

Interpolação diária de séries temporais altimétricas ao longo do rio Amazonas

Aline Corrêa de Sousa¹
Joecila Santos da Silva²
Phillipe Arantes Pereira³
Stéphane Calmant⁴
Frédérique Seyler⁵

¹ Universidade do Estado do Amazonas - UEA/EST
Av. Darcy Vargas, 1200, Parque 10 de novembro - 69065-020 - Manaus - AM, Brasil
alinecorrea.acs@gmail.com

² Universidade do Estado do Amazonas - UEA/CESTU
Av. Djalma Batista, 3578, Flores - 69050-010 - Manaus - AM, Brasil
jsdsilva@uea.edu.br

³ Universidade Federal do Amazonas – UFAM/FT
Av. General Rodrigo Otávio, 3000, Coroado - 69077-000 - Manaus - AM, Brasil
apphillipe@gmail.com

⁴ Institut de Recherche pour Le Développement - IRD/LEGOS/CNES/CNRS/IRD/UT3
14 av. Edouard Belin, 31400 - Toulouse - França
stephane.calmant@ird.fr

⁵ Institut de Recherche pour Le Développement - IRD/ESPACE-DEV
500 rue Jean François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5 - França
frederique.seyler@ird.fr

Abstract. Radar altimetry is a promising technique that can be used to complement in situ data conducted in watersheds studies where access is remote, as the Amazon basin. However, there is a limitation of the satellite altimetric: its low temporal resolution, ranging from 35 days of ENVISAT. This paper applies a methodology for obtaining a time series with a sampling period of a day. The method is based on a linear interpolation (OPT). Validation at the time series altimetric shows the results can be accurate to 11 cm RMS, offering the potential to observe these regions as part a long-term hydrological monitoring program. Estimates by the model indicate 63% of the time series were interpolated altimetric RMS_{alt} less than 40 cm, considered as satisfactory. Despite the limitation of the model, the quality of the estimated time series altimetric is also influenced by the altimetric data as the data in situ, in addition to the hydrodynamic or of the system. The interpolation of daily data enables altitudes estimated to be applied in several studies, such as hydrological and hydrodynamic modeling, and especially in monitoring short-term hydrological events such as droughts and floods, which are of great influence on society, economy and the environment itself.

Palavras-chave: hydrology, radar altimetry, altimetric daily time series, hidrologia, altimetria espacial, séries temporais altimétricas diárias.

1. Introdução

O uso do radar altimétrico é uma alternativa nova e promissora que permite o monitoramento do nível de água em grandes bacias hidrográficas, como a bacia Amazônica. Essa técnica chamada altimetria espacial (Calmant e Seyler, 2006) proporciona uma complementação de dados oriundos de satélites necessários para diversos estudos.

O radar altimétrico mede a altura instantânea entre a superfície da lâmina de água e o satélite, em relação a um elipsóide de referência a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas (Fu e Cazenave, 2001). As medições realizadas

pelo radar a bordo dos satélites possuem características distintas e certas limitações de acordo com a missão projetada.

Neste estudo, utilizaram-se medições realizadas pelo satélite ENVISAT (*ENVironmental SATelliTe*), que possui um período de amostragem de 35 dias. Essa baixa resolução temporal é uma das limitações de grande influência nas aplicações da altimetria espacial em estudos de processos hidrológicos que exijam um monitoramento em curto período de tempo, como alerta de enchentes, monitoramento de grandes cheias e análises da continuidade de fortes estiagens (Roux et al., 2008; Silva, 2010).

Desta forma, Roux et al. (2008) apresentaram uma solução para a baixa resolução temporal dos dados altimétricos, baseado em um modelo linear de interpolação, por meio do método de otimização de multicritérios (OPT), utilizando dados linimétricos para gerar séries temporais altimétricas diárias. Essa metodologia foi aplicada neste trabalho, com a finalidade de avaliar a qualidade de séries temporais altimétricas diárias na calha principal da bacia Amazônica. Neste estudo, não foi feita a análise de sensibilidade do modelo aplicado.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Dados

As séries temporais de cotas das estações linimétricas foram obtidas da rede hidrometeorológica da ANA (Agência Nacional de Águas), disponível no site Hidroweb, <http://hidroweb.ana.gov.br>, e do banco de dados do ORE-HYBAM (*The Environmental Research Observatory–Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alternation and material transport in the Amazon basin*), disponível no site Ore-Hybam, <http://www.ore-hybam.org>.

Os dados de estações altimétricas (*i.e.*, estações virtuais), foram tratados e disponibilizados pelo CTOH (*Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère*) do LEGOS (*Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales*). Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*) provenientes da missão altimétrica ENVISAT foram processados utilizando-se o algoritmo *standart* de tratamento de forma de onda (FO) *Ice-1*, e obtidos entre as coordenadas geográficas da área de estudo (Figura 1), 90°W a 40°W e 13°N a 21°S, onde extraíram-se do CTOH 90 traços, totalizando 93 ciclos entre o período de 10/2002 a 10/2010.

2.2 Estações virtuais e séries temporais altimétricas

Estação virtual (EV) é o ponto de cruzamento dos traços de órbita do satélite com o corpo de água na superfície terrestre. Para a elaboração das EV foi utilizada a ferramenta VALS, *Virtual ALtimetry Station* (VALS, 2012), com a finalidade de estimar a série temporal altimétrica provenientes da seleção a cada 35 dias.

As séries temporais altimétricas foram obtidas utilizando-se as medianas das medidas altimétricas associando-se uma dispersão à mediana, de forma a caracterizar a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Adicionalmente, as alturas elipsoidais da superfície da água das séries temporais altimétricas foram convertidas em alturas geoidais (*i.e.*, cota altimétrica) utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 (*Earth Gravity Model*) desenvolvido por Pavlis et al. (2008).

Neste trabalho foram elaboradas 75 estações virtuais ao longo do rio Solimões-Amazonas (Figura 1).

2.3 Validação dos dados altimétricos

Para a validação, utilizou-se o RMS (*Root Mean Square*) ou valor eficaz, considerando que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada, ou seja, adotou-se uma distância máxima

de 30 km entre a estação linimétrica e virtual. Desta forma, a qualidade das séries temporais altimétricas foi analisada através da comparação direta por regressão linear das medidas de ambas as estações.

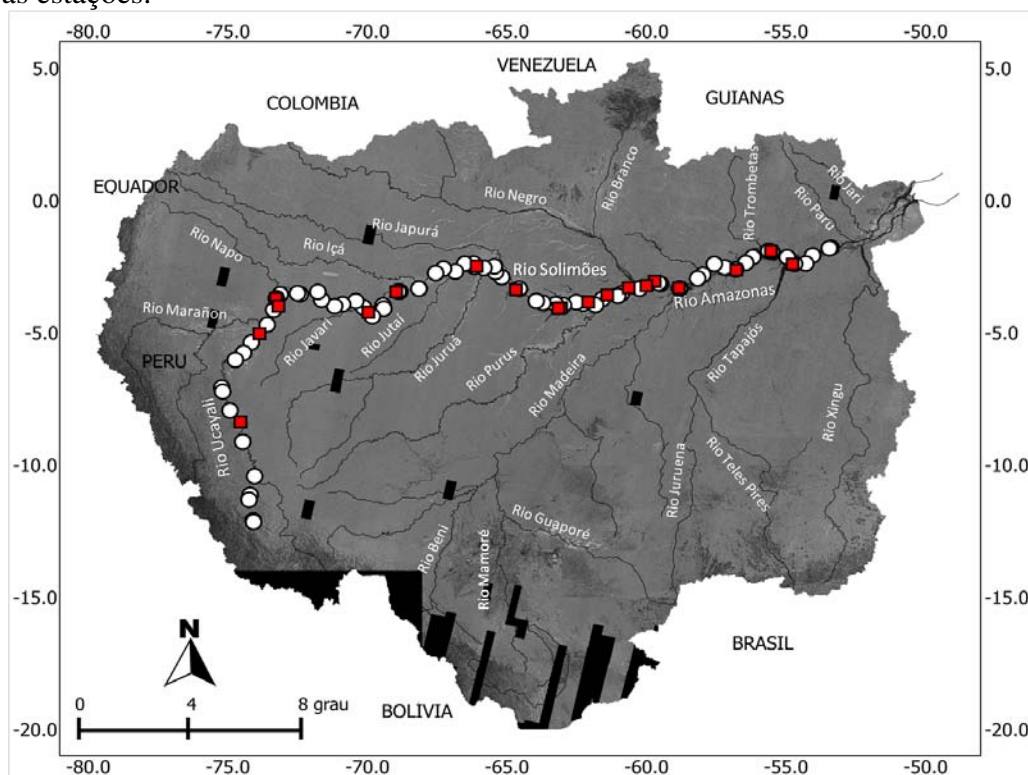


Figura 1. Estações linimétricas (quadrado vermelho) e virtuais (círculo branco) obtidas a partir do satélite ENVISAT sobre o rio Solimões-Amazonas. Mosaico de imagens JERS-1 no período de cheia, em segundo plano.

2.4 Série temporal altimétrica diária

A série temporal altimétrica diária é obtida através do método *Optimization with multi-objective criteria* (OPT), que se baseia na hipótese de que as características espectrais da série temporal de cotas dependem da localização ao longo do rio e, em particular, que as características espectrais de estações localizadas relativamente perto, no mesmo rio, são comparáveis. Mais detalhes são demonstrados no trabalho de Roux et al. (2008).

2.4.1 Indicador de desempenho da interpolação

Para verificar a acurácia do modelo em interpolar as medições realizadas a cada 35 dias, foi utilizado o RMS_{alt} .

3. Resultados e discussão

3.1 Validação das estações virtuais

O estudo de validação das séries temporais de cotas altimétricas (Figura 2) foi realizado com 4 estações linimétricas, sendo duas no rio Solimões e duas no rio Amazonas.

Os RMSs variam entre 15 cm a 48 cm e são comparáveis com os valores encontrados nos estudos de validação conduzidos por Silva et al. (2010), onde 70% das séries altimétricas apresentaram RMS inferior a 40 cm em rios da bacia Amazônica.

3.2 Série temporal altimétrica diária

Dentre as 75 EV elaboradas no rio Solimões-Amazonas, 29 não tiveram os dados altimétricos interpolados, em virtude de 24 apresentarem uma hidrodinâmica muito forte

associada à sua localização em regiões montanhosas e 5 estarem localizadas à jusante da estação linimétrica de Santarém (localizada na coordenada 2,416°S e 54,737°W), região onde há grande influência do efeito de maré, o que poderiam comprometer os resultados.

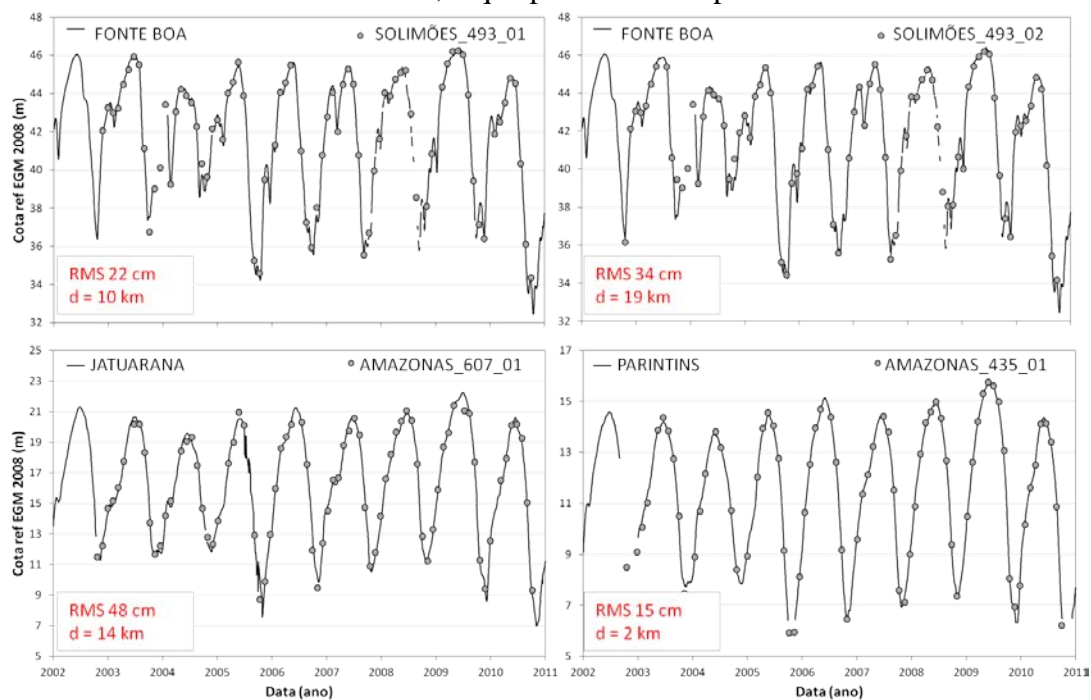


Figura 2. Validação das séries temporais de cotas altimétricas. Círculos e linhas contínuas correspondem às séries temporais altimétricas e linimétricas, respectivamente. A legenda em vermelho mostra o RMS encontrado e a distância (d) entre as estações.

3.2.1 Qualidade dos dados linimétricos

Como os dados linimétricos são as forçantes do modelo, logo as possíveis falhas existentes nesses dados comprometeram os resultados da interpolação. Das 46 EV interpoladas, em todos os casos confirmou-se que o modelo realizou a interpolação apenas em períodos com dados contínuos nas duas estações linimétricas de referência (Figura 3).

Adicionalmente, observou-se que todas as estações linimétricas apresentaram inconsistências consideráveis em seus dados, comprometendo a interpolação das séries temporais altimétricas no período de estudo. Outro comprometimento na interpolação ocorreu utilizando a estação linimétrica de Jatuarana, que possuía registros de cotas com “saltos”, o que também influenciou na estimativa diária de algumas séries altimétricas localizadas próximas a ela. A Figura 4 mostra a série temporal altimétrica diária da EV_564_02 localizada entre as estações linimétricas Manacapuru e Jatuarana, que sofreu influência da inconsistência dos registros de cotas da estação Jatuarana.

3.2.2 Qualidade dos dados altimétricos

A seleção dos dados altimétricos aparece como um fator primordial na qualidade final da série temporal estimada diariamente. Algumas situações como, por exemplo, locais com variações acentuadas de relevo e contaminação do eco do radar onde o meio não é uniforme, nos períodos de vazante ou enchente (Silva, 2010), dificultam a seleção dos dados altimétricos. Logo, algumas medidas altimétricas são ignoradas na estimativa, pois possuem dados cujos valores de cotas se distanciam das medições linimétricas. Esta eliminação de dados altimétricos pelo modelo visa seguir o regime hidrológico observado nos dados linimétricos na série altimétrica interpolada, uma vez que o modelo parte do princípio que estes são livres de erros, o que nem sempre ocorre (caso citado na Figura 4).

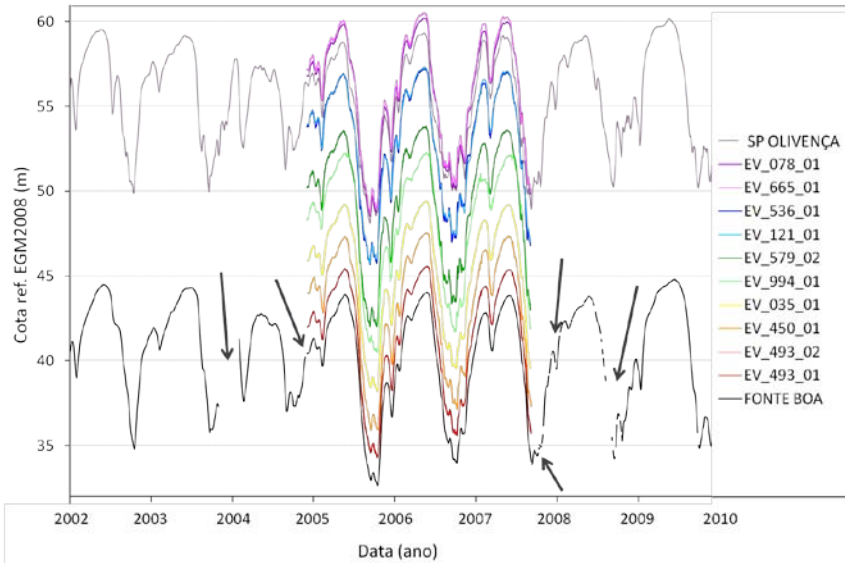


Figura 3. Séries temporais altimétricas diárias de estações virtuais localizadas entre as estações limimétricas de São Paulo de Olivença e Fonte Boa, distantes 460 km entre si, que mostram interpolações entre os anos de 2005 a 2008. As setas indicam a ausência de dados limimétricos.

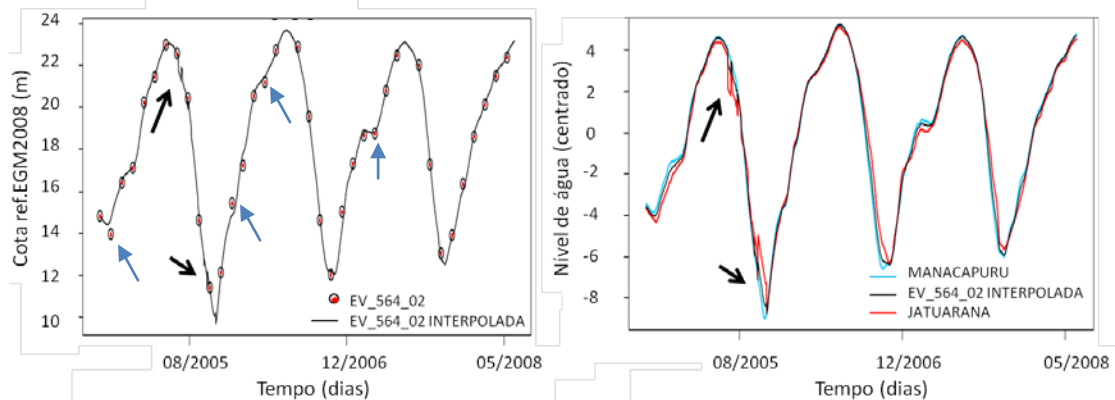


Figura 4. Série temporal altimétrica diária da EV_564_02 com inconsistência. À esquerda, círculos vermelhos e linha contínua correspondem às séries temporais altimétrica e altimétrica diária, respectivamente. À direita, séries limimétricas (em azul, estação à jusante, e, em vermelho, estação à montante da EV) e altimétrica diária (linha contínua preta). As setas pretas indicam as inconsistências nos registros de cotas da estação limimétrica e a influência na interpolação e as setas azuis indicam os dados altimétricos ignorados pelo modelo.

3.2.3 Subestimação ou superestimação na série temporal altimétrica diária

Das 46 EV interpoladas, 16 tiveram picos de cheia e vazante subestimadas ou superestimadas. Na Figura 5 observa-se um caso de subestimativa para a EV_951_02 e um caso de superestimativa para a EV_779_02.

As relações fundamentais da hidrologia estabelecem, *a priori*, que o nível de água à montante do rio seja sempre mais elevado do que à jusante do rio, sendo esta regra simples aplicada para verificar a consistência hidrodinâmica dos conjuntos de dados utilizados.

Nestes casos, os valores de cotas altimétricas estimados pelo modelo foram alterados causando cheias e vazantes mais fortes ou mais fracas. Isso ocorreu devido à amplitude dos dados altimétricos selecionados, que faz com que o modelo ajuste a curva de resultado verificando a similaridade entre as séries limimétricas e altimétricas.

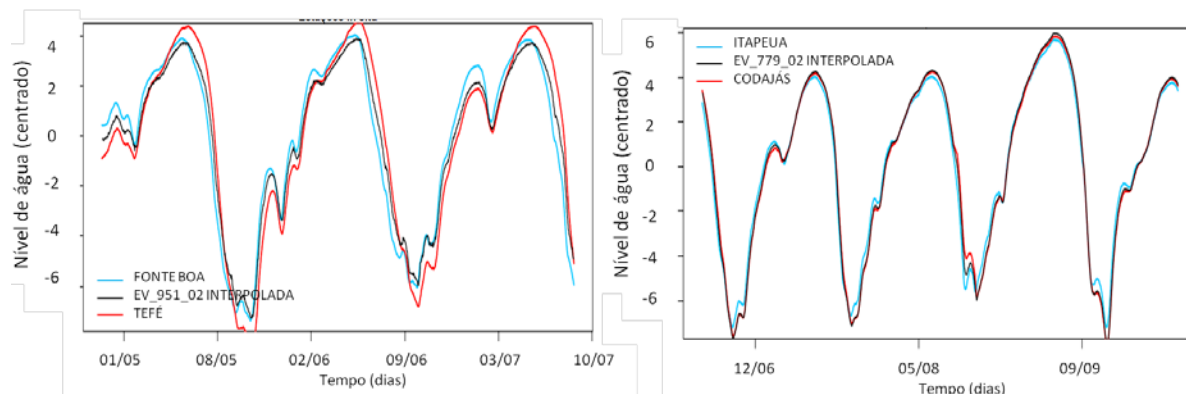


Figura 5. Séries temporais linimétricas à jusante (linha contínua azul) e à montante (linha contínua vermelha) da série temporal altimétrica diária (linha contínua preta). À esquerda tem-se um caso de subestimativa na EV_951_02 e à direita um caso de superestimativa na EV_779_02.

3.2.4 Mudanças de hidrodinâmica

No caso de mudança na hidrodinâmica do rio, notaram-se diferenças entre as séries temporais linimétricas à montante e à jusante das EV interpoladas. Na Figura 6, o comportamento das séries temporais linimétricas e altimétricas estimadas são influenciadas por esta mudança, onde a série temporal de Tefé apresentou características mais suavizadas de cheia, enquanto que na série temporal de Coari observaram-se picos mais elevados, no ano de 2004.

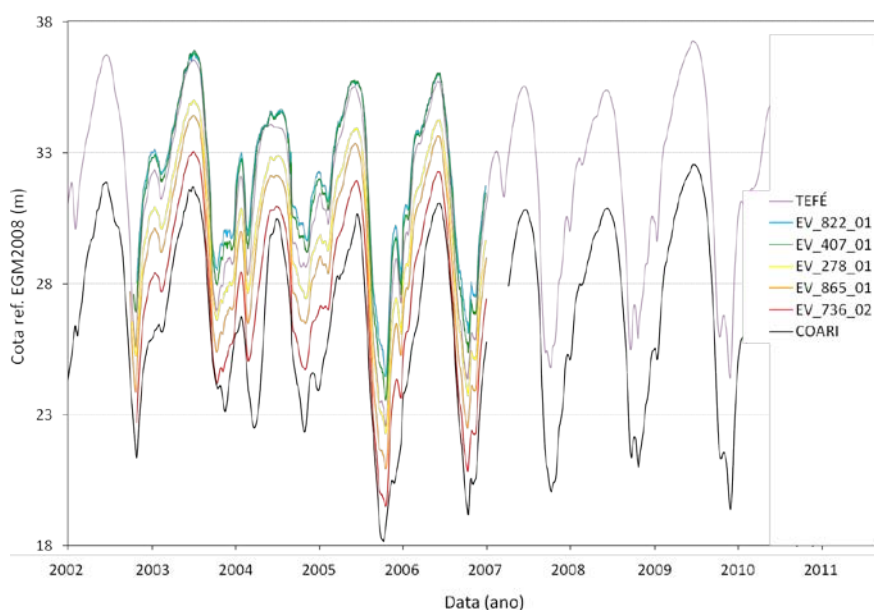


Figura 6. Séries temporais altimétricas diárias estimadas entre as estações linimétricas Tefé e Coari, distantes 226 km.

Como o modelo leva em consideração duas estações linimétricas para estimar as cotas diárias das EV, e como o ajuste da curva de resultado é feito entre as duas séries temporais, a interpolação não é satisfatória nesses casos.

3.2.5 Resultados satisfatórios

A Figura 7 mostra a EV_435_01 localizada entre essas estações linimétricas, no qual obteve um dos menores RMS_{alt} . O modelo, neste caso, representou bem a interpolação, pois se observou que as curvas de resultados seguiram o sinal das séries temporais de referência. Em outras palavras, a função interpoladora não se afastou muito dos pontos da função das cotas altimétricas.

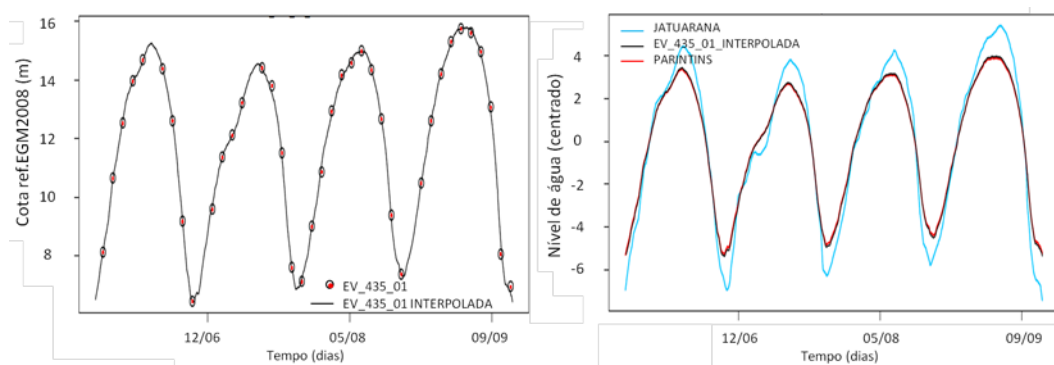


Figura 7. Série temporal altimétrica diária satisfatória. À esquerda têm-se medições altimétricas a cada 35 dias do satélite ENVISAT (círculo vermelho) e série temporal altimétrica diária de EV_564_02 (linha contínua preta). À direita, séries limimétricas (em azul tem-se a estação à jusante, e, em vermelho, a estação à montante da EV) e altimétrica diária (preto).

3.3 Avaliação de desempenho da interpolação

O RMS_{alt} entre as diferenças de níveis de água altimétricos interpolados e selecionados apontam que, aproximadamente, 63% (29 EV) das séries temporais interpoladas apresentaram RMS_{alt} inferior a 40 cm, 15% (7 EV) apresentaram valores entre 41 e 50 cm, 6% (3 EV) apresentaram valores entre 51 e 60 cm, 7% (3 EV) apresentaram valores entre 61 e 80 cm, e 9% (4 EV) apresentaram valores próximos a 100 cm (Tabela 1).

Tabela 1. RMS_{alt} das séries temporais altimétricas diárias, provenientes do satélite ENVISAT, no rio Solimões-Amazonas.

Estação virtual (EV)	RMS_{alt} (cm)	Amostras (ciclos)	Estação virtual (EV)	RMS_{alt} (cm)	Amostras (ciclos)	Estação virtual (EV)	RMS_{alt} (cm)	Amostras (ciclos)
EV_764_01	11	21	EV_693_01	105	35	EV_951_01	77	26
EV_349_01	26	23	EV_106_01	49	41	EV_908_01	32	25
EV_306_01	36	25	EV_235_01	20	26	EV_493_01	19	25
EV_893_01	35	27	EV_650_01	23	24	EV_493_02	25	25
EV_850_01	19	29	EV_779_01	19	39	EV_450_01	22	27
EV_435_01	12	38	EV_779_02	47	39	EV_035_01	25	28
EV_392_01	59	41	EV_192_01	25	39	EV_994_01	106	26
EV_979_01	39	40	EV_321_01	54	40	EV_579_02	47	24
EV_936_01	36	40	EV_736_02	63	35	EV_121_01	27	26
EV_521_01	24	39	EV_865_01	44	42	EV_536_01	32	25
EV_063_01	18	36	EV_278_01	74	38	EV_665_01	44	24
EV_478_02	24	41	EV_407_01	106	38	EV_078_01	45	27
EV_020_01	44	38	EV_822_01	97	35	EV_207_01	21	46
EV_607_01	37	39	EV_364_01	23	26	EV_207_02	17	46
EV_149_01	23	35	EV_951_02	52	26	EV_622_01	23	49
EV_564_02	30	36						

Conforme citado anteriormente, o modelo estima a série temporal altimétrica apenas em um intervalo contínuo de dados limimétricos. Para comprovar o fato, nota-se na Tabela 1 a baixa quantidade de pares (ciclos) utilizados nas interpolações. De 84 ciclos válidos das medidas altimétricas, poucos foram utilizados. O máximo corresponde a 58% (49 ciclos) e, o mínimo, 27% (23 ciclos), da amostra altimétrica. Ou seja, a interpolação realizada conseguiu estimar a série temporal altimétrica diária com um período máximo de aproximadamente 5 anos, enquanto que a menor série estimada conseguiu interpolar apenas 3 anos consecutivos.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que o método OPT é uma solução para a melhoria da resolução temporal dos dados altimétricos, possibilitando a elaboração de séries

temporais altimétricas e auxiliando na eficiência de estudos de processos hidrológicos, como eventos extremos de seca ou cheia, nos quais a sociedade e economia sofrem grande influência, bem como o próprio sistema ambiental. Entretanto, as maiores dificuldades encontradas nos valores estimados são causados por inconsistências nos dados de referência. Observou-se que o modelo tende a truncar as séries estimadas quando não há uma continuidade nos dados linimétricos. Contudo, as curvas de resultados, apesar de interpoladas em curtos períodos, demonstraram-se satisfatórias. A precisão das séries temporais altimétricas diárias analisadas é de ordem decimétrica: 63% das séries interpoladas do satélite ENVISAT apresentaram RMS_{alt} inferior a 40 cm, com valores mínimos de 11 e 12 cm. Diante desses resultados, fundamenta-se, portanto, a utilização dos dados altimétricos diários estimados em hidrossistemas continentais.

Em trabalhos futuros, para se obter melhores resultados, recomenda-se fazer a consistência dos dados linimétricos a fim de minimizar os erros propagados nas estimativas. Da mesma forma deve ser feito com os dados altimétricos, pois se alguma EV tiver com a seleção de dados ruidosa, deve-se tentar corrigir para que a interpolação seja mais coerente.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelos projetos de pesquisa IHESA (FINEP), CASAM (CNPq), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM), FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de Apoio Técnico em Extensão no País cedida ao primeiro autor. 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. À Agência Nacional de Águas - ANA, pelos dados linimétricos. Ao *Global Rain Forest Mapping* - GRFM, pela imagem do satélite JERS-1.

Referências Bibliográficas

- Calmant, S.; Seyler, F. Continental surface water from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geosciences**, v. 338, n. 14-15, p. 1113-1122, 2006. doi: 10.1029/2001JD000609
- Fu, L. L., Cazenave, A., 2001, **Satellite Altimetry and Earth Science, A Handbook of Techniques and Applications**. London (UK), Academic Press., 464p.
- Pavlis, N.K.; Holmes, S.A.; Kenyon, S.C.; 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> . Acesso em: 06.out.2012.
- Roux, E.; Cauhopé, M.; Bonnet, M-P.; Calmant, S.; Vauchel, P.; Seyler, F. Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring. **Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologique**, v. 53, n. 1, p. 81-99, 2008. doi: 10.1623/hysj.53.1.81
- Silva, J. S. **Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica – Aplicações Hidrológicas**. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5, 2010, 360 p.
- Silva, J. S.; Calmant, S.; Seyler, F.; Rotunno Filho, O.C.; Cochonneau, G.; Mansour, W.J. Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS 2 - ENVISAT radar altimetry missions. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2160-2181, 2010. doi: 10.1016/j.rse.2010.04.020
- VALS Tool. **Virtual ALtimetry Station**, Versão 1.0.6, 06/2012. Cochonneau, G.; Calmant, S. <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php>. Acesso em: 06.out.2012.