

Caracterização do Regime Hidrológico do Rio Madre de Dios utilizando Altimetria Espacial

Jossandra Alves Damasceno^{1,2}
Fabiana Nunes Abinader Rios²
Adrien Paris³
Stéphane Calmant³
Joecila Santos da Silva²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia- INPA
Av. André Araújo, 2936- Petrópolis, Manaus - AM ,69067-375
joba.alves@gmail.com

² Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Av. Darcy Vargas, 1200 - Parque Dez, Manaus - AM, 69050-020
fabiana.abinader@gmail.com
jsdsilva@uea.edu.br

³ Institut de Recherche pour le Développement – IRD (UMR 5566
LEGOS – CNES/CNRS/IRD/UT3)
14 Av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France.
adrien.paris@legos.obs-mip.fr
stephane.calmant@ird.fr

Abstract. Southwestern Amazonia, where Bolivia, Peru and Brazil meet, faces numerous challenges to the sustainable utilization of water resources as the region experiences rapid population and economic growth, expanding agriculture, transportation and energy sectors, along with frequent flooding and droughts. Yet, despite the critical role that water plays in the life and biodiversity of the region, in-situ data availability is limited and little is known about the condition of the streams and rivers. Radar altimetry data have been recognized as an alternative to in-situ hydrological data in remote areas and have the potential to fill critical information gaps in such ungauged or poorly gauged basins. We have computed 15 water level time series and annual water level hydrographs of the Madre De Dios River in Southeastern Peru and Northwestern Bolivia, using ENVISAT altimetry data over the period 2002-2010. Trends and variability in hydrological regime were analyzed for Madre De Dios River. The hydrological regime is characterized by a multimodal flood wave, fast rise and slow recession. Drought has occurred during the months of August to September, and flood has occurred during December to February. The amplitude of the water stage denotes higher values downstream while the values much lower upstream reaches. These results demonstrate that the altimetry ENVISAT data to measure and monitor the transient flood waves of this trans-boundary river can be realized and are the basis for further understanding of the ecohydrological processes of the Madeira River Basin.

Palavras-chave: Satellite Radar Altimetry, Hydrological Regime, Madre de Dios River, ENVISAT

1. Introdução

Os rios amazônicos são importantes vias navegáveis para sua população adjacente, sendo de grande importância socioeconômica, e suscetíveis a sazonalidades hidrológicas. Apresentando subida e descida das águas durante um ano civil – de janeiro a dezembro – ou um ano hidrológico – vazante, cheia e vazante – o que caracteriza o regime fluvial ou regime hidrológico (Araújo, 2011). Identificar esse período tem importância tanto socioeconômica, como para análises e futuras aplicações de metodologias científicas. Contudo na Bacia Amazônica há um difícil acesso a estações hidrológicas, pois as estações fluviométricas devem ser colocadas em locais estratégicos, requerendo uma série de observações *in situ* por

um período de tempo muito longo, demandando custos altíssimos de instalação e manutenção (Alsdorf *et al.* 2007).

Devido a importância da Bacia Amazônica para o clima global (e local), existe um grande interesse em examinar até que ponto as mudanças no ciclo hidrológico podem ser evidentes no registro observacional. Assim vários estudos são feitos, buscando relatar e verificar as tendências hidrológicas do Rio Amazonas e seus afluentes (Gloor *et al.*, 2013), como mostram os estudos altimétricos de calibração e validação dos satélites ESR-2 e ENVISAT na bacia Amazônica por Frappart *et al.* (2006), Silva *et al.* (2010), Calmant *et al.* (2013) e Seyler *et al.* (2013); nas relações entre planície de inundação e rios (Bonnet *et al.*, 2008); em modelagem hidrológica e hidrodinâmica (Getirana, 2009; Chávarri *et al.*, 2012, Paiva *et al.*, 2013, Paris *et al.*, 2016 e Garambois *et al.* 2016); estimativa e monitoramento de níveis de água de rios (Calmant e Seyler, 2006; Seyler *et al.*, 2008) zonas úmidas (Silva *et al.*, 2012a), eventos extremos (Frappart *et al.*, 2012 e Silva *et al.*, 2012b e 2013) e gestão dos recursos hídricos na bacia Amazônica em Silva *et al.* (2014). Tais estudos tornam o uso da altimetria espacial mais vantajoso, permitindo a utilização dos dados altimétricos em conjunto com as redes de medição hidrológicas convencionais devido a sua densa amostragem espacial (Seyler *et al.* 2013). Sabe-se que as medições altimétricas não substituem o monitoramento *in situ*, contudo permite o avanço dos estudos em áreas remotas (Santos *et al.*, 2013).

Desta maneira, o presente trabalho fixa a discussão no aspecto hidrológico por meio da interpretação das variações de níveis de água do rio Madre de Dios, estimadas pela missão altimétrica ENVISAT, testemunhadas nos cotogramas, que contemplam as variabilidades anuais da superfície da lâmina de água de uma bacia hidrográfica numa seção fluvial.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Madeira tem uma área total de aproximadamente 1,52 milhões de km², cobrindo de 24% da bacia Amazônica, o dobro do tamanho de qualquer outra bacia tributária do Rio Amazonas. Abrange parcialmente os territórios da Bolívia (40%), Brasil (50%) e do Peru (10%) (ANEEL, 2000). Uma das suas sub-bacias é a bacia hidrográfica do rio Madre de Dios, que nasce na cordilheira oriental peruana (Abasto, 1987), drenagem até a confluência com rio Beni, com área de 124.910 km², onde 76,2 % (95.181 km²) pertence ao Peru e 23,8% (29.729 km²) a Bolívia.

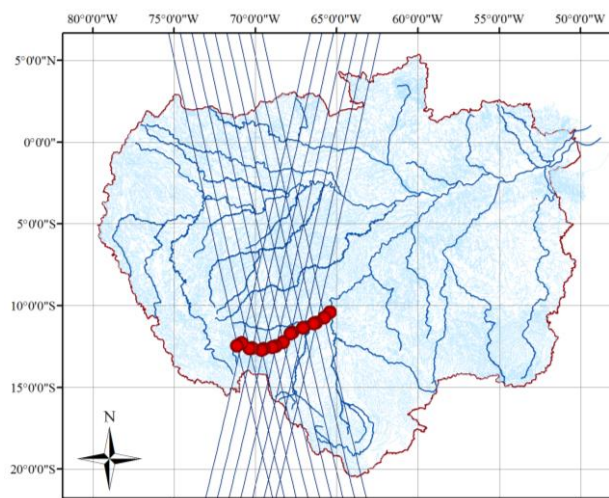


Figura 1. O Rio Madre de Dios, com as estações virtuais (círculos em vermelho) e os traços das orbitas (linhas em cinza) do satélite altimétricos ENVISAT.

2.2 Dados Altimétricos

Para este estudo foram utilizados dados altimétricos produzidos pelo satélite ENVISAT, denominados de registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*), extraídos entre as coordenadas geográficas de 67°W a 41°W e 10°S a 31°S. Os mesmos foram processados através do algoritmo de tratamento de forma de onda (FO) *Ice-1* disponibilizado pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*.

Desta maneira, 80 traços foram extraídos do CTOH, totalizando 93 ciclos de outubro de 2002 a outubro de 2010. Foram desenvolvidos, em linguagem de programação Fortran, programas que permitem calcular a posição a 20 Hz (*i.e.*, 1/20éssimo de segundo) da medida altimétrica com longitude, latitude, data e altura do plano de água, a partir da equação da órbita do satélite, sendo realizadas as devidas correções ambientais e geofísicas, permitindo o desenvolvimento das bases de dados para utilização no programa *Virtual Altimetry Station – VALS* (VALS, 2016).

2.2.2 Elaboração das Estações Virtual

A interseção de um traço do satélite altimétricos com um plano de água possibilita criar uma estação virtual (Silva, V.C, 2015). Onde, inicialmente o corpo de água é identificado e localizado através do mosaico de imagem do programa *Google Earth*, com um polígono delimitando as latitudes e longitudes mínimas e máximas da estação virtual (EV), como mostra a Figura 2. Na sequência, os dados são visualizados no programa VALS, mostrando o perfil hidrológico altimétrico ao longo do traço (*i.e.*, gráfico altura do nível da água vs posição), onde cada linha corresponde a uma passagem do satélite e excluídas as medidas que não corresponde ao corpo hídrico. Por fim, o programa gera a série temporal dos níveis de água, imprimindo os valores médios (\bar{M}) e os valores da mediana (M) para cada ciclo da passagem do satélite, em alturas elipsoidais de nível de água, depois sendo convertidas em alturas geoidais, utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008), conforme metodologia descrita em Silva *et al.* (2010).

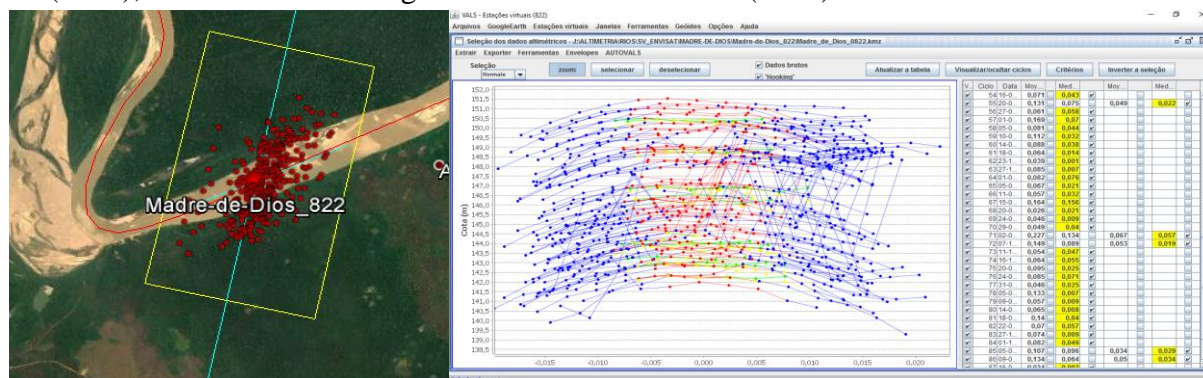


Figura 2. Estação Virtual Madre de Dios 822 nos programas *Google Earth*, à esquerda e *VALS*, à direita.

2.2.3 Elaboração das séries temporais altimétricas

As séries temporais das cotas altimétricas foram obtidas utilizando as medianas das medidas e associando-se uma dispersão à mediana, de forma a caracterizar a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Esta dispersão foi calculada pelo desvio absoluto da mediana como mostra a equação 01:

$$DAM = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |H_i - H_{med}| \quad (01)$$

onde n é o número de medidas, H_i é a i ésima medida altimétrica selecionada e H_{med} a mediana das medidas selecionadas

2.2.4 Caracterização do Regime Hidrológico

Primeiramente, obteve-se a representação gráfica das informações hidrológicas, por meio de séries temporais de altura da lâmina da água, com o objetivo de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros altimétricos, assim, verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade, bem como, a possível existência de anomalias. Foram elaborados os 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 conceituado 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 limite para o período de estiagem.

3. Resultados e Discursão

Foram elaboradas 15 estações virtuais para o rio Madre de Dios, descritas na Tabela 1. Nota-se o crescimento da amplitude média em direção à foz, onde a primeira estação virtual MADRE-DE-DIOS_078, distante 1103,42 km da foz, tem a menor amplitude, dentre todas as estações, de 2,32 m, enquanto que a última estação, MADRE-DE-DIOS_579, distante 67,50 km da foz, tem amplitude de 7,22 m.

Os cotagramas, um para cada estação virtual, a partir da análise estatística das médias mensais (Figura 3), foram gerados para 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).

Tabela 1. Estações virtuais elaboradas no rio Beni.

NOME DA ESTAÇÃO VIRTUAL	LATITUDE (°)	LONGITUDE (°)	COTA MÍNIMA (m)	COTA MÁXIMA (m)	AMPLITUDE (m)	DISTANCIA DA FOZ (km)
MADRE-DE-DIOS_078	-12.280.660	-70.838.106	274,62	276,94	2,32	1103,42
MADRE-DE-DIOS_379	-12.597.607	-70.362.386	231,3	235,99	4,69	991,42
MADRE-DE-DIOS_536	-12.571.809	-70.186.894	221,34	225,53	4,19	953,92
MADRE-DE-DIOS_837	-12.705.398	-69.620.279	192,15	195,25	3,1	844,92
MADRE-DE-DIOS_994	-12.635.567	-69.484.290	182,18	185,55	3,37	819,42
MADRE-DE-DIOS_293	-12.533.785	-68.939.650	163,03	170,04	7,01	700,42
MADRE-DE-DIOS_450	-12.469.287	-68.726.177	160,22	166,73	6,51	664,92
MADRE-DE-DIOS_751	-12.224.416	-68.292.240	152,91	159,26	6,35	584,92
MADRE-DE-DIOS_908	-11.687.177	-67.831.923	146,39	151,19	4,8	482,92
MADRE-DE-DIOS_207	-11.616.063	-67.710.336	144,45	151,64	7,19	464,02
MADRE-DE-DIOS_665	-11.338.388	-67.055.426	132,6	139,05	6,45	366,12
MADRE-DE-DIOS_364	-11.332.420	-67.031.331	132,2	138,59	6,39	363,4
MADRE-DE-DIOS_121	-11.087.804	-66.392.235	119,17	126,37	7,2	230,4
MADRE-DE-DIOS_822	-11.019.103	-66.243.643	115,93	122,98	7,05	187,5
MADRE-DE-DIOS_579	-10.718.356	-65.757.944	107,36	114,58	7,22	67,5

Na Figura 4 pode-se identificar que o rio Madre de Dios apresenta dois (2) períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de vazante que se inicia em maio podendo se estender até novembro, apresentando com mais frequência, as cotas mínimas no mês de setembro, e um período de cheia suavizado, que abrange de novembro a maio, onde as vazões máximas são encontradas mais frequentemente no mês de janeiro. Particularmente, pode-se observar que a ascensão do cotograma de cheia é mais acelerada, enquanto a recessão diminui progressivamente na vazante, frequentemente com um ou mais picos de cheia menos acentuado no primeiro semestre característico de regime tropical boreal (Rodier, 1964 e Molinier, 1997). Adicionalmente, é possível identificar que 60% tiveram o valor máximo anual no mês de janeiro, 33% em fevereiro e 6% em abril, enquanto que 73% tiveram o valor mínimo anual no mês de setembro, 27% em agosto.

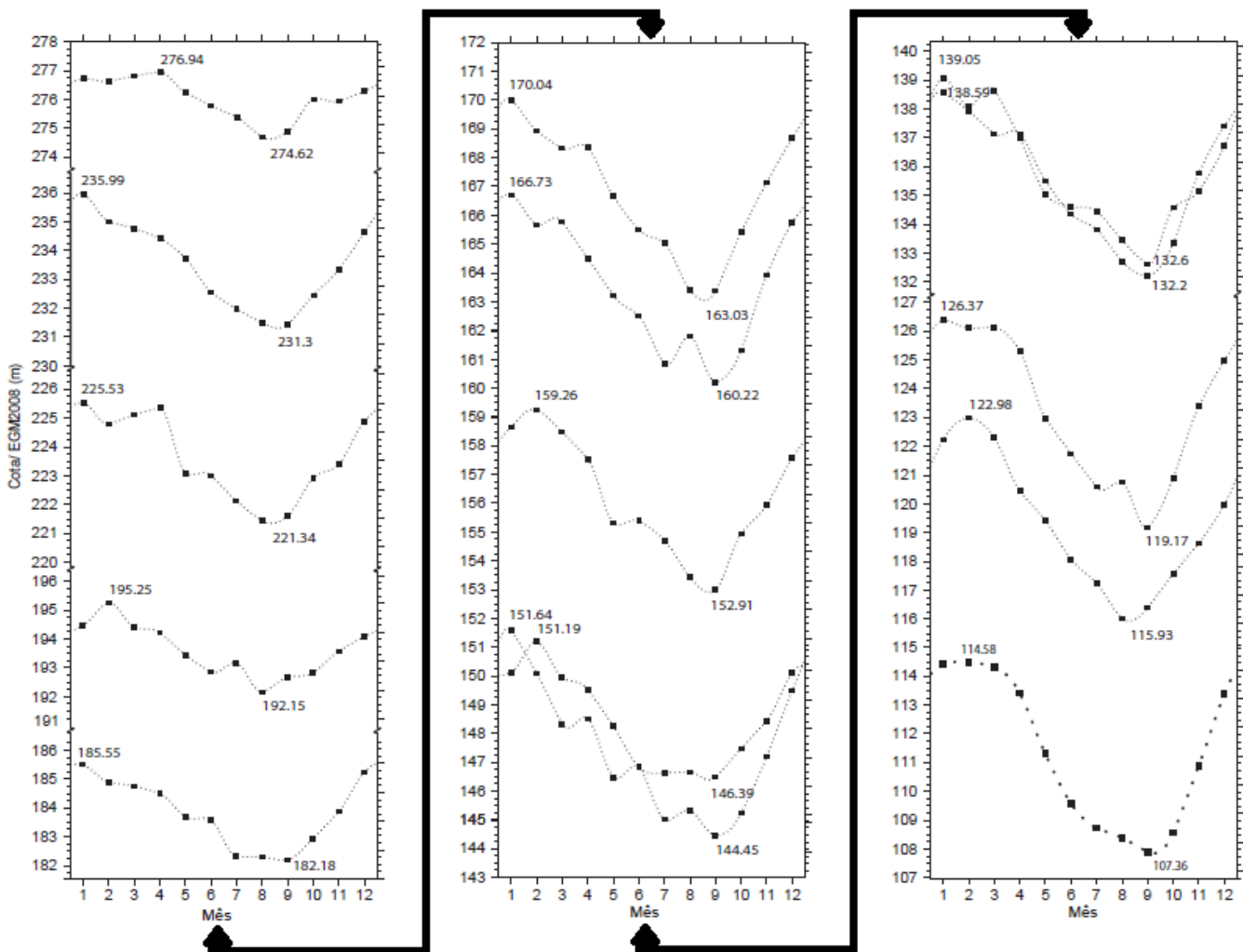


Figura 4. Cotograma das estações virtuais do rio Madre de Dios Beni referentes ao período estudado onde são identificados os períodos de cheia e estiagem com um traçado contínuo e as cotas máximas e mínimas.

4. Conclusões Citações e Referências

A avaliação da variabilidade espaço-temporal do nível de água do rio Madre de Dios, na bacia do rio Madeira, foi analisada utilizando-se os dados do satélite ENVISAT e o programa VALS, que possibilitou a seleção refinada dos dados altimétricos.

O regime hidrológico do rio Madre de Dios demonstrou ser multimodal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensões e recessões assimétricas ao longo do rio. Conforme vai se distanciando da foz, ocorrem mudanças na sazonalidade do rio, que vão desde diferenças nos meses de pico até a mudança de regime que passa de multimodal para bimodal.

Enfatiza-se que o uso dos dados altimétricos do satélite ENVISAT são apropriados para regiões complexas, rios transfronteiriços e de difícil acesso, bem como escassez de dados *in situ*, como o Rio Madre de Dios.

A missão altimétrica SWOT (*Surface Water Ocean Topography*), previstas para 2020, contribuirá para uma melhor compreensão dos oceanos e das suas águas superficiais terrestres, utilizará a altimetria interferométrica e um altímetro radar, fornecerá uma imagem bidimensional da faixa imageada, o que possibilitará aprimorar o monitoramento dos níveis de água, favorecendo a análise espacial no estudo da variabilidade hidrológica.

Agradecimentos

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de bolsas de mestrado, ao primeiro autor e iniciação científica, ao segundo 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 pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT disponibilizados para o estudo e aos alunos do Laboratório RHASA.

Referências Bibliográficas

Abastos, Lara n . **Balance hídrico superficial de la cuenca del rio Madre de Dios: Amazonia, Bolivia, Peru, a Paz: PHICAB**, 1987, 270p

Alsdorf, D., Rodriguez, E., Lettenmaier, D. (2007). **Measuring surface water from space**. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2002, doi: 10.1029/2006RG000197

ANEEL (2000) **Bacias Hidrográficas do Brasil**. Distribuição gratuita de Compacto Disco (CD). Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>.

Araújo, Alex Paulo de. **Dinâmica fluvial e regime hidrológico do rio Paranapanema**- Presidente Pudente, 2011, xiv, 197p

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.

Gloor, M, Brien R. J. W. Galbraith, D., Feldpausch T. R., Schöngart J., Guyot J.-L. Espinoza, J. C., 2013. **Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades** . *Geophysical Research Letters*, VOL. 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50377, 2013

Marengo, J.: 1992, '**Interannual variability of surface climate in the Amazon basin**', *Int. J. Climatol.*, 12, 853-863

Paiva Rcd, Collischonn W, Bonnet MP, De Gonçalves LGG, Calmant S, Getirana A, Santos Da Silva J. 2013b. **Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 2929–2946, doi: 10.5194/hess-17-2929-2013.

Pavlis, N. K.; Holmes, S. A.; Kenyon, S. C. (2008). **An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008.** In *Anais Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*, Viena, 2008.

Santos ,E.B., Lucio, P.S., Silva,C.M.S.,2015. **Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia Brasileira.** *Revista Brasileira de Geografia Física* V. 08 N. 04 (2015) 1041-1052.

Silva J.S, Calmant Stephane, Seyler Frédérique. **Variabilidade espacial do nível de água em eventos extremos da bacia Amazônica observada pelo satélite altimétricos Envisat** in: Nobre C.A . (ed). Borma L.S (ed.) *Secas na Amazônia: causas e consequência* São Paulo: Oficina de Texto, 2013, p. 209-242.

Silva, V.C; Marinho, R.R **Avaliação de dados de altimetria espacial para estimativa de cotas fluviométricas sobre o Rio Branco - Roraima.** In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico- SBRH*, Brasília, Nov. 2015

Sioli, H. 1968. **Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region.** *Amazoniana*, 3:267–277.

Tucci, C. E. M. **Regionalização de vazões.** Porto Alegre: UFRGS, 2002.

VALS, 2016, **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>