

# Avances más recientes sobre la aplicación de la altimetría radar por satélite en hidrología. Caso de la cuenca amazónica

## The most recent satellite radar altimetry applications in hydrology. The case of the Amazon basin

Juan Gabriel León Hernández<sup>1</sup>, Efraín Antonio Domínguez Calle<sup>2</sup> y Guillermo Duque Nivia<sup>3</sup>

### RESUMEN

El presente artículo sintetiza los principios de la altimetría radar por satélite y presenta las aplicaciones más relevantes que dicha tecnología ha aportado al estudio de aguas superficiales continentales bajo un dominio que se comienza a conocer como hidrología espacial. Dentro de estos, uno de los más importantes tiene que ver con la generación de estaciones virtuales (intersección entre el barrido del satélite y un cuerpo de agua: río, lago, mar interior). Dichas estaciones están siendo actualmente utilizadas como mecanismo de apoyo para el monitoreo hidrológico, especialmente, en lo referente a la densificación de las redes hidrométricas instaladas *insitu*. Adicionalmente, estas pueden ser caracterizadas con datos provenientes del espacio de la misma manera en que son caracterizadas las estaciones *insitu* procurando información de carácter hidráulico (pendiente del fondo del cauce, profundidad del flujo cero, coeficiente de Manning, entre otros) que hasta el momento sólo podía ser deducida a partir de mediciones directas en campo.

**Palabras clave:** altimetría radar, estaciones virtuales, curvas de gasto, modelación hidrológica, cuenca amazónica.

### ABSTRACT

This paper summarises the principles of satellite radar altimetry and presents this technology's most important applications for analysing continental surface water within an area known as spatial hydrology; generating virtual gauging stations is one of its most important applications (intersection between satellite tracking and bodies of water: rivers, lakes, inland seas). These stations are currently being used for supporting hydrological monitoring, especially in increasing in-situ gauging station network density. Such spatial data-based virtual stations could thus be characterised in the same way as in-situ gauging stations producing hydraulic data (bed slope, zero flow depth, Manning coefficient, etc) which, until now, could only be directly obtained from in-situ measurements.

**Keywords:** radar altimetry, virtual gauging station, rating curve, hydrological modelling, Amazon basin.

Recibido: mayo 15 de 2008

Aceptado: noviembre 4 de 2008

### Introducción

Las primeras evaluaciones de hidrosistemas continentales mediante la teledetección espacial han sido realizadas a partir de sensores ópticos, estimando los cambios de los espejos de agua basándose en la comparación de imágenes tomadas en distintos años (Birkett, 2000; Romero, 2006; Muller *et al.*, 1993). Paralelamente a la utilización de los sensores ópticos, a partir de los años ochenta, la altimetría radar por satélite, desarrollada en un principio para el estudio de las superficies oceánicas, ha encontrado rápidamente su campo de acción en el seguimiento de las variaciones de los niveles de grandes reservorios continentales tales como los Grandes Lagos de América del Norte (Brooks, 1982; Morris y Gill, 1994a; Morris y Gill, 1994b), los Lagos Africanos (Mercier *et al.*, 2002), mares interiores (Ponchaut y Caznave, 1998; Birkett, 1995a) y grandes ríos como el Amazonas (De Oliveira Campos *et al.*, 2001; Mercier *et al.*, 2002; Birkett *et al.*, 2002; Frappart *et al.*,

2006; Leon *et al.*, 2006a), La Plata (Maheu *et al.*, 2002) y río Ob en Rusia (Kouraev *et al.*, 2004), entre otros.

Cada vez más sofisticadas, las últimas generaciones de radar altímetro, como aquellos embarcadas en los satélites Topex-Poseidon (T/P) (Birkett, 1995b), ERS (Francis, 1993), Jason-1 (Desai y Vincent, 2003) y más recientemente Envisat (Benveniste *et al.*, 2007) y Cryosat (Calmant y Seyler, 2006), alcanzan niveles de precisión del orden de algunos centímetros sobre las medidas de variación de la altura de los grandes cuerpos de agua continentales. Niveles de precisión de este orden han motivado a los hidrólogos a hacer uso de los datos altimétricos como complemento a los registros tomados *insitu* para el desarrollo de modelos de tránsito hidrológico, especialmente sobre aquellas zonas de difícil acceso como la cuenca del Amazonas, donde la instalación y seguimiento continuo de estaciones *insitu* es cada vez más difícil.

Este artículo tiene por objetivo principal sintetizar los principios de la altimetría por satélite y mostrar los aportes más recientes alcan-

<sup>1</sup> Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc., en Ciencias del Agua en Medio Ambiente Continental, Universidad de Montpellier II, Francia. Ph.D., en Ciencias de la Tierra, del Medio Ambiente y del Espacio, Universidad de Toulouse III, Francia. Profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Valle. jgleonh@palmira.unal.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero hidrológico, M.Sc., en Ecología Hidrometeorológica y Ph.D., en Hidrología, Russian State Hydrometeorological University, Rusia. Profesor asociado, Departamento de Ecología y Territorio. Facultad de Estudios ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. e.dominguez@javeriana.edu.co

<sup>3</sup> Biólogo marino, Universidad del Valle, Colombia. Ph.D., en Oceanografía y Ciencias Costeras, Louisiana State University, Estados Unidos. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. gduquen@unal.edu.co

zados en el dominio de la hidrología espacial, mediante la utilización conjunta de datos *insitu* y datos altimétricos registrados por las misiones T/P y Envisat. Inicialmente se hace una descripción detallada de las bases de dicha tecnología y la forma como esta ha encontrado su aplicación en dominio continental señalando de manera específica sus principales aportes en hidrología.

## Principio de la altimetría satelital

El principio de la altimetría satelital consiste en un radar altímetro embarcado a bordo de un satélite. Este radar emite una señal vertical (pulsos microondas) de alta frecuencia (cerca de 1 Hz) en dirección de la superficie terrestre y recibe un eco reflejado por una superficie de agua. El análisis de este eco permite extraer una medida muy precisa del tiempo que toma la onda desde que parte del satélite, es reflejada sobre la superficie del agua y retorna a su origen. Este tiempo es transformado en distancia al multiplicar su valor por la velocidad de la luz. Esa distancia, conocida también como medida altimétrica, es interpretada entonces como la altura que separa el satélite de la superficie de agua reflejada (Aviso, 1996). Adicionalmente, si se conoce con precisión la posición del satélite respecto a un referencia terrestre conocida, generalmente el elipsoide terrestre WGS84 (Hooijberg, 1997), es posible estimar, por diferencia entre esta posición del satélite y la medida altimétrica, la altitud del nivel del agua reflejada respecto al elipsoide de referencia.

## La altimetría satelital en dominio continental

En un principio los radares altimétricos fueron concebidos para observar la superficie de los océanos. Desde el punto de vista de la medida altimétrica, el medio oceánico puede ser considerado como homogéneo, es decir, que el eco es reflejado únicamente por agua. En los continentes, debido a que el buen funcionamiento del radar es afectado por la topografía, la vegetación, las zonas cubiertas de hielo y el ancho de las secciones transversales medidas, esta homogeneidad se presenta sólo en grandes espejos de agua tales como grandes lagos o ríos con anchos transversales superiores a 1 km. Estos factores pueden introducir errores de varios metros en la medida final (Frappart, 2006; Bjerklie, 2003; Smith, 1998). En este sentido, la principal diferencia entre las mediciones oceánicas y las continentales se encuentra en la cantidad de los datos registrados que son realmente explotables. En efecto, en medio continental la densidad de los datos registrados es tan baja que resulta necesario establecer metodologías que permitan recuperar el mayor número de datos potencialmente precisos (Als Dorf *et al.*, 2003; Birkett *et al.*, (1999)). A pesar de estas restricciones varios estudios han probado el potencial de la altimetría radar para el estudio de las variaciones del nivel del agua en cuerpos continentales. Un buen ejemplo de esto está representado en los Grandes Lagos de América del Norte, los cuales constituyeron las primeras zonas de estudio (Créaux y Birkett, 2006; Clague *et al.*, 2006). Dicha zona fue analizada en un principio con el lanzamiento de Seasat en el año de 1978, seguido por Geosat entre los años 1986 y 1989 y finalmente T/P de 1992 a 2001. Sobre dicha zona las observaciones son de muy buena calidad gracias a que las condiciones de medición son muy similares a las condiciones del medio oceánico. Cudlip *et al.* (1992) usaron información altimétrica de Seasat para determinar la pendiente superficial del Amazonas a partir de 32 trazas satelitales que atraviesan el río con una repetitividad de 18 días en julio de 1978. En este caso, la precisión estimada por los autores fue entre  $\pm 10$  cm y  $\pm 20$  cm. Birkett (1994) presenta las ventajas para el monitoreo de grandes lagos empleando técnicas de altimetrías radar. Birkett *et al.* (2002) publicaron se-

ries temporales de las fluctuaciones de los niveles del agua basándose en datos de T/P entre los años 1992 a 1999, mostrando rangos de variación entre algunas decenas de centímetro y varios metros (media de 1.1 m rms). Cazenave *et al.* (1997) presentan un estudio detallado de las variaciones de niveles del mar Caspio usando datos T/P. Delmas (2001) utiliza datos de la misma misión pero aplicados a la cuenca del Congo. Mercier (2001) presenta los primeros resultados de monitoreo de variaciones de niveles de agua sobre la cuenca amazónica utilizando datos de T/P. Frappart *et al.* (2006) estiman volúmenes de zonas de inundación amazónicas por combinación de altimetría radar, imágenes satelitales y registros *insitu*. Leon *et al.*, (2006a; 2006b) presentan una metodología para la estimación de la pendiente media del fondo, y en general, la caracterización hidráulica de diferentes secciones transversales de los principales ríos de la Amazonía brasilera y colombiana mediante la utilización conjunta de datos altimétricos de las misiones T/P y Envisat y registros *insitu*. Estos son solo algunos ejemplos entre muchos otros (Koblinsky *et al.*, 1993; Kosuth y Cazenave, 2002; Coe y Birkett, 2003; Berry y Pinnock, 2003; Seyler *et al.* 2004) de aplicaciones de esta tecnología en aguas continentales.

## Descripción de algunas aplicaciones de las medidas altimétricas en hidrología

### Las estaciones virtuales y series temporales altimétricas

En el dominio de la hidrología espacial se considera como una estación virtual a toda aquella intersección que pueda existir entre una traza satelital y un plano de agua continental (un río, un lago, un mar interior, una zona de inundación...) (figura 1) y de la cual es posible deducir una serie temporal representando la variación de los niveles de agua de dichos planos. En consecuencia, la información hidrológica deducida para cada una de estas estaciones virtuales corresponde a la variación de los niveles superficiales del plano de agua en el tiempo referenciados sobre una misma superficie (Figura 2). Dicha superficie corresponde al elipsoide terrestre WGS84 (Gumbrecht y McCarthy, 2001). En función de la calidad y cantidad de los datos, estas representaciones temporales servirán para el análisis del comportamiento hidrológico de los sistemas a estudiar. Por ejemplo, una serie temporal obtenida a partir de datos T/P sobre la sección de la Figura 1 puede permitir un análisis de aproximadamente 10 ciclos hidrológicos de la sección que representa (Figura 2).

Con el fin de minimizar el número de medidas contaminadas sobre las series altimétricas existen tres métodos que ofrecen buenos resultados: selección geográfica de la estación virtual, filtraje de los datos y comparación de la serie altimétrica con una serie (cotas o caudales) de registros *insitu* (Leon *et al.*, 2006a). El primer método consiste en seleccionar los datos de la estación virtual basándose en una imagen satelital debidamente georreferenciada (Figura 1). Esto permite recuperar con mayor precisión las medidas que se encuentran justo sobre el plano de agua evitando la selección de medidas falsas provenientes de planos aledaños y que no pertenecen al plano de interés. Sin embargo, es posible que aun con una selección muy precisa sobre una imagen satelital queden algunas medidas falsas dentro del conjunto de datos. Es por esto que resulta necesario filtrar dicho conjunto. Un filtro consiste en tomar una medida estadística, como la desviación estándar o la mediana (Frappart *et al.*, 2006) por ejemplo, y eliminar aquellos datos que sobrepasen el límite impuesto en base a tal medida estadística.

Finalmente, como otra forma de eliminación de medidas contaminadas pero también como de validación de los datos altimétricos, es recomendable comparar las series obtenidas con series tempo-

rales de cotas o caudales registradas *insitu*, la Figura 3 es un ejemplo de este tipo de validación, donde se han superpuesto los datos de una estación virtual ENVISAT sobre la serie temporal de cotas *insitu* de la estación hidrométrica de Sao Felipe, de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), sobre el río Negro. Ambas estaciones se ubican espacialmente sobre el mismo punto.

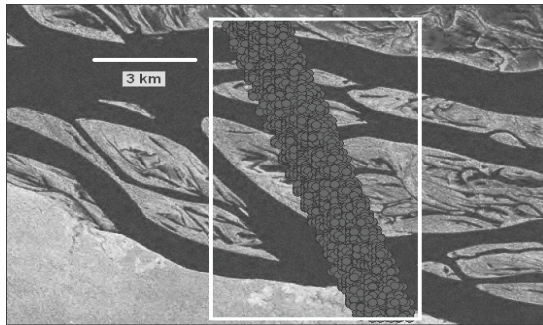


Figura 1. Ejemplo de selección de una estación virtual. Traza T/P-76 que corta una sección del río Negro (Amazonía brasileña). Cada punto es una medida altimétrica que representa el nivel instantáneo del agua sobre el elipsoide terrestre. (Seyler *et al.*, 2006).

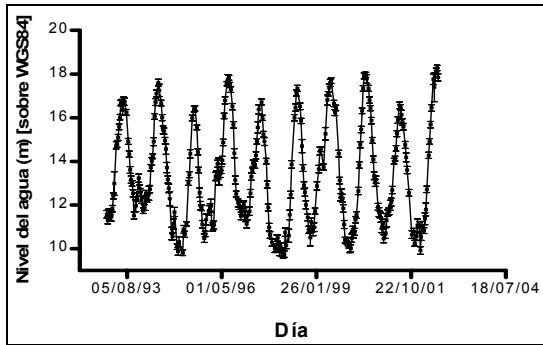


Figura 2. Representación de la serie temporal de las variaciones de los niveles del agua a partir de las medidas altimétricas de la Figura 1. Nótese las barras de error inferiores a 20 cm en promedio.

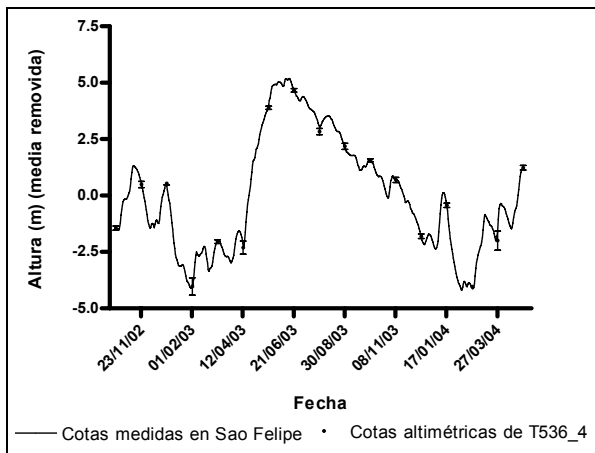


Figura 3. Comparación de los datos de una estación virtual Envisat (puntos negros) con la serie temporal de cotas de la estación de Sao Felipe (línea continua) sobre el río Negro. RMS < 12 cm (Leon *et al.* (2006a).

En el caso anterior, la validación es rápida y directa gracias a que la estación virtual se encuentra justo sobre la estación hidrológica. Sin embargo, esta situación no es muy frecuente, especialmente en zonas poco instrumentadas como la cuenca Amazónica. En este caso resulta necesaria la aplicación de modelos hidrológicos que

permitan la propagación de los caudales/cotas desde las estaciones *insitu* hasta las estaciones virtuales. Por ejemplo, Leon *et al.* (2007) utilizaron el modelo de Muskingum-Cunge para transitar los caudales de la cuenca alta del Río Negro, lo que permitió la obtención de series temporales de caudales a lo largo del curso principal del río, especialmente sobre estaciones virtuales T/P y Envisat. Gracias a esta propagación de los registros *insitu* fue posible comparar las tendencias de la serie de caudales respecto a la serie altimétrica.

**Caracterización hidráulica de las estaciones virtuales**

La relación matemática altura/caudal o curva de calibración de una estación hidrométrica, en la mayoría de los casos, es obtenida al relacionar medidas de la altura del agua o cotas y el caudal correspondiente a las mismas. De manera general, esta relación se expresa en forma de ley potencial de la manera siguiente (Rantz *et al.* 1982):

$$Q_t = a(H - z)^b \quad (1)$$

Donde  $Q_t$  es el caudal y  $(H-z)$ , es la profundidad del agua en el momento  $t$ . Particularmente,  $H$  corresponde a la altura de la superficie del agua (cota) y  $z$  es la altura del flujo cero. Los coeficientes  $a$  y  $b$  contienen información sobre las características físicas de la sección considerada (Rantz *et al.*, 1982). Ahora, tal como se ha expuesto en la secciones precedentes, la altura del nivel del agua medida desde el espacio es tomada respecto a un elipsoide de referencia, generalmente el WGS84, y no desde el fondo del cauce mismo. Esto significa que  $H$  en Ecuación(1) es el nivel del agua obtenido por altimetría radar en el momento  $t$ ; y  $z$  deberá ser por consecuencia la altura que existe entre el fondo del cauce y el elipsoide de referencia. Partiendo de la base de que  $Q$  y  $H$  en Ecuación(1) pueden ser valores conocidos en cada momento  $t$ , el problema consiste en encontrar entonces el valor de  $z$  que represente la altura entre el flujo cero y el elipsoide de referencia, único para cada  $t$ . De esta manera resultará posible encontrar la relación entre  $Q$  y  $(H-z)$  que permita deducir los coeficientes  $a$  y  $b$  presentados en Ecuación(1). Leon *et al.* (2006a) desarrollaron una metodología que permite estimar un fondo equivalente del cauce con una precisión inferior al 20%, la cual es bastante aceptable si se tiene en cuenta que los fondos equivalentes de los grandes cauces naturales medidos en campo (Seyler, 2005), con complejas formas de sección transversal, presentan rms cercanos a  $\pm 7$  m. La Figura 4a es el ejemplo de una sección transversal de una estación virtual sobre el río Negro medida con sonda acústica a efecto Doppler (ADCP), sobre la cual es posible observar el fondo equivalente medido *insitu* y el fondo equivalente estimado por la metodología propuesta por Leon *et al.* (2006a). Una vez este fondo equivalente es calculado, es posible deducir la curva de gasto para la sección considerada (estación virtual) usando datos de caudal *insitu* y alturas de los niveles del agua medidas desde el espacio (Figura 4b).

**Estimación de pendientes de la superficie libre de los ríos y del fondo del cauce**

Retomando el objetivo básico de la altimetría radar por satélite: medir la altura de la superficie libre del agua en un momento dado, podemos deducir que, si conocemos dicha altura para dos o más estaciones virtuales sobre un mismo cauce, al mismo momento, resulta posible entonces estimar la diferencia de altura del nivel del agua entre una estación y otra, o mejor, estimar la pendiente de la superficie libre que existe entre dos o más estaciones virtuales. La Figura 5 es un ejemplo de los perfiles que se pueden obtener en diferentes épocas del año. La Figura presenta las pendientes superficiales de las épocas de invierno y verano del 2003 y 2004 estimadas a partir de datos Envisat sobre el curso principal

del río Negro, desde su fuente (unos kilómetros antes de la estación del Cucui) hasta la estación de Serrinha. Por otro lado, la metodología desarrollada por Leon *et al.* (2006a) da lugar a la posibilidad de estimar la pendiente del fondo del cauce entre dos o más estaciones virtuales. Esta información, que hasta el momento era posible de obtener únicamente a partir de medidas de campo, es una variable indispensable para el desarrollo de modelos hidrodinámicos que generalmente debían considerar como aproximación la pendiente de la superficie libre.

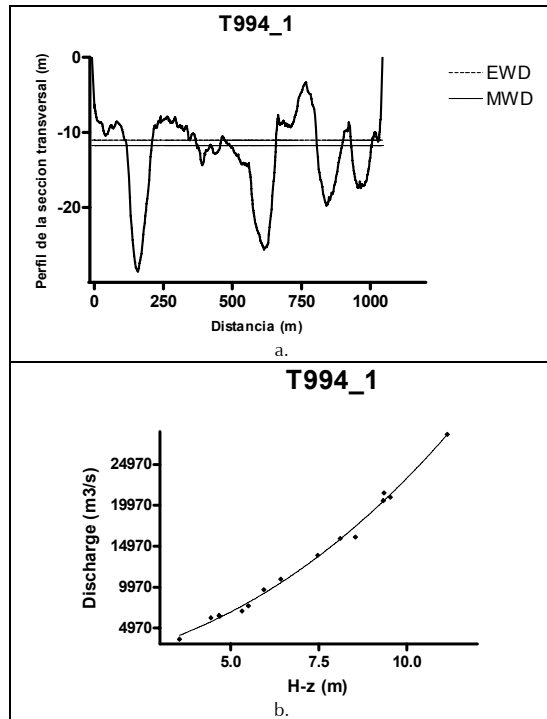


Figura 4. (a) Ejemplo de una sección transversal (estación virtual T994\_1) medida con ADCP sobre el río Negro. EWD = Profundidad media estimada por el método de Leon *et al.* (2006a). MWD = Profundidad media estimada por el ADCP. (b) Curva de calibración obtenida para la estación T994\_1, estimada mediante la metodología propuesta por Leon *et al.* (2006a).

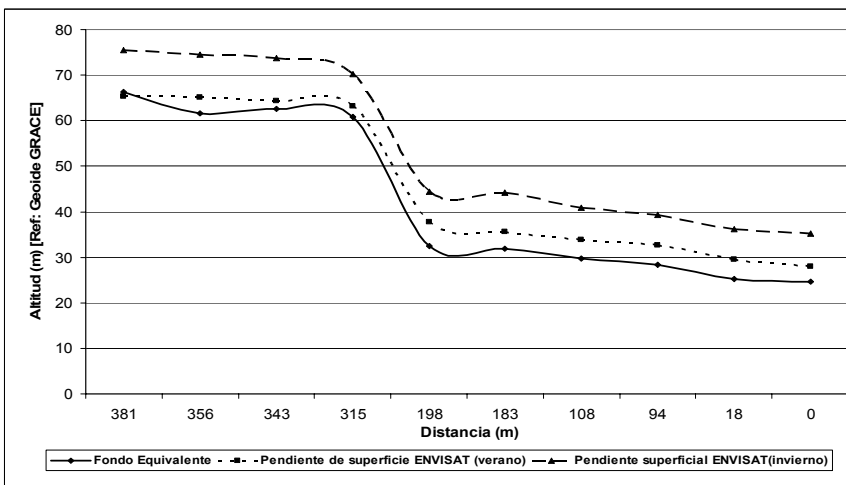


Figura 5. Comparación entre los perfiles de la superficie libre estimados por Frappart (2006) a partir de datos Envisat, y perfil del fondo equivalente estimado por Leon *et al.* (2006a) para la misma zona.

## Primeros aportes de la altimetría radar en la hidrología colombiana

Sobre la Cuenca del Río Amazonas, la metodología desarrollada por Leon *et al.* (2006a) fue aplicada para la deducción de la curva de calibración y la estimación del flujo cero del cauce a partir de una estación virtual T/P ubicada a 11 km de la estación hidrológica de Nazareth, aguas arriba de Leticia sobre el río Amazonas. Esta estación virtual T/P está compuesta por 188 datos altimétricos desde 1993 hasta 2002. Una diferencia inferior al 11% entre la profundidad medida *insitu* y la profundidad estimada por el método permiten concluir sobre la buena precisión del método y la calidad de las medidas altimétricas en esta región (Figura 6a). De la misma forma ha sido posible deducir la relación calibrada altura/caudal para la sección (Figura 6b).

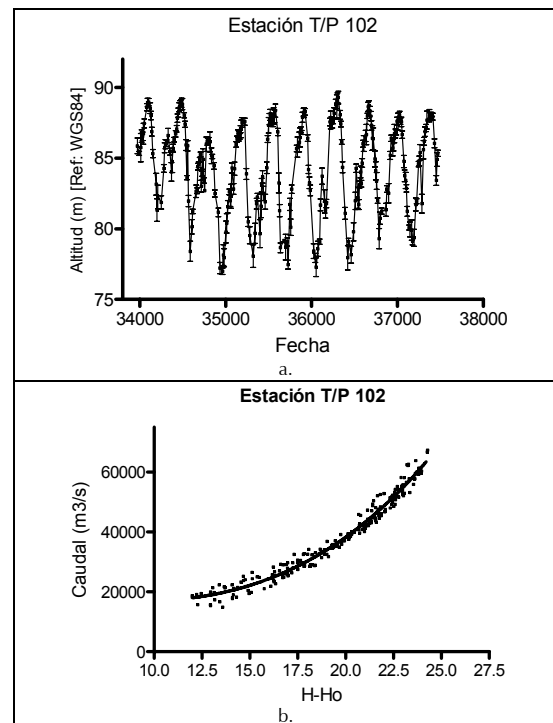


Figura 6. (a) Comparación entre la serie de cotas medias diarias de la estación de Nazareth (Fuente: Ideam) y las medidas altimétricas de la estación virtual T/P102 entre los años 1993 y 2002. (b) Curva de gasto para la estación virtual T/P102 empleando la metodología propuesta por Leon *et al.* (2006a). Nótese la buena correlación (0,95) entre los más de 180 datos altimétricos y los caudales estimados a partir de datos *insitu*.

## Conclusiones

El seguimiento de los regímenes hidrológicos a partir de registros *insitu* está casi siempre limitado por la escasez de estaciones hidrométricas; relativamente, al tamaño de las cuencas hidrográficas (ejemplo de la cuenca Amazónica), ligado a la dificultad de la adquisición de medidas (costo de instalación y mantenimiento de las estaciones, recuperación y tratamiento de los datos...). Las medidas altimétricas, y en general los datos de teledetección espacial, constituyen, por consecuencia, un aporte de suma importancia. En efecto, estos datos permiten, bajo ciertas condiciones, un seguimiento homogéneo de los planos de agua conti-

nentales en el espacio y en el tiempo. La definición de estaciones virtuales permite crear o complementar una red de medidas de los niveles del agua, dando acceso a la estimación de parámetros hidráulicos más importantes y difícilmente medibles en campo.

La estimación de curvas de calibración, o lo que es igual, la caracterización de estaciones virtuales, realizada de la misma forma en que generalmente se caracterizan las estaciones hidrométricas, con una precisión muy satisfactoria a partir de caudales modelados y datos provenientes del espacio, abre un nuevo campo de investigación en el dominio de la hidrología espacial.

Las ventajas de los datos espaciales son numerosos: referencia elipsoidal, repartición espacial global y densa, no están limitados a los cauces principales sino que dan también acceso a las zonas de inundación, tiempo rápido de acceso, homogeneización global de los datos relativamente fáciles de comprender, y estimación más rigurosa de las incertidumbres. Las posibles mejoras, tanto a los datos como a los métodos, son numerosas pero también muy prometedoras. Por el momento, los principales inconvenientes para la aplicación de los datos en hidrología radican en la repetitividad temporal de estos y la falta de desarrollo de algoritmos adaptados para el tratamiento de las señales provenientes de superficies continentales

## Bibliografía

- Alsdorf, D., Lettenmaier, D., Vörösmarty, C., The Need for Global Satellitebased Observations of Terrestrial Surface Waters., EOS Transactions, American Geophysical Union 84, 29, 2003, pp. 269-280.
- AVISO User Handbook., Merged TOPEX/Poseidon Products (GDR-Ms), 3a Edición, AVI-NT-02-101-CN, Toulouse, 1996.
- Bjerklie, D., Dingman, S., Vorosmarty, C., Bolster, C., Congalton, R., Evaluating the potential for measuring river discharge from space., Journal of Hydrology, Vol. 278, No. 1-4, 2003, pp. 17-38.
- Benveniste, J., Berry, P. A., Freeman, J. A., Smith, R., Envisat measuring global rivers and lakes level in near real time., Geophysical Research Abstracts, 9, 2007.
- Berry, P. A., Pinnock R. A., The potential contribution of satellite altimetry to retrieval of the global hydrology runoff budget., Geophysical Research Abstracts, 5, 2003.
- Birkett, C. M., Radar altimetry: a new concept in monitoring lake level changes., EOS Trans., AGU 75, 24, 1994, pp. 273-275.
- Birkett, C. M., The contribution of Topex/Poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes., J. Geophys. Res., 100, C12, 1995a, pp. 25179-25204.
- Birkett, C. M., The Global Remote Sensing of Lakes, Wetlands and Rivers for Hydrological and Climate Research., IGARSS conference, IEEE, Firenze, 1995b, pp. 1979-1981.
- Birkett, C. M., Murtugudde, R., Allan, T., Indian Ocean climate event brings floods to east Africa's lakes and the Sudd Marsh., Geophys. Res. Lett., 26, 1999, pp. 1031-1034.
- Birkett, C. M., Synergistic remote sensing of Lake Chad: Variability of basin inundation., Remote Sensing of Environment, 72, 2000, pp. 218-236.
- Birkett, C. M., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Costa, M., Jasinski, J., Altimetric remote sensing of the Amazon: Application of satellite radar altimetry., JGR, 107, (D20), 2002, 8059, 10.1029/2001JD000609.
- Brisset, L., La calotte Est Antarctique observée par l'altimétrie ERS-1: aspects stationnaire et dynamique., Tesis doctoral de la Univ. D. Diderot, Paris VII, 1996, pp. 216.
- Brooks, R. L., Lake elevation from satellite radar altimetry from a validation area in Canada., Reporte, Geosci. Res., 1982.
- Calmant, S., Seyler, F., Continental surface waters from satellite altimetry., Comptes Rendus Geosciences, 338, 14-15, 2006, pp. 1113-1122.
- Cazenave, A., Bonnefond, P., DoMinh, K., Caspian sea level from Topex/Poseidon altimetry: level now falling., Geophys. Res. Lett., 24, 1997, pp. 881-884.
- Clague, J. J., Luckman, B. H., Van Dorp, R. D., Gilbert, R., Froese, D., Jensen, B., Reyes, A. V., Rapid changes in the level of Kluane Lake in Yukon Territory over the last millennium., Quaternary Research, Vol. 66, No. 2, 2006, pp. 342-355.
- Coe, M., Birkett, C., Calculation of river discharge and prediction of lake height from satellite radar altimetry: Example for the Lake Chad basin., Water Resources Research, 40, 2003, pp. W10205.
- Crétau, J., Birkett C., Lake studies from satellite radar altimetry Altimétrie satellitaire sur les lacs., Comptes Rendus Geosciences, 338, 14-15, 2006, pp. 1098-1112.
- Cudlip, W., Ridley, J. K., Rapley, C. G., The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands., In: Remote Sensing and Global Change (Proc. 16th Annual Conf., Remote Sensing Society, London, UK, 1992, pp. 207-216.
- De Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A., Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry., Application to the Amazon basin, C.R. Acad. Sci., Paris, 333, 2001, pp. 633-643.
- Delmas, O., Altimétrie sur continents: étude des données TOPEX/POSEIDON sur le fleuve Congo., Reporte de stage de Segundo año, ENSAE, 2001, pp. 72.
- Desai, S. D., Vincent, P., Statistical Evaluation of the Jason-1 Operational Sensor Data Record., Marine Geodesy, Vol. 26, No. 3-4, 2003, pp. 187-199.
- Francis, C. R. The height calibration of the ERS-1 radar altimeter., Proceedings of First ERS-1 Symposium on Space at the Service of Our Environment, 1, 1993, pp. 381-393.
- Frappart, F. Hydrologie spatiale : Développement d'applications pour l'utilisation de la télédétection sur les grands bassins fluviaux., Tesis doctoral de la Univ. Toulouse III-Paul Sabatier, 2006, pp. 283.
- Frappart, F., Calmant, S., Cauhope, M., Seyler, F., Cazenave, A., Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin., Remote Sens. Environ, Vol. 100, No. 2, 2006, pp. 252-264.
- Gumbricht, T., McCarthy, T., The topography of the Okavango Delta, Botswana, and its tectonic and sedimentological implications., South African Journal of Geology, Vol. 104, No. 3, 2001, pp. 243-264.
- Hooijberg, M., Practical Geodesy., Using Computers, Springer, Berlin- Heidelberg, 1997.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Martinuzzi, J., Font, J., Berger, M., Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture



- and OceanSalinity (SMOS) mission., *Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 8, 2001, pp. 1729-1735.
- Koblinsky, C. J., Clarke, R. T., Brenner, A. C., Frey, H., Measurement of river level variations with satellite altimetry., *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 6, 1993, pp. 1839-1848.
- Kosuth, P., Cazenave A., Développement de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi hydrologique des plans d'eau continentaux : application au réseau hydrographique de l'Amazonie., *Reporte, Projet PNTS 00 / 0031/ INSU Reporte de actividades 2000-2001, 2002*, pp. 39.
- Kouraev, A. V., Zakharovab, E., Samainc, O., Mognarda, N., Cazenave, A., Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992-2002)., *Remote Sensing of Environment*, 93, 2004, pp. 238-245.
- Legrésy, B., Télédétection des calottes polaires par altimétrie satellitaire : application à la climatologie et au bilan de masse de l'Antarctique., *Tesis doctoral de la Univ. P. Sabatier, Toulouse 1998*, pp. 148.
- Leon, J. G., Bonnet, M. P., Cauhope, M., Calmant, S., Seyler, F., Distributed water flow estimates of the Upper Negro River using a Muskingum-Cunge routing model based on altimetric spatial data., *En revisión. Hydrological Processes*, 2007.
- Leon, J. G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M. P., Cauhope, M., Frappart, F., Filizola, N., Rating curves and estimation of average water depth at the Upper Negro River based on satellite altimeter data and modelled discharges., *J. of Hydrology*, 328, 2006a, pp. 481-496.
- Leon, J. G., Seyler, F., Calmant, S., Bonnet, M. P., Cauhope, M., Hydrological parameter estimation for ungauged basin based on satellite altimeter data and discharge modeling. A simulation for the Caqueta River (Amazonian Basin, Colombia)., *Hydrology and Earth System Sciences*, D. 3, 2006b, pp. 3023-3059.
- Maheu, C., Cazenave, A., Mechoso, C. R. Water level fluctuations in the Plata basin (South America) from Topex/Poseidon satellite altimetry., *Geophys. Res.*, *En revision*, 2002.
- Mercier, F., Altimétrie spatiale sur les eaux continentales : apport des missions Topex/Poseidon et ERS1&2 à l'étude des lacs, mers intérieures et bassins fluviaux. *Tesis doctoral de la Univ. Toulouse III-Paul Sabatier*, 2001, pp. 190.
- Mercier, F., Cazenave, A., Maheu C., Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian ocean., *Global and Planetary Changes*, 32, 2002, pp.141-163.
- Morris, C. S., Gill, S. K., Variation of great lakes waters from Geosat altimetry., *Water Resour. Res.*, 30, 1994a, pp. 1009-1017.
- Morris, C. S., Gill, S. K., Evaluation of the Topex/Poseidon altimeter system over the great Lakes., *J. Geophys. Res.*, 99, C12, 1994b, pp. 24527-24539.
- Muller, E., Décamps, H., Dobson, M., Contribution of space remote sensing to river studies., *Freshwater Biology*, Vol. 29, No. 2, 1993, pp. 301-312.
- Ponce, V. M., Yevjevich, V., Muskingum Cunge method with variable parameters., *J. Hydraul. Div, ASCE*, 104 (HY12), 1978, pp. 1663-1667.
- Ponce, V.M. Simplified Muskingum routing equation., *J Hydraul. Div, ASCE*, 105 (HY1), 1979, pp. 85-91.
- Ponchaut, F., Cazenave, A., Continental lake level variations from Topex/Poseidon (1993-1996)., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 326, 1998, pp. 13-20.
- Rantz, S. E., Measurement and computation of streamflow., *Measurement of Stage and Discharge, US Geological Survey Water Supply Paper*, Vol. 1, 1982, pp. 284.
- Rémy, F., Legrésy, B., Bleuzen, P., Vincent, P., Minster, J. F., Dual frequency TOPEX altimeter observations of Greenland., *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 10, 1996, pp. 1507-1525.
- Romero, F. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental., *Revista AquaTIC*, 24, 2006, pp. 13-41.
- Seyler, F., Calmant, S., Bonnet, M-P., Oliveira, M., Curvature of the hydraulic slope at the Negro-Solimões confluence from satellite altimetry and hydrodynamics: relationship with the distribution of erosion/sedimentation areas., *EGS, Nice*, April, 2004.
- Seyler, F. Rapport de mission – Rio Negro (BR40), 04/2005., *HYBAM Toulouse*, 2005, pp. 12. Disponible en: [http://www.mpl.ird.fr/hybam/campagnes/br\\_40.pdf](http://www.mpl.ird.fr/hybam/campagnes/br_40.pdf).
- Seyler, F., Bonnet, M. P., Calmant, S., Cauhopé, M., Cazenave A., Cochonneau, G., Divol, J., Do-Minh Kien, Frappart, F., Gennero, M.-C., Guyenne-Blin, K., Huynh, F., Leon, J. G., Mangeas, M., Mercier, F., Rocquelain G., Tocqueville, L., Zanifé, O. Z. The CASH Project. *Proc. On 15 years of Progress in Radar Altimetry.*, Venice, Italy, ESA SP-614, July 2006, p. 4.
- Smith, L. C., Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review., *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 10, pp. 1998, pp. 1427-1439.
- Tapley, B. D., Chambers, D. P., Bettadpur, S., Ries, J. C., Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid., *Geophysical Research Letters*, Vo. 30, No. 22, 2163, doi:10.1029/2003, GL018622.
- Tapley, B. D., Bettadpur S., Watkins, M. M., Reigber, C., The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results., *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi:10.1029/2004, GL019920.
- Wingham, D., Francis, C., Baker, S. Bouzinac, C., Brockley, D., Cullen, R., Chateau-Thierry, P., Laxon, S., Mallow, U., Mavrocordatos, C., Phalippou, L., Ratier, G., Rey, L., Rostan, F., Viaw, P., Wallis, D., CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields., *Advances in Space Research*, Vol. 37, No. 4, 2006, pp. 841-871.