

Aplicações da altimetria espacial para monitoramento hidrológico da bacia do rio Purus

Luisa Gonçalves de Freitas¹

Joecila Santos da Silva²

Stéphane Calmant³

Frédérique Seyler⁴

¹ Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Bacharelado em Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia – EST, Av. Darcy Vargas, 1200, 69065-020, Manaus - AM, Brasil, e-mail: luisadefreitas@hotmail.com

² Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Centro de Estudos Superiores do Trópico Úmido – CESTU, Avenida Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus-AM, Brasil, e-mail: joecila.silva@ird.fr

³ Institut de Recherche pour le Développement – IRD, UMR 5566 LEGOS CNES/CNRS/IRD/UT, 14 av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France, e-mail: stephane.calmant@ird.fr

⁴ Institut de Recherche pour le Développement – IRD, UMR ESPACE-DEV, 500 rue Jean François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5, France, e-mail: frederique.seyler@ird.fr

Abstract – For certain rivers of the Amazon basin, hydrological information can often be difficult to obtain due to the inaccessibility of the region, the sparse distribution of gauge stations, or the slow dissemination of data. Satellite radar altimeters have the potential to monitor height variations over inland waters. Here, it is shown that the ESA radar altimeter (RA2), currently operating on board the ENVISAT satellite, can successfully track rivers. Time series of relative water level variations and the annual water level hydrograph, for the 8 years of this mission, have been obtained for a selection of the Purus River. The hydrological regime is characterized by a multimodal flood wave, fast rise and slow recession. Drought has occurred during the months of August and October, and the flood has occurred during February to April. The coefficients of variation of the water stage denote lower values upstream while the values much higher downstream reaches. Overall, the altimetry results demonstrate that the ENVISAT mission is successfully monitoring the transient flood waves of this trans-boundary river.

Palavras-Chave – Space altimetry, Purus River basin, hydrological regime, ENVISAT, altimetria espacial, bacia do rio Purus, regime hidrológico, ENVISAT.

1 INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica possui 6 869 000 km² de área de drenagem, aproximadamente 37% da América do Sul (Silva, 2010), abrangendo o Brasil, Bolívia, Peru, Colômbia, Equador, Venezuela e Guiana, estando 69,1% em território brasileiro. Apresenta vazão de 220 800 m³/s. Fazem parte da bacia os rios Madeira, Tocantins, Negro, Xingu, Tapajós, Purus, Marañón, Ucayali, Japurá-Caquetá, Juruá, Putamayo-Içá, Trombetas, Napo e Uatumã (UNEP, 2004). Segundo Molinier (1995), a contribuição da Bacia Amazônica com a descarga de água doce nos oceanos é de aproximadamente 15%. No entanto apresenta uma escassez de estações hidrológicas convencionais, seja por dificuldade de acesso às extensas áreas remotas da bacia ou inexistência de infraestrutura adequada. Dados disponibilizados pela Agência Nacional das Águas mostram que até 2007 existiam apenas 465 estações fluviométricas na parte brasileira da bacia Amazônica (ANA, 2011), demandando a necessidade de fortalecer o uso de novas técnicas para responder às questões científicas relacionadas à compreensão dos sistemas hídricos Amazônicos bem como do regime hidrológico dos seus rios.

Tendo em vista a falta de informações, a utilização de medidas estimadas por satélites altimétricos torna-se uma alternativa bastante relevante, podendo estas serem obtidas em regiões extensas e remotas como as existentes na bacia Amazônica, uma vez que são caracterizadas em alcançar tais regiões de forma homogênea, contínua e freqüente, possuindo detalhamento espacial e temporal diferentes das redes de observações tradicionais (Calmant e Seyler, 2006). É importante ressaltar também que, as medidas altimétricas complementam dados hidrológicos *in situ* em rios contidos no nível do território brasileiro, como o rio Purus, objeto deste estudo.

Neste estudo, busca-se aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Purus com base em dados altimétricos de nível de água obtidos de estações virtuais utilizando o algoritmo *Ice-1* do satélite ENVISAT.

2 METODOLOGIA DO TRABALHO

2.1. Área de Estudo

A área de estudo situa-se na bacia do rio Purus com área de drenagem de 63 166 km² e vazão de 11 000 m³/s. Este tem sua nascente nas colinas do Arco Fitzcarrald, situado na floresta baixa Peruana dos departamentos de Ucayali e Madre de Dios. O rio Purus entra no Brasil pelo estado do Acre no município de Santa Rosa do Purus, passando pelo município de Manoel Urbano e entra no estado do Amazonas pelo município de Boca do Acre onde recebe as águas do Rio Acre. Segue pelo estado do Amazonas até desaguar no rio Solimões. Estima-se que o seu comprimento é de aproximadamente 3379 km. É um rio constituído de águas brancas, mais conhecidas por águas barrentas, devido à expressiva carga de sedimentos em suspensão, formada principalmente por material de granulometria silte e argila, mineralogicamente constituída de quartzo, feldspato e argilominerais (esmectita, caulinita, illita) e moscovita. Em características gerais, é um rio rico em peixes e sais minerais.

2.2 Dados altimétricos

Os dados altimétricos foram adquiridos através do satélite ENVISAT (*ENVIRONMENTAL SATellite*) lançado em março de 2002, sendo considerado o maior satélite para observação da Terra construído até agora. Os dados recolhidos pelo ENVISAT permitiram o estudo científico sobre questões ambientais como a variabilidade do nível dos rios, foco deste trabalho.

O ENVISAT estava equipado com 10 instrumentos (entre eles radares, espectrômetros, radiômetro e sistemas de posicionamento precisos) que permitiram uma análise rigorosa da atmosfera, continentes, oceanos e gelo do planeta (Wehr e Attema, 2001), incluindo um altímetro de radar (RA-2 ou *Advanced Radar Altimeter*).

Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*) são processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*, para uso no presente estudo proveniente da missão ENVISAT, utilizando-se o algoritmo padrão de tratamento de FO *Ice-1*, foram obtidos entre as coordenadas geográficas 90°W a 40°W e 13°N a 21°S. Extraíram-se do CTOH 90 traços, totalizando 93 ciclos de 10/2002 a 10/2010. Foram desenvolvidos programas em linguagem Fortran para cada algoritmo padrão de tratamento das FOs do satélite ENVISAT (*Ocean, Ice-1, Ice-2 e Sea-ice*) que permitem calcular a posição à 20Hz (*i.e.*, 1/20éssimo de segundo) da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altura do plano de água a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas que permitem a criação das bases de dados para utilização no programa *Virtual ALtimetry Station – VALS* (VALS, 2011).

2.3 Elaboraões das estações virtuais

Considera-se Estação Virtual o ponto de cruzamento dos traços de órbita do satélite altimétrico com os corpos d'água na superfície terrestre. Nesses pontos as chances de se obter uma série temporal da altura do plano de água é bastante elevada. Foi aplicada uma metodologia para criação das estações virtuais pela seleção dos dados correspondentes a estes cruzamentos, adaptadas às variações no tempo e no espaço através do programa *Virtual ALtimetry Station – VALS* (VALS, 2011), descrita em Silva *et al* (2010).

A elaboração de uma estação virtual pode ser dividida em duas etapas principais diferenciáveis pelo tipo de programa utilizado em cada uma delas. Durante a primeira etapa, que será executada no programa Google Earth 6.0.3 (Google Earth, 2011), seleciona-se os pontos de cruzamento entre o corpo d'água e o traço de satélite, em seguida faz-se um polígono de imagem entorno desses pontos delimitando assim a área de dados a serem recolhidos. Os dados selecionados são visualizados no programa VALS -- já na segunda etapa de elaboração de uma estação virtual-- mostrando o perfil hidrológico altimétrico ao longo do traço, onde cada linha corresponde a uma passagem do satélite permitindo-se refinar a seleção dos dados individualmente, excluindo-se as medidas indesejáveis.

Os dados para cada passagem do satélite permitem estimar as séries temporais de altura do nível da água, calculando-se a média e a mediana para cada ciclo. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais serão

convertidas em altitudes, utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

Para o estudo do Rio Purus foram elaboradas 58 estações virtuais utilizando-se o algoritmo *Ice-1* para o satélite ENVISAT, sendo um dos algoritmos que se adapta às medições altimétricas em águas continentais (Frappart *et al.*, 2006, Silva *et al.*, 2010).

2.3 Caracterização do Regime Hidrológico

Para a caracterização do regime hidrológico destaca-se primeiramente a representação gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais de altura da lâmina da água, com o intuito de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros altimétricos (*i.e.*, 2002 a 2010) verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade, assim como, a possível existência de anomalias.

No sentido de facilitar a identificação de períodos sazonais foram elaborados cotagramas para cada série temporal calculando-se as médias mensais anuais das cotas altimétricas utilizando-se a metodologia proposta por Bittencourt e Amadio (2007). Foi considerado para delimitar o período de cheia, o valor médio menos o desvio padrão calculado para as cotas altimétricas máximas anuais. Igualmente, utilizando a média acrescida do desvio padrão das cotas altimétricas mínimas anuais, foi definido o valor limítrofe para o período de estiagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estações Virtuais

O presente estudo está fundamentado na análise dos dados altimétricos do rio Purus provenientes do satélite ENVISAT. Um conjunto de 58 estações virtuais teve seus dados analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas.

Roux *et al.* (2010) descreve diversas metodologias para a determinação de séries temporais de nível de água com dados altimétricos (*i.e.*, estação virtual) utilizadas nos estudos de hidrossistemas continentais, sendo que a seleção regular dos dados altimétricos houvera obedecido critério exclusivamente geográfico, isto é, um retângulo delimitado pelas latitudes e longitudes mínimas e máximas, sem qualquer critério para eliminação dos ruídos provenientes do tamanho da faixa imageada.

A metodologia manual descrita em Silva *et al.* (2010) e validada em Roux *et al.* (2010) e Seyler *et al.* (2008), permite uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade através do programa VALS utilizando o mosaico de imagens do Google Earth como segundo plano, apresentando diversos tratamentos da medida altimétrica, como a seleção individualizada de cada medida por ciclo e múltiplas correções do efeito de afastamento em relação ao nadir (*off-nadir*). A partir do emprego da ferramenta VALS, selecionam-se, com maior confiabilidade, os dados altimétricos sob qualquer plano de água para cada passagem do satélite.

3.2 Caracterizações do regime hidrológico do Rio Purus

Inicialmente, foram gerados 58 cotagramas, um para cada estação virtual, a partir da análise estatística das médias mensais. Os gráficos foram gerados de maneira que se tornasse possível observar o comportamento do nível de água ao longo do ano, de modo

a avaliar a sazonalidade durante os oito anos selecionados para estudo (2002 a 2010). A delimitação dos períodos sazonais é de grande importante para aplicações de metodologias referentes à coleta de informações que estão relacionadas às diferenças hidrodinâmicas e hidro-morfológicas estabelecidas nos períodos de cheia e estiagem.

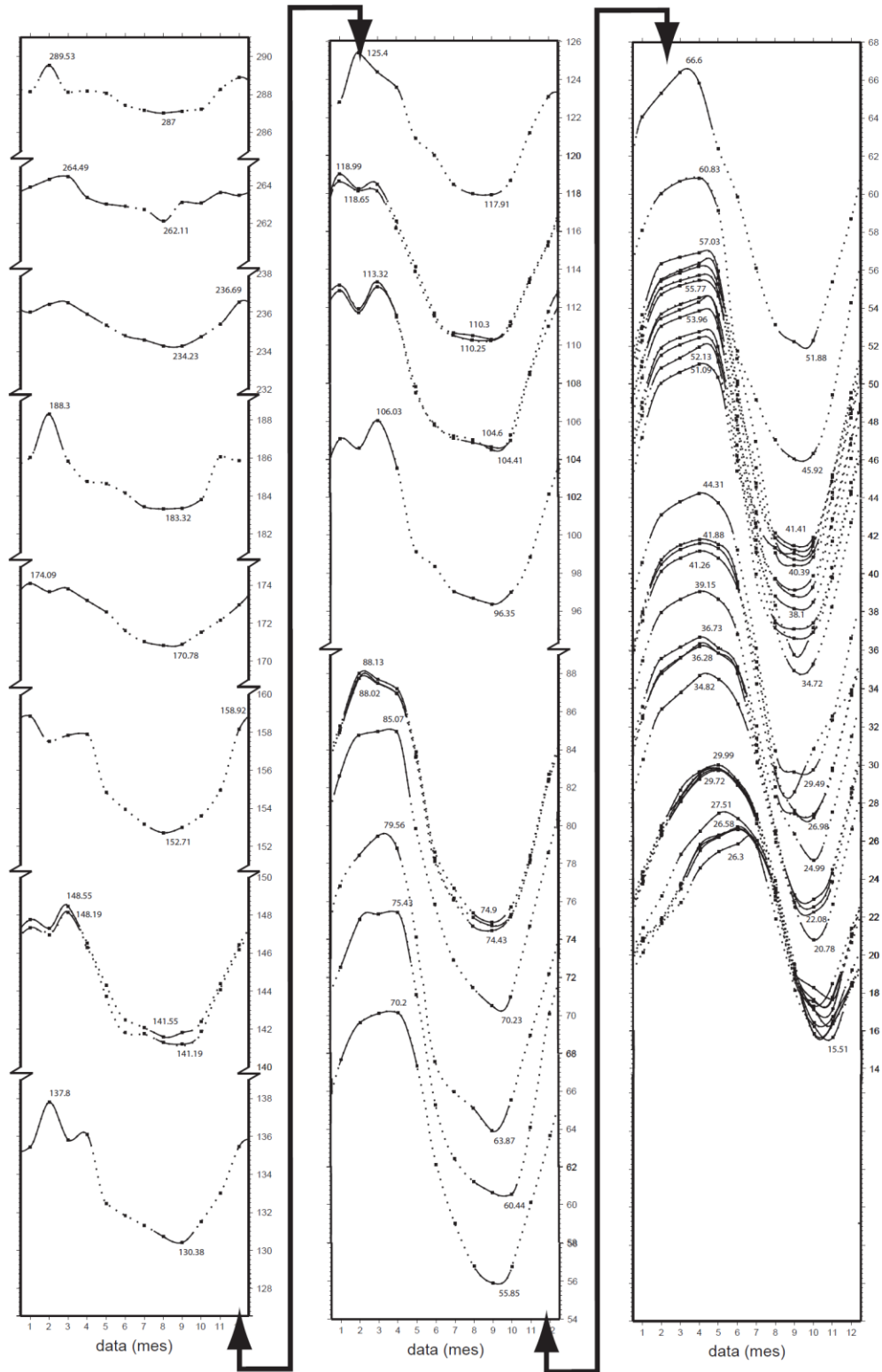


Figura 1 – Cotogramas do rio Purus referentes ao período de 2002-2010 das 58 estações virtuais, onde são identificados os períodos de cheia e estiagem.

A partir da análise dos cotogramas foi possível observar que o rio Purus apresenta dois (2) períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de estiagem que se inicia em agosto podendo se estender até outubro, apresentando com mais frequência, as vazões mínimas no mes de setembro, e um período de cheia intenso, que abrange de fevereiro a abril, onde as vazões máximas são encontradas mais frequentemente no mes de março. Particularmente, pode-se observar que a ascensão do cotograma de cheia é mais acelerada, enquanto a recessão diminui progressivamente na vazante.

4. CONCLUSÕES

Os dados altimétricos de nível de água do satélite ENVISAT, utilizando o algoritmo Ice-1, permitiram a caracterização e análise da variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Purus, A ferramenta VALS possibilitando a elaboração de estações virtuais, obtendo-se um grande número de medidas necessárias para a quantificação dos níveis de água que subsidiaram a análise do regime hídrico do Rio Japurá. O regime hídrico do rio demonstra ser multimodal à montante, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano e ascensões e recessões assimétricas. Ao longo do rio, conforme vai se aproximando da foz, ocorrem mudanças nos cotogramas que vão desde as diferenças nos meses de pico até a mudança de regime que passa para modal, em ocorrência das contribuições dos rios afluentes.

As séries temporais obtidas serão importantes em estudos futuros, para o nivelamento das estações *in situ* e para obtenção de perfis de declividades de estiagens e cheias, além de complementar e otimizar a rede básica hidrológica da bacia Amazônica.

AGRADECIMENTOS

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa CASAM (CNPq), DS BIODIVA e CLIVAR (FAPEAM), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère - CTOH do Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales - LEGOS*, pelos *Geophysical Data Records - GDRs* e as correções troposféricas correspondentes e à *European Space Agency - ESA* pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT disponibilizados para o estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (2011). Agência Nacional de Águas. Rede Hidrometeorológica da Amazônia. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/RHAmazonica.pdf>. Acesso: 26 de maio de 2011.

BITTENCOURT, M. M. e AMADIO, S. A. (2007). “Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em área de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus”. *Acta Amazônica*, v. 37, p. 303-308.

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

FRAPPART, F., *et al* (2006). Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin. *Remote Sens. Environ*, v. 100, n. 2, p. 252–264.

GOOGLE EARTH (2011), *Google Earth*, versão 6.0.3.2197. Google Inc.

MOLINIER, M. *et al.* (1995). “*Hydrologie du bassin de l’Amazonie*”, in *Actes du colloque PEGI Grands Bassins Fluviaux Péri Atlantiques*. By Olivry, J.C. et Boulègue, J. ORSTOM Editions, Paris, p. 335-344.

PAVLIS, N. K. *et al.* (2008). “Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008”, in: *Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*. Vienna, Austria, 13-18/04/2008. Disponível em: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html

ROUX, E. *et al.* (2010). “*Producing time-series of river height by means of satellite radar altimetry – Comparioson of methods*”. *Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences Hydrologiques*, v. 55, n. 1, pp. 104-120.

SILVA, J. S. *et al.* (2010). “Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS 2- ENVISAT radar altimetry missions”. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 2160-2181.

SILVA, J. S., 2010, *Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas*. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5

SEYLER, F. *et al.* (2008). “*Monitoring water level in large trans-boundary ungrauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over Amazon Bassin*”. *Journal of Applied Remote Sensing – SPIE* 7150, 715017; doi: 10.1117/12.813258.

UNEP (2004). Barthem, R. B., Charvet-Almeida, P., Montag, L. F. A. and Lanna, A.E. Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b. University of Kalmar, Kalmar, Sweden.

VALS, 2011, *Virtual ALtimetry Station*, Versão 1.0.3, 05/2011, COCHONNEAU, G. CALMANT, S. Disponível em: http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php

WEHR, T.; ATTEMA, E. Geophysical validation of ENVISAT data products. *Adv. Space Res.*, v. 28 (1), p. 8391, 2001.