

## Validação das medidas dos níveis de água fornecidas pelos satélites altimétrico ENVISAT e SARAL na bacia amazônica

Tainá Sampaio Xavier Conchy<sup>1,2</sup>  
Francis Wagner Silva Correia<sup>1</sup>  
Stephane Calmant<sup>3</sup>  
Joecila Santos da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amazonas – UEA  
Av. Darcy Vargas, 1200, Parque 10 – CEP 69050-020, Manaus, AM, Brasil  
tainaconchy@gmail.com, jsdsilva@uea.edu.br, francis.wagner70@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA  
Av. André Araújo, 2936, Petrópolis – CEP 69067-375, Manaus, AM, Brasil

<sup>3</sup> Institut de Recherche pour le Developpement – IRD  
UMR 5566 LEGOS/ Observatoire Midi Pyrenées  
14, Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France  
stephane.calmant@ird.fr

**Abstract.** Initially, in the 70s, the altimetry satellites work only with the determination of the topography and the surface of the oceans. However, due to its global coverage, was initiated measurements of surface continental waters and currently the altimetry measurements are also obtained for rivers of the Amazon basin, whose hydrologic information is difficult to obtain due to the inaccessibility of the region, either by poor distribution of gauged stations or the slow dissemination of data. Thus, altimetry satellites are an alternative to the monitoring of height variations of water blade in continental hydrosystems. In this work the external validation (corresponding to altimetry measurements of satellite water levels SARAL with data obtained in gauged stations in rivers Solimões and Amazon) was performed to rivers of the Amazon basin through the standard deviation calculation. The validation results for SARAL satellite between traits in crossing points, standard deviation values are from 0,16 to 1,19 m rivers whose widths ranging between 40 m to 600 m.

**Palavras-chave:** radar altimetry, altimetry data validation, altimetria espacial, validação de dados altimétricos.

### 1. Introdução

Embora o monitoramento hidrológico das águas continentais sofra dependência de dados de observação *in situ*, tais dados observacionais convencionais apresentam restrições seja pela inexistência de infraestrutura adequada ou pela dificuldade de acesso em áreas remotas. A aplicação dos dados provenientes dos satélites altimétricos pode ser complementar a essas medidas, especialmente em regiões onde as redes de observações hidrológicas tradicionais são inexistentes ou os registros foram interrompidos, um fato recorrente na bacia Amazônica, dada sua extensão; bem como a bacia Amazônica ser formada por vários países da América do Sul, o que dificulta a obtenção dos dados além da fronteira brasileira.

Os satélites altimétricos medem a altura instantânea da superfície de um corpo de água através da emissão de uma onda eletromagnética no nadir do satélite – termo utilizado para definir a perpendicular à superfície terrestre a partir do satélite – e pela medida do intervalo de tempo que separa a emissão da onda, da recepção de um eco (retorno da onda emitida), conforme descrito em Fu e Cazenave (2000).

Neste estudo, a qualidade dos dados altimétricos dos rios Amazônicos, aqui denominada de validação interna, é analisada através de um balanço do erro das medidas dos níveis de água nos pontos de cruzamento (PDC) entre duas órbitas dos satélites ENVISAT (*ENVironmental SATellite*) e SARAL (*Satellite with ARGos and ALTiKa*) com os corpos hídricos, visto que as medidas são adquiridas pelos satélites de forma autônoma (Figura 1).

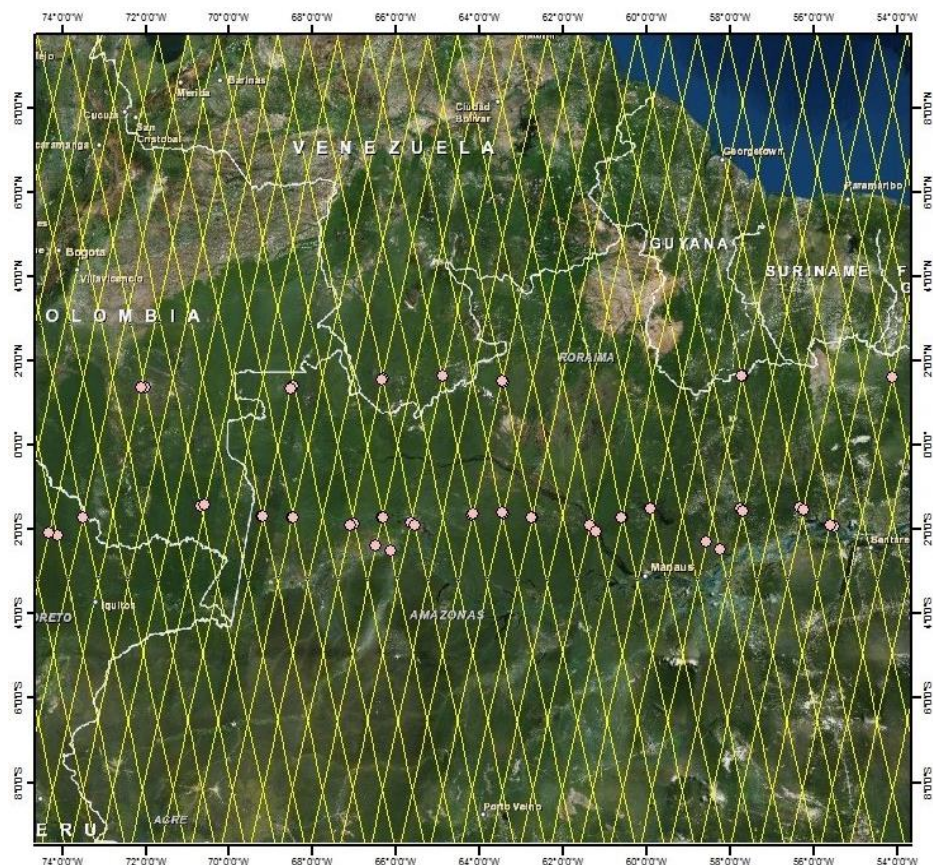


Figura 1. Localização das estações virtuais (pontos em rosa claro) localizadas na bacia amazônica, objeto deste estudo, e a cobertura espacial das missões ENVISAT e SARAL (traços amarelos). Mosaico de imagens *Google Earth* em segundo plano.

## 2. Metodologia do Trabalho

### 2.1 Dados altimétricos

As missões altimétricas ENVISAT e SARAL possuem órbita com inclinação de  $98,5^\circ$ , cuja órbita elíptica hélio-síncrona está a 785 km de altitude média e distância inter-traço no Equador de aproximadamente 80 km (Silva, 2010) e resolução temporal de 35 dias, mas possuem diferentes períodos de disponibilidade bem como suas respectivas frequências. O período de disponibilidade do satélite ENVISAT compreende os anos de 2002 a 2010, já o satélite SARAL compreende os anos de 2013 a 2016.

Enquanto o satélite ENVISAT operava nas bandas Ku (13,6 GHz) e S (3,2 GHz), o satélite SARAL opera na banda Ka (35,7 GHz). A mudança de banda de um satélite para o outro se deu por fatores como, por exemplo, a necessidade um satélite com menor custo para obter dados altimétricos entre as missões ENVISAT e SENTINEL-3A, quando o satélite trabalha em apenas uma banda, as agências responsáveis (CNES e o ISRO) poupam custos tanto financeiros quanto energéticos na correção ionosférica; além disso, o satélite SARAL ajuda na preparação dos dados para o satélite SWOT (*Surface Water Ocean Topography*) previsto para lançamento em 2020.

Para este estudo, os dados providos das missões foram obtidos entre as coordenadas geográficas desde  $78^\circ$  de longitude oeste a  $52^\circ$  longitude oeste e  $4^\circ$  de latitude norte a  $4^\circ$  de latitude sul, utilizam como algoritmo *standard* de tratamento de FO *Ice-1*. Foram extraídos do CNES 56 dos 1002 traços, num total de 93 ciclos de 10/2002 a 10/2010 e 35 ciclos de 02/2013 a 05/2016 para os satélites ENVISAT e SARAL, respectivamente.

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Elaboração de estações virtual

Uma estação virtual pode ser designada como um conjunto de medições de dados altimétricos conseguidos quando há um cruzamento do satélite com o rio (Calmant e Seyler, 2006), onde é possível obter uma série temporal da altura do plano de água (Silva, 2010). Aplicou-se a metodologia descrita em Silva *et al.* (2010) na criação das estações virtuais, que são resultado da seleção dos dados correspondentes ao cruzamento com plano de água, adaptadas às variações no tempo e no espaço através dos programas Google Earth 7.1.7.2606 (Google Earth, 2016) e VALS (Virtual Altimetry Station) (VALS, 2015). A metodologia foi validada por Roux *et al.* (2010). Essa metodologia permite que a seleção tridimensional dos dados seja realizada em um espaço superfície-profundidade através do programa VALS (utilizando o mosaico de imagens do Google Earth como segundo plano) onde é possível a aplicação de 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*). Com o emprego da ferramenta VALS, houve considerável aumento na confiabilidade de seleção dos dados altimétricos, sob qualquer plano de água para cada passagem do satélite.

### 2.2.2 Validação Interna dos dados altimétricos a partir de comparação nos pontos de cruzamentos dos traços dos satélites

Sobre os corpos hídricos na bacia Amazônica existem PDCs dos traços das órbitas dos satélites ENVISAT e SARAL que proporcionam a oportunidade de executar a validação interna dos dados altimétricos, em razão das medidas serem adquiridas de forma independente. Todavia, as duas passagens no PDC não ocorrem simultaneamente, ou seja, na mesma data. E, por isso, para a presente proposta de pesquisa a análise se restringe aos cruzamentos com defasagem inferiores a 2 dias, considerando que durante esse intervalo – entre as passagens de um traço e outro – o nível do rio não variou substancialmente, seguindo a metodologia descrita em Silva *et al.* (2010).

Primeiramente, calcula-se o tempo de revisita (intervalo de tempo que satélite leva para passar outra vez em determinado local) entre um traço e outro pelas equações:

$$\Delta t_m = \frac{\text{MIN}[(N_1 - N_2), (N_T - (N_1 - N_2))]}{N_t} R_s \quad (1)$$

$$\Delta t_M = \frac{\text{MAX}[(N_1 - N_2), (N_T - (N_1 - N_2))]}{N_t} R_s \quad (2)$$

Onde  $\Delta t_m$  é o tempo de revisita com menor intervalo de tempo,  $\Delta t_M$  é o tempo de revisita com maior intervalo de tempo,  $N_1$  e  $N_2$  são os números dos traços dos satélites,  $N_T$  é igual ao total de traços do satélite e  $R_s$  é o tempo de revisita total do satélite, que depende de parâmetros orbitais. Para os satélites ENVISAT e SARAL  $N_T$  e  $R_s$  são os mesmos, 1002 e 35 dias, respectivamente.

Em seguida, calcula-se o desvio padrão (Equação 03) entre as medidas altimétricas, das séries temporais, das duas passagens do satélite:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n}} \quad (3)$$

Onde  $n$  é o número de medidas (ciclos),  $H_{1,i}$  a medida da altura  $H_{2,i}$  é a média da altura.

### 3. Resultados e Discussão

Este trabalho está fundamentado na análise dos dados altimétricos provenientes dos satélites ENVISAT e SARAL de vários rios da bacia amazônica, com larguras que variam de 40 m a 9,76 km e amplitudes variando de 1,71 a 8,84 m. Resultando em um conjunto de 36 PDCs, a partir de 144 estações virtuais, provenientes do algoritmo Ice-1, cujos dados foram analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas.

Todos os casos estudados possuem tempo de revisita de, somente, 1,5 dia, intervalo no qual é considerado que o rio esteja em equilíbrio hidrodinâmico e que não haja mudanças significativas no nível de água entre as passagens dos mesmos ciclos.

Os PDCs, descritos na Tabela 1, foram separados em classes relacionadas ao valor do desvio padrão, para melhor análise do desempenho do satélite SARAL em relação ao satélite ENVISAT, conforme Figura 2.

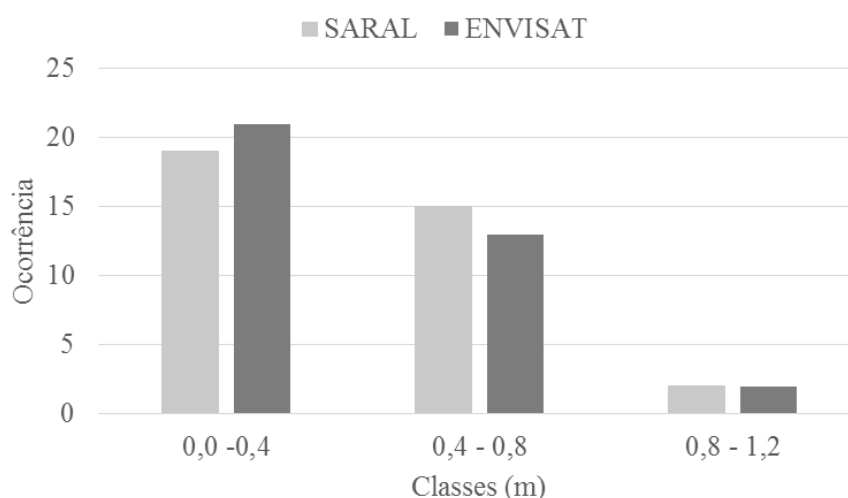


Figura 2. Histograma de classes do desvio padrão para os satélites ENVISAT (barras em cinza escuro) e SARAL (barras em cinza claro).

Na primeira classe ocorreram 19 casos, que representam 52,8 % da amostragem total. O intervalo dos valores de desvio padrão que fazem parte desta classe compreende de 0,16 m, em dois PDCs no rio Unini (traços 822 e 865 e traços 192 e 235, respectivamente) e 0,37 m nos PDCs entre os traços 250 e 293 no rio Cahuinari e entre os traços 478 e 521, no rio Jatapú. Entre estes casos, evidenciam-se dois padrões de rios: rios retilíneos cujas larguras encontram-se entre 40 m e 6,4 km, com elevação variando de 35 a 65 m, além da presença de ilhas; e rios meandrosos e entrelaçados com larguras inferiores a 200 m, cujos valores da elevação variam: abaixo de 50 m e acima de 100 m.

As séries temporais, ilustradas na Figura 3, correspondem ao PDC dos traços 450 e 493, do rio Japurá, distantes 3 km um do outro, localizado em um ponto do rio cuja largura é de 3 km e equivale a 4,5 % do valor total da amplitude. Observa-se um melhor desempenho do satélite SARAL em relação ao satélite ENVISAT, com desvios padrão de 0,25 e 0,27 m, respectivamente. O aproveitamento dos pares de ciclos das estações virtuais é representativo, com 14 e 10 ciclos, respectivamente.

A classe 2 é composta por casos em que o desvio padrão varia de 0,4 m, no PDC dos traços 865 e 809, no rio Siapa, a 0,72 m, no PDC entre os traços 650 e 693, no rio Negro. Houve ocorrência de 15 casos que representam 41,7 % da amostragem total. O perfil que melhor retrata os resultados da classe é configurado por rios estreitos e meandrosos, com larguras entre 40 e 205 m e elevação entre 90 e 200 m.



Tabela 1. Desvio padrão entre os pontos de cruzamento para os satélites altimétricos ENVISAT e SARAL, distâncias entre os traços e aproveitamento dos pares de ciclo.

Pontos de Cruzamento	$\sigma$ (m)		Distância entre traços (km)	Aproveitamento dos Pares de Ciclos	Pontos de Cruzamento	$\sigma$ (m)		Distância entre traços (km)	Aproveitamento dos Pares de Ciclos		
	ENVISAT	SARAL				ENVISAT	SARAL				
Ajuricaba	779x822	0,93	0,70	6	[21/19]	Jatapu	478x521	0,37	0,37	40	[16/18]
Amazonas	306x349	0,54	0,86	13	[12/19]	Kwini	364x407	0,19	0,27	14	[18/20]
Amazonas	678x721	0,35	0,66	7	[18/18]	Napo	422x465	0,29	0,44	23	[19/18]
Camu	435x478	0,33	0,43	2	[18/18]	Nhamundá	936x979	0,55	0,72	18	[20/20]
Cahuinari	250x293	0,59	0,37	15	[21/21]	Negro	650x693	0,47	0,70	21	[18/15]
Chaira	465x508	0,67	0,56	26	[19/19]	Pardo	106x149	0,19	0,33	3	[19/19]
Cuiari	121x164	0,43	0,34	9	[20/20]	Paricatuba	994x035	0,30	0,53	14	[15/20]
Curaray	007x966	0,40	0,49	61	[21/20]	Siapa	865x809	0,68	0,40	3	[19/20]
Curaray	050x093	0,82	0,65	11	[18/18]	Solimões	450x493	0,32	0,43	40	[16/18]
Içá	880x923	0,29	0,28	3	[18/17]	Tigre	050x093	0,69	0,58	37	[21/21]
Içanã	622x579	0,47	0,66	21	[18/16]	Trombetas	850x893	0,38	0,24	10	[10/16]
Japurá	450x493	0,27	0,25	3	[14/10]	Uatumã	564x336	0,19	0,19	8	[18/18]
Japurá	078x121	0,32	0,22	3	[19/19]	Uaupés	293x336	0,44	1,19	11	[19/18]
Japurá	622x665	0,41	0,18	1	[11/17]	Unini	822x865	0,21	0,16	2	[15/18]
Japurá	708x751	0,46	0,26	12	[13/05]	Unini	278x321	0,16	0,21	4	[19/19]
Japurá	994x035	0,21	0,29	11	[18/19]	Unini	192x235	0,20	0,16	3	[20/17]
Japurá	951x908	0,37	0,33	11	[17/18]	Unini	736x779	0,23	0,62	4	[18/17]
Jari	721x764	0,20	0,26	2	[18/17]	Yatuá	951x994	0,32	0,20	1	[18/17]

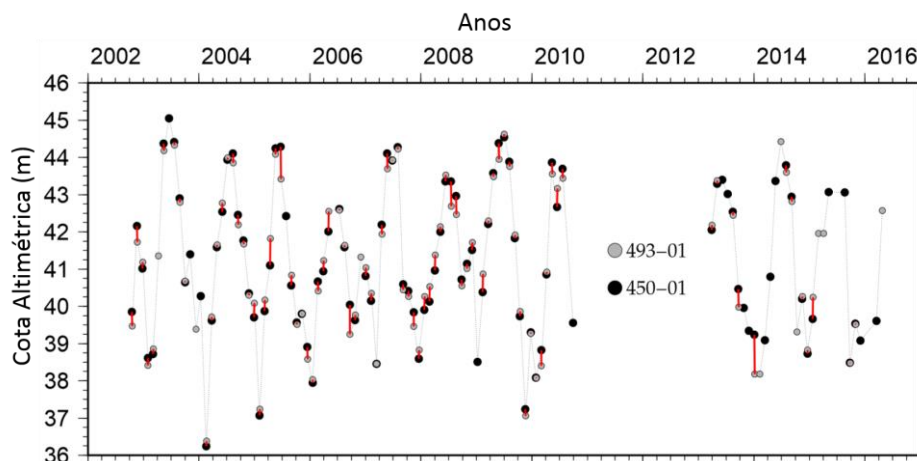


Figura 3. Séries temporais altimétricas para o cruzamento dos traços 493 e 450, dos satélites ENVISAT (entre 2002 e 2010) e SARAL (entre 2013 e 2016), no rio Japurá.

O ponto de cruzamento dos traços 435 e 478, a 2 km distantes um do outro, no rio Camu (Figura 4), localiza-se em um ponto do rio cuja largura é de 40 m e, que correspondente a 13,7 % do valor total da amplitude, apresenta um desvio padrão de 0,43 m. Verificando-se o desempenho do satélite SARAL em relação aos valores de desvio padrão encontrados para o satélite ENVISAT (0,33 m), observa-se um pior desempenho do satélite SARAL, para este caso, com um aumento do desvio padrão em 0,10 m. O aproveitamento dos pares de ciclos das estações virtuais é bom, com 18 ciclos para os dois satélites.

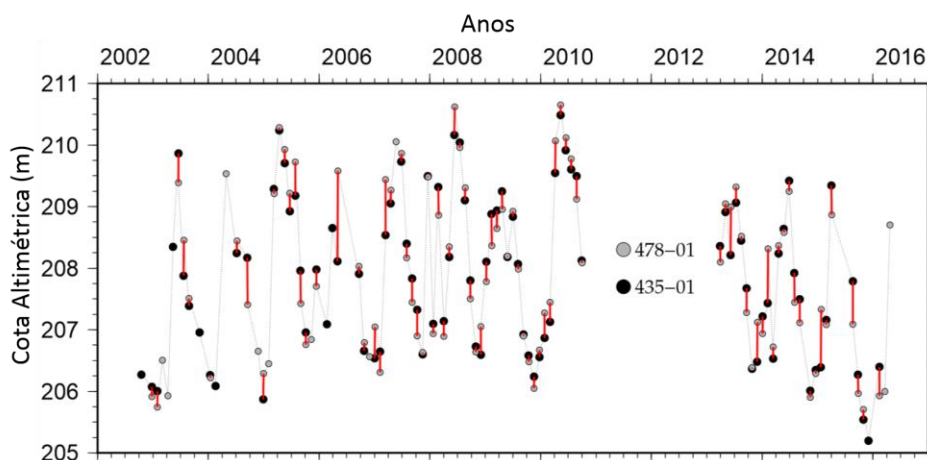


Figura 4. Série temporal altimétrica para o cruzamento dos traços 478 e 435 dos satélites ENVISAT (entre 2002 e 2010) e SARAL (entre 2013 e 2016), no rio Camu

Na classe 3, ocorreram apenas dois casos, que representam 5,5% da amostragem total: 0,86 m, no PDC entre os traços 306 e 349, no rio Amazonas, onde o rio possui 5,3 km de largura e está 5 m acima do nível do mar, e 1,19 m, no PDC dos traços 293 e 336, no rio Uaupés, que está localizado em altitudes elevadas e sua largura é aproximadamente 110 m.

O alto valor do desvio padrão de 1,19 m, no ponto de cruzamento dos traços 336 e 293, no rio Uaupés (Figura 5), localizado em um ponto do rio cuja largura é de 120 m e os traços estão 11 km distantes um do outro, que correspondente a 13,7 % do valor total da amplitude, pode ser justificado pela topografia local da estação virtual, em altitudes elevadas. Embora o aproveitamento dos pares de ciclos das estações virtuais seja bom, com 19 e 18 ciclos para os dois satélites, a obtenção dos dados altimétricos nesse tipo de topografia é difícil, pois o meio

não é uniforme, o altímetro é perturbado pelo desnível acentuado do relevo, perdendo a ancoragem e não consegue medir a superfície da lâmina de água.

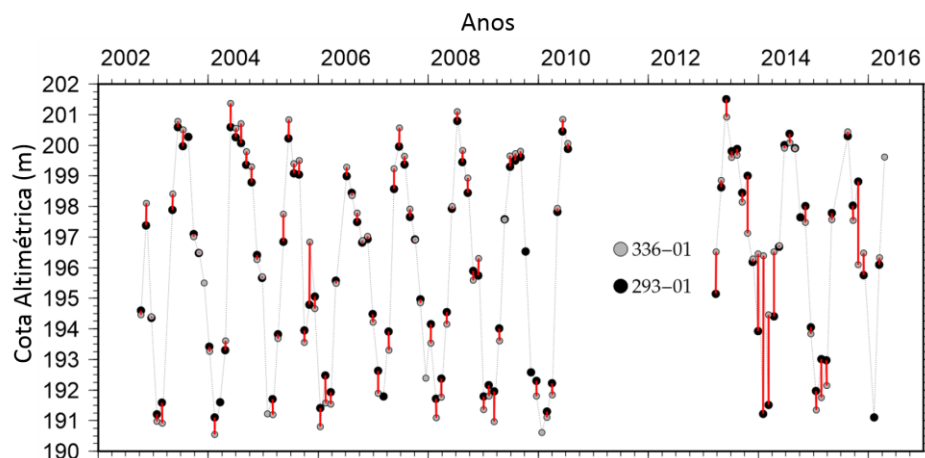


Figura 5. Série temporal altimétrica para o cruzamento dos traços 336 e 293 dos satélites ENVISAT (entre 2002 e 2010) e SARAL (entre 2013 e 2016), no rio Uaupés.

O histograma dos desvios padrão entre os PCDs é mostrado em Figura 6. A qualidade dos dados altimétricos dos dois satélites são bastante similares, 90% apresentam desvio padrão inferior a 40 cm.

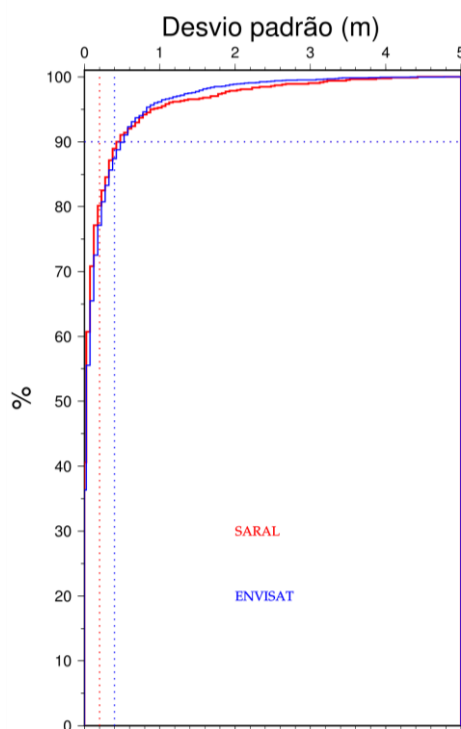


Figura 5. Histograma dos desvios padrão entre os dados altimétricos nos PCDs.

### 3. Conclusões

Este estudo teve por objetivo executar a validação dos dados altimétricos através de um balanço do erro das medidas dos níveis de água dos rios Amazônicos com finalidade de fornecer uma base segura que garanta a qualidade dos dados medidos pelos satélites altimétricos ENVISAT e SARAL.

A validação foi realizada através das comparações interna, quando as medidas resultantes de pontos de cruzamento entre duas órbitas dos satélites com os corpos hídricos, onde verificou-se que os valores de desvio padrão para bacia amazônica variam entre 0,16 e 1,19 m, em rios com larguras distintas, entre aproximadamente 40 m e superior a 6000 m. Distribuíram-se os resultados em três classes com 90% dos resultados apresentando desvio padrão inferior a 40 cm e com bons aproveitamentos de pares de ciclos.

Enquanto o satélite ENVISAT oferece melhores resultados em rios mais largos e na planície, observou-se uma considerável melhora no desempenho do satélite SARAL, quando relacionado com o seu antecessor, para rios estreitos e em regiões de elevação. Supõe-se que essas peculiaridades estejam relacionadas à largura da faixa imageada dos satélites: o satélite SARAL possui 100 m de faixa imageada, ao passo que o satélite ENVISAT possui 4 km.

Por fim, notou-se que o satélite SARAL se mostra confiável e é fonte de dados importantes para a continuidade dos dados da família altimétrica ERS-1, ERS-2 e ENVISAT, oferecendo a possibilidade da utilização dessas medições como parte de um sistema de monitoramento integrado com os dados *in situ*.

### **Agradecimentos**

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de mestrado, 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; à European Space Agency- ESA e ao Centre National d'Études Spatiales - CNES pela garantia do uso dos dados das missões ENVISAT e SARAL e aos alunos do Laboratório RHASA.

### **Referência Bibliográfica**

Calmant, S.; Seyler, F. Continental surface water from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geosciences**. v. 338, n. 14, p. 1113-1122, 2006.

Fu, L. L.; Cazenave, A. **Satellite Altimetry and Earth Science: A Handbook of Techniques and Applications**. London (UK), Academic Press, 2000, 464 p.

*Google Earth*, versão 7.1.7.2606. Google Inc. 2016.

Roux, E.; Silva, J. S.; Getirana, A. C. V.; Bonnet, M. P.; Calmant, S.; Martinez, J. M.; Seyler, F. Producing time-series of river height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods. **Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 1, p. 104-120, 2010.

Seyler, F.; Calmant, S.; Silva, J.S.; Filizola, N.; Roux, E.; Cochonneau, G.; Vauchel, P.; Bonnet, M-P. Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basins with altimetry: the example of ENVISAT over the Amazon basin. **Asia-Pacific Remote Sensing**, p. 715017-715017-17, doi:10.1117/12.813258. 2008.

Silva, J. S. **Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas**. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. 360p, 2010

Silva, J. S.; Calmant, S.; Seyler, F.; Rotunno Filho, O. C.; Cochonneau, G.; Mansur, W. J. Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS 2- ENVISAT radar altimetry missions. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2160-2181, 2010.

VALS. *Virtual ALtimetry Station*, Versão 1.08.8, 03/2015, Hybam/GET/LEGOS/IRD. 2015.