

USO DE DADOS DE GEODÉSIA ESPACIAL PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS NA BACIA AMAZÔNICA

Daniel Moreira^{1,4}; Stéphane Calmant²; Félix Perosanz³; Rubens Kenup^{1*}; Andre Santos¹;
Joecila Silva⁵; Otto Corrêa Rotunno Filho^{4*}; Frédérique Seyler⁶; Guillaume Ramillen³ & Achilles
Monteiro¹*

Resumo – A altitude de referência comum para as estações fluviométricas é necessária para a melhor condução de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos. Essa referência é essencial para avaliar a qualidade dos dados hidrológicos obtidos por técnicas de altimetria por satélite. Para avaliar essa tecnologia, o grande desafio é obter uma referência confiável e estável ao longo do tempo. Este trabalho propõe o emprego de uma rede de calibração altimétrica a partir de estações fluviométricas e dados de receptores GPS. A abordagem metodológica abrange o estudo de movimentos verticais, oriundos principalmente de carga hidrológica sazonal, que afeta a região Amazônica, sendo esses fenômenos observados através de estações permanentes GPS. O processamento de dados GPS fez uso do código computacional GINS desenvolvido pelo GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*). Os resultados evidenciaram a forte correlação entre movimentos verticais e o ciclo hidrológico na região Amazônica, bem como a aplicabilidade da técnica GPS como suporte a estudos hidrológicos e na avaliação de dados dos satélites altímetros e da missão GRACE.

Palavras-Chave – Geodésia, Hidrometria, Altimetria Espacial

USE OF SPACE GEODESY DATA FOR HYDROLOGIC STUDIES IN THE AMAZON BASIN

Abstract – A common reference altitude for streamflow gauge stations is needed for a better development of hydrological and hydrodynamic studies. This framework is essential to evaluate the quality of hydrological data derived by the techniques of satellite altimetry. To evaluate this technology, the main challenge is to obtain a reliable and timely stable reference. This work proposes the use of altimetric calibration network based on streamflow gauges and GPS data. The methodological approach addresses the study of vertical displacements, which are related mainly to the seasonal hydrological loading with impact in the Amazon region. The GPS data processing procedure used the GINS software developed by GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*). The results showed the strong relationship between vertical displacements and the hydrological cycle in the Amazon region, as well as the applicability of the GPS technique as support to hydrological studies and to the evaluation of satellite altimetry and GRACE mission data.

Keywords – Geodesy, Hydrometry, Satellite Altimetry.

¹ CPRM, Brasil, E-mail:daniel.moreira@cprm.gov.br.

² IRD/LEGOS, Toulouse, França.

³ CNES/GRGS, Toulouse, França.

⁴ Programa de Engenharia Civil, COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Email:otto@coc.ufrj.br

⁵ UEA, Manaus, Brasil.

⁶ IRD/LMTG, Toulouse, França.

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo tem, como um de seus objetivos prioritários, o aprimoramento de tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas ao monitoramento hidrológico. Em especial, o artigo estabelece novo cenário na área de hidrometria, onde se pode suprir a carência de informações e melhorar a correspondente qualidade, custos associados e tempo de obtenção de dados hidrológicos básicos, principalmente de nível dos cursos de água, para subsidiar estudos hidrológicos na região Amazônica. Nesse contexto, este trabalho visa apresentar metodologia e resultados das informações altimétricas geradas a partir de receptores GNSS, com precisão centimétrica, que possibilitaram avaliar e melhorar a qualidade de dados de cotas fluviométricas obtidos por satélites orbitais. Na metodologia proposta, é realizado o nivelamento das régua linimétricas, a partir de receptores GPS, o que contribui para uma proposta metodológica inicial de nivelamento para a rede hidrometeorológica nacional administrada pela ANA (Agência Nacional de Águas), onde, em princípio, as estações fluviométricas encontram-se sob referência altimétrica arbitrária. Com base no propósito de criar uma informação altimétrica com alto nível de precisão, é necessário estabelecer um referencial altimétrico, que permita o estudo de sua variação ao longo do tempo e a correção de uma série de fenômenos, tais como, efeitos de carga e outros movimentos da crosta. Adicionalmente, neste trabalho, foram empreendidos esforços na comparação entre os sinais de carga hidrológica derivados da tecnologia GPS e satélites gravimétricos. Maiores informações sobre este estudo podem ser encontradas em MOREIRA (2010), em SEYLER *et al.* (2013) e em CALMANT *et al.* (2013).

1.1 Área de Estudo

Para auxiliar na avaliação da tecnologia de altimetria espacial, foram instaladas, pela CPRM, em conjunto com o IRD, na região próxima a Manaus-AM, estações fluviométricas nos locais de passagem dos satélites de forma a comparar os dados dessas duas fontes.

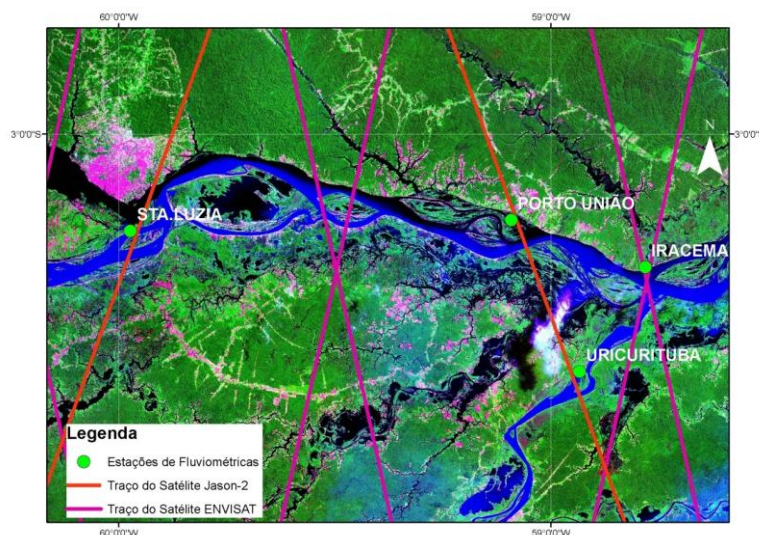


Figura 1- Locais da rede de estações fluviométricas instaladas para avaliação de tecnologia de altimetria espacial.

O estudo contou, ainda, com a utilização de duas outras estações já existentes e suficientemente próximas aos traços de satélites. São elas as estações do porto de Manaus da ANA (Agência Nacional de Águas) e da represa de Balbina, operada pela Eletronorte.

1.2. Conceitos Básicos de Altimetria Espacial

A técnica de altimetria espacial utiliza-se de um satélite como plataforma para um sensor, chamado de radar altímetro, que transmite, à superfície terrestre, pulsos de energia na frequência das microondas e recebe o sinal de retorno após este ser refletido pela superfície, estimando, assim, a altitude elipsoidal do corpo refletido, que, no caso deste estudo, são corpos de água. Em águas continentais, mais especificamente na região Amazônica, existe uma série de aplicações da tecnologia de altimetria espacial com destaque para trabalhos de CAMPOS *et al.* (2001), BIRKETT *et al.* (2002), LEON *et al.* (2006), CALMANT & SEYLER. (2006), GETIRANA *et al.* (2009), SILVA (2010) e SILVA *et al.* (2012).

2. METODOLOGIA

O uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é, no momento atual, a técnica mais adequada de avaliação de dados altimétricos. Baseia-se primariamente em realizar o nivelamento das estações fluviométricas próximas aos locais de aquisição do dado de altimetria espacial. Dessa forma, tanto a informação captada pelo satélite quanto o valor medido na estação *in situ* estariam sob a mesma referência altimétrica. Para o processamento de dados GNSS, foi utilizado o software GINS (Géodésie par Integrations Numériques Simultanées), originalmente concebido, nos anos 70 do século XX, pelo grupo do CNES/GRGS (*Centre National d'Études Spatiales / Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*) para tratar dados disponíveis de geodésia espacial. Maiores informações sobre o código computacional GINS podem ser encontradas em Marty(2009).

Como procedimento de processamento, foi empregado o método de posicionamento por ponto preciso (PPP), que permite determinar a posição da estação utilizando órbitas e relógios precisos dos satélites, definidos, por sua vez, pelos centros de análise IGS. Uma das grandes vantagens do modo PPP é a não necessidade de outras estações terrestres como referência, tornando as soluções independentes, o que evita propagação de erros e movimentos diferenciados entre estações como acontece no método de dupla diferença. A qualidade dos resultados PPP está intimamente ligada à utilização de receptores de dupla frequência, qualidade das órbitas, relógios, modelos de refração troposférica, correção ionosférica e modelos físicos. Utilizam-se esses critérios seguindo as normas do IERS (2003) e um tempo de observação razoável através das medidas de fase e estimação da ambigüidade em valores inteiros, podendo-se atingir uma precisão centimétrica.



Figura 2- Ocupação de um lance de régua por receptor GPS para nivelamento da estação fluviométrica de Porto União.

2.1. Modelos de Ondulação Geoidal

Com o avanço e aplicações das técnicas oriundas da geodésia espacial, as quais são referenciadas ao elipsóide e contêm um significado geométrico da altitude, faz-se necessário atribuir um caráter físico a esse tipo de medida. Nesse sentido, foi desenvolvida uma série de modelos que definem a ondulação geoidal, termo que é utilizado para definir a distância que separa o geóide do elipsóide de referência. Os modelos de geóide global mais utilizado é o EGM08 (*Earth Gravity Model*). Para o Brasil, existe o modelo MAPGEO2010, desenvolvido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), baseado no EGM08 (Palvis *et al.*, 2008) e disponível no endereço eletrônico http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal_3.shtm

2.2. Movimentos da Crosta Terrestre

Como visto previamente, na busca da validação dos dados obtidos por altimetria por satélites, é necessário o estabelecimento de um referencial. Note-se que os referenciais altimétricos, sejam eles ortométricos ou elipsoidais, têm sua posição baseada em uma determinada época. Nesse sentido, impõe-se compreender que a Terra é um corpo visco-elástico, e sua crosta está sempre sujeita a movimentos, que são causados por uma série de fenômenos físicos. Os movimentos da crosta causam variações temporais nas coordenadas terrestres, tanto na direção vertical quanto horizontal, sendo as variações horizontais mais significativas. Essas variações devem ser compreendidas de forma a permitir as determinações de posição em diferentes épocas, associadas e trabalhadas em conjunto em relação à época em que o referencial foi estabelecido. Com esse objetivo, dados de estações GNSS permanentes instaladas na área de estudo foram processados de forma a quantificar e avaliar tais fenômenos.

2.2.1. GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*)

A variação da quantidade de água estocada em uma região, correspondente ao ciclo hidrológico terrestre, causa a variação da carga sobre a bacia e sua conseqüente deformação crustal. Esses movimentos, causados pela mudança de carga sobre uma bacia, provocam um variação do campo de gravidade terrestre. Dessa forma, o uso de dados gravimétricos pode auxiliar a interpretação dos movimentos verticais e de sua distribuição espacial. Uma importante contribuição, nesta questão, é o uso dos dados da missão GRACE (TAPLEY *et al.*, 2004), lançada em março de 2002. Na questão específica da altimetria espacial, essas variações verticais da crosta devem ser analisadas e monitoradas e, se possível, modeladas, pois o satélite altímetro não faz parte do mesmo sistema da régua linimétrica. As leituras do satélite percebem essas variações verticais, enquanto a régua no solo desloca-se em conjunto com os efeitos provocados por esses fenômenos. Para essa análise, foi utilizada a metodologia proposta por DAVIS *et al.* (2006).

3. RESULTADOS

A fim de contabilizar os movimentos verticais que modificam as referências altimétricas ao longo do tempo, foram processados os dados das estações GNSS permanentes e das séries do satélite GRACE na área do projeto, sendo os mesmos comparados com a variação do ciclo hidrológico, que, segundo estudos previamente já realizados (BEVIS *et al.*, 2005), é uma das principais causas desses movimentos verticais. A seguir, são mostradas a variação vertical da

estação GNNS de Urucurituba, da série GRACE, da cota fluviométrica obtida pelo satélite altímetro JASON-2 e da régua linimétrica (Figura 2) e correspondentes correlações (Tabela 1).

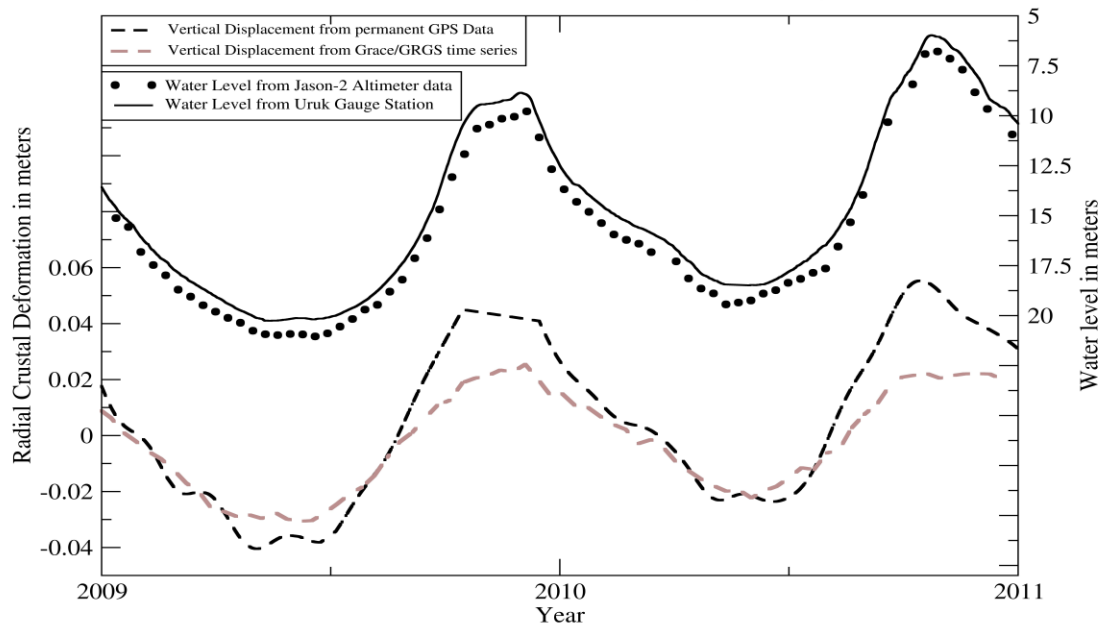


Figura 3 - Série de dados de geodésia espacial e da régua linimétrica em Urucurituba.

Tabela 1 : Correlação dos dados de geodésia espacial e régua linimétrica em Urucurituba.

URUCURITUBA	Altimetria Espacial	Régua	GPS	Grace
Altimetria Espacial		0.999	-0.969	-0.963
Régua	0.999		-0.973	-0.964
GPS	-0.969	-0.973		0.984
Grace	-0.963	-0.964	0.984	

A partir das informações obtidas, foram corrigidos os efeitos de carga, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 : Nivelamento do zero da régua das estações fluviométricas na área de estudo.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	CÓDIGO HIDROWEB	ZERO DA RÉGUA EM METROS (EGM2008)
IRACEMA		1,83
BALBINA	16080000	-2,41
URUCURITUBA	15960000	-1,15
PORTO DE MANAUS	14990000	-7,00
SANTA LUZIA		1,47

Usando as séries de dados fluviométricos, em uma referência global, é possível avaliar os dados de altimetria espacial, calculando erros sistemáticos nas séries altimétricas, como proposto por CALMANT *et al.* (2013) e SEYLER *et al.* (2013). Na Figura 4, estão configuradas as séries de cotas fluviométricas para a estação de Urucurituba. O procedimento identificou o erro sistemático de 0,65 metro, valor semelhante àquele encontrado para o satélite JASON-2, na estação de Urucurituba, por SEYLER *et al.* (2012).

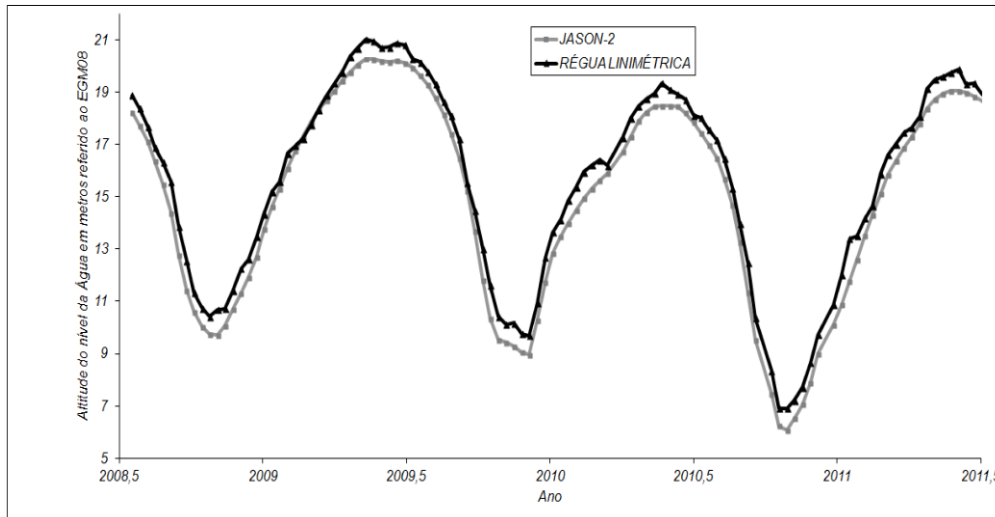


Figura 4- Cotas fluviométricas niveladas ao geóide EGM08 obtidas pela régua linimétrica e pelo satélite altímetro JASON-2.

Ao final desta análise, é fundamental ressaltar a importância do nivelamento das estações fluviométricas. A estação de Porto União (Figura 2) teve sua operação descontinuada devido a um forte movimento de massa que atingiu a estação, destruindo régua e referências de nível. A partir do nivelamento GPS executado e demonstrado anteriormente, a série pode ser reconstruída, fato que destaca a importância do nivelamento das estações fluviométricas por receptores GPS. Somente com o uso de referenciais comuns às estações hidrológicas, está garantida, de forma segura, a preservação de séries hidrológicas. Casos, como esse que ocorreu em Porto União, podem ser ainda mais graves em estações como, por exemplo, do Porto de Manaus, de mais de 100 anos de registros de nível de água. Apesar do Brasil estar situado em uma região de maior estabilidade, sem grandes catástrofes naturais, fenômenos extremos como cheias históricas, movimentos de massa e eventos sísmicos, estes inclusive já tendo sido anteriormente registrados na Amazônia, podem ocasionar danos irreparáveis em estações fluviométricas, ocasionando a descontinuidade permanente de longas séries históricas de nível de água de valor inestimável.

4. CONCLUSÕES

Na rede hidrometeorológica nacional, estima-se, pela consulta no endereço eletrônico do HIDROWEB, que 99% das estações fluviométricas possuem uma referência arbitrária, fato este que impossibilita, limita ou prejudica estudos hidrodinâmicos e hidrológicos. Na questão da avaliação rigorosa da tecnologia de altimetria por satélites, sem uma referência vertical comum para as diversas estações fluviométricas, fica igualmente limitada essa alternativa. Dados fluviométricos sem referência vertical comum inviabilizam definir, com precisão, o perfil longitudinal dos rios e sua variação com o tempo, calcular parâmetros hidrodinâmicos como o coeficiente de Manning,

estabelecer o potencial hidráulico, auxiliar a navegação e fixar um controle vertical das cheias com vistas a definir, assim, áreas de risco de inundação, entre outras atividades e ações. Para definir uma referência altimétrica com o máximo rigor, é preciso recorrer à Geodésia, ciência que estuda a forma e dimensões da Terra, do seu campo de gravidade e de suas variações no tempo.

Na determinação da rede de referência, o método PPP mostrou-se altamente válido, atingindo o resultado esperado. Em especial, na presente pesquisa, que contou com longas séries temporais de dados GPS, observou-se a eficiência do método PPP, o que motiva a sua recomendação em outros estudos da mesma natureza.

As variações da coordenada vertical nos locais de medição no tempo e no espaço afetam, de maneira significativa, com valores em torno de 10 centímetros, o resultado final da série de altimetria espacial. Por essa razão, a determinação dos fenômenos de carga, ao longo das linhas de satélite e nas estações hidrológicas, contribuem, de forma relevante, na avaliação de séries de altimetria espacial.

Os satélites GRACE mostraram, por sua vez, uma boa correlação dos seus sinais com os deslocamentos verticais detectados por receptores GPS. Todavia o fator de deslocamento calculado a partir dos dados dos satélites GRACE devem ser ainda melhor estimados em futuros estudos.

Por fim, os resultados de níveis fluviométricos obtidos pela tecnologia de altimetria espacial, conforme estudos anteriores supracitados, são muito promissores e permitem uma série de aplicações em hidrologia de forma a complementar e a consistir dados fluviométricos de estações convencionais.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, ao Programa de Engenharia Civil-COPPE/UFRJ, onde o primeiro autor desenvolveu a sua dissertação de mestrado e atualmente desenvolve seu doutoramento, e à Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM). Agradecimentos especiais são direcionados ao projeto CAPES/COFECUB 516/05, que fomentou os primeiros estudos brasileiros de altimetria espacial na região Amazônica, e ao projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas, parceria entre a CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e o IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*), que ofereceu suporte para o desenvolvimento da presente pesquisa. Agradecimentos são também dirigidos às agências de fomento FAPERJ e CNPq, que, por meio de suporte aos projetos PEC/COPPE FAPERJ Edital 014/2010 (2010-2012), ao projeto FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) e ao projeto FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), bem como ao projeto PROSUL (Edital CNPq Nº 005/2007), entre outros, estimulam o avanço científico-tecnológico brasileiro na temática desta pesquisa. Agradecimentos são extensivos à ANA, INPE, CNES, ESA, NASA e ORE-HYBAM, que ofereceram suporte para a disponibilização dos dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho e que, em especial, atuam no suporte para a realização de trabalhos na região amazônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEVIS, M., D. ALSDORF, E. KENDRICK, L. P. FORTES, B. FORSBURG, R. SMALLEY JR., AND J. BECKER (2005), Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16308, doi:10.1029/2005GL023491.
- BIRKETT, C. M. et al. (2002). Surface water dynamics in the Amazon basin: Application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research*. 107(D20), 8059, doi:10.1029/2001JD000609.

- CALMANT, S. e SEYLER, F. (2006). Continental surface water from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*. 338(14-15), 1113-1122, doi: 10.1016/j.crte.2006.05.012.
- CALMANT, S. ; SILVA, J. S. ; MOREIRA, D. M. ; SEYLER, F. ; SHUM, C. K ; CRETAUX, J. F. ; GABALDA, G. . Detection of ENVISAT RA2/ICE-1 Retracked Radar Altimetry Bias Over Rivers using GPS. *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1551-1564, 2013.
- CAMPOS, I.; MERCIER, F.; MAHEU, C.; COCHONNEAU, G.; KOSUTH, P.; BLITZKOW, D., (2001). Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry; application to the Amazon basin. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planetes*. 333, 1–11.
- DAVIS, J. L., ELÓSEGUI, P., MITROVICA, J. X., AND TAMISIEA, M. E., 2004. Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS. *Geophysical Research Letters*, 31:24605, doi:10.1029/2004GL021435.
- GETIRANA, Augusto Cesar Vieira ; ROTUNNO FILHO, O. C. ; BONNET, Marie-Paule ; MANSUR, Webe João ; CALMANT, S. ; ROUX, E (2009). . Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall-runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, v. 379, p. 205-219.
- IERS CONVENTIONS (2003). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note ; 32) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. 127 pp., paperback, ISBN 3-89888-884-3 (print version).
- LEON, J.G, CALMANT, S., SEYLER, F., BONNET, M.P., CAUHOPE, M., FRAPPART, F., FILLIZOLA, N. (2006). Rating curves and estimation of average depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and modelled discharges. *Journal of Hydrology* 328 (3-4), 481-496.
- MARTY, J.C. (2009), GINS Algorithmic Documentation, v5, July 2009 (in French), www.igsac-cnes.cls.fr/documents/gins/GINS_Doc_Algo.html
- MOREIRA, D.M, Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2010.
- SEYLER, F. ; CALMANT, S. ; SILVA, J. S. ; MOREIRA, D. M. ; MERCIER, F ; SHUM, C. K . From Topex/Poseidon to Jason2 - OSTM in the Amazon basin. *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1542-1550, 2013.
- SEYLER, F.; CALMANT, S.; SANTOS DA SILVA, J.; FILIZOLA, N.; ROUX, E.; COCHONNEAU, G.; VAUCHEL, P.; BONNET, M-P. (2008). Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over AmazonBasin. *Journal of Applied Remote Sensing – SPIE*. 7150, 715017, doi: 10.1117/12.813258.
- SILVA, A. E. S., Estimativa das precisões absoluta e relativa de níveis de água fluviais obtidos do satélite altimétrico JASON-2 em bacias hidrográficas brasileiras, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2010.
- SILVA, J. S. ; SEYLER, F. ; CALMANT, S. ; Rotunno Filho, O. C. ; ROUX, E. ; ARAUJO, A. A. M. ; GOYOT, J. . Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *International Journal of Remote Sensing (Online)*, v. 33, p. 3323-3353, 2012.
- PAVLIS N.K., HOLMES S.A., KENYONS.C., FACTOR J.K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008; apresentado em 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13–18. Disponível em http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al_EGU2008.ppt
- TAPLEY, B. D., S. BETTADPUR, M. WATKINS, C. REIGBER (2004), The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.