuación (2), se puede concluir que o bien la contribución de las aguas subterráneas es poco significativa o bien sus variaciones acompañan a las variaciones de las lagunas sumándose los efectos.

Agradecimientos

Se agradece el aporte de información hidrométrica a la Subsecretaría de Recursos Hídricos y a la Entidad Binacional Yacretá.

Referencias

- Bruinsma S., Lemoine, J.-M., Biancale, R., y Valès N., 2010. CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation. *Advances in Space Research* 45: 587–601.
- Cesanelli, A. y Guarracino, L., 2011. Estimation of regional evapotranspiration in the extended Salado Basin (Argentina) from satellite gravity measurements. *Hydrogeology Journal*, 19 (3) 629-639.
- Ferreiro, V., 1983. El mapa hidrogeomorfológico. Su utilización en el estudio de los recursos hídricos superficiales en regiones con insuficiente información de base. La cuenca hídrica superficial del río Bermejo. *Coloquio de Hidrología de las grandes llanuras*, I: 157-189. Olavarría, Buenos Aires.
- Guarracino, L.; Tocho, C. y Varni, M., 2011. Estimación del coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre a partir de datos gravimétricos satelitales. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol. X: 327- 330. Salamanca, España.
- Neiff, J., 2006. Situación ambiental en la Ecorregión del Iberá. En: A. Brown, U. Martínez Ortiz, M. Acerbi y J. Corcuera (Eds.), La situación ambiental argentina 2005. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. 176–194.
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H. Famiglietti, J.S., Nigro J., y Wilson C.R., 2007. Estimating

- groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15: 159-166.
- Swenson, S., Yeh, P., Wahr, J., y Famiglietti, J., 2006. A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois. *Geophys. Res. Lett.* 33:L16401.doi: 10.1029/2006GL026962.
- Tapley B.D., Bettadpur S., Ries J.C., Thompson P.F., Watkins M.M., 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science* 305:503-505.
- Valladares A.I. 2013. Balance Hídrico en los esteros del Iberá., UNLPam (Tesis de maestría en ejecución).
- Wahr J., Molenaar M., Bryan F., 1998. Time-variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 1003:30205-30230.