

Variações Temporais de Níveis de Água em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica Estimadas por Satélite Altimétrico.

Joecila Santos da Silva^{1,2}
Daniel Medeiros Moreira¹
Emmanuel Roux³
Frédérique Seyler⁴
Otto Corrêa Rotunno Filho¹
Stéphane Calmant²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
Caixa Postal 68506 – 21945-970 – Rio de Janeiro, Brasil.
{joecila.silva@ird.fr, danielmm@rj.cprm.gov.br, otto@coc.ufrj.br}

² Laboratoire d'Études en Géophysique et Oceanographie Spaciales – LEGOS
14 Edouard Belin – 31400 – Toulouse, France.
stephane.calmant@ird.fr

³ Institut de Recherche pour le Développement/Representation Guyane – IRD/GUYANE
Route de Montabo BP165 – 97323 – Cayenne, Guyane.
emmanuel.roux@ird.fr

⁴ Institut de Recherche pour le Développement/Representation Bresil – IRD/BRESIL
Caixa Postal 7091 – 71619-970 – Brasília, Brasil.
frederique.seyler@ird.fr

Abstract: Satellite altimetry is a powerful tool to get time series of water stage in poorly monitored remote areas. Moreover, in widely inundated areas, it enables to study the relationships between adjacent water bodies. In this study, we present an analysis of the inundation cycle of the Amazon basin in the lower Madeira river basin. The water levels are derived from the radar altimetry of the ESA's ENVISAT satellite. The track 478 of ENVISAT ground-track network crosscuts the Amazon and Madeira rivers, the inundation basins on both sides, together with small tributaries and Lakes. Owing to the fact that the level so computed are georeferenced in a common frame, the geographical variations of the temporal stage variations permit to describe the cycle of connexion during high stages/disconnexion at low water periods between the different water bodies so monitored.

Palavras chave: wetlands, water level, radar altimetry, Amazon basin, zonas úmidas, nível de água, altimetria por radar, bacia Amazônica.

1. Introdução

A bacia Amazônica, caracterizada pela imensa superfície drenada (37% da América do Sul), apresenta uma baixíssima declividade (1 cm/km) na sua planície aluvial (Guyot et al. 1993 e 1994), onde uma relevante sazonalidade no regime hidrológico é evidenciada. Todos os cursos de água que se juntam ao Rio Amazonas entre leste do Peru e o oceano Atlântico e do Rio Negro entre Manaus e Barcelos, caracterizam-se por apresentarem enchentes anuais (Walker, 1995). Essa flutuação anual do nível de água definida por Junk et al. (1989) como pulso de inundação, dimensiona os fatores ecológicos nas áreas alagáveis, as quais são constituídas pela região de transição entre os ambientes aquáticos e o terrestre, com reflexos sobre toda a planície de inundação. No entanto, toda tentativa de caracterização dessas várzeas sofre de carência de dados, uma vez que um sistema de monitoramento, que seja confiável e que produza dados rapidamente acessíveis, necessita da coleta de várias informações, que agrupam dados pluviométricos, observações dos níveis de água nos lagos e rios, de medidas de vazões e da superfície inundada durante as cheias e vazantes, cujo custo de instalação e manutenção é bastante significativo (Alsdorf, 2001a). Poucas zonas úmidas dispõem de séries temporais observadas cumprindo esse requisito. Mesmo quando existem dados, pode haver períodos na série em que os dados se apresentam incorretos, ou mesmo inexistentes (Calmant e Seyler, 2006), penalizando e limitando a compreensão das variabilidades e incertezas que envolvem a predição do ciclo hidrológico dessas áreas.

A utilização de dados de satélite de observação da Terra, principalmente a altimetria espacial, permite uma visualização da superfície em escala continental, sobretudo nas regiões de difícil acesso como as zonas úmidas da bacia Amazônica, de forma homogênea, contínua e freqüente, com detalhamento espacial e temporal que as redes tradicionais de observação não permitem (Calmant e Seyler, 2006 e Seyler et al., 2008).

Para este estudo, foram processados os dados da missão ENVISAT. Utilizando-se um método original 3D para definir as estações virtuais, foram calculadas séries temporais de nível de água ao longo da zona úmida da bacia Amazônica correspondente a várzea do rio Amazonas na foz do rio Madeira. São apresentados os resultados da potencialidade desse satélite para medir não somente os corpos de água, como também as zonas úmidas da bacia Amazônica e a relação entre ambos.

2. Altimetria Espacial

Os radares altimétricos instalados a bordo de diferentes missões altimétricas emitem uma onda na direção do nadir, na vertical em relação ao solo. No retorno, o radar recebe o eco refletido pela superfície do plano de água. A análise do eco permite extrair uma medida muito precisa do tempo de trajeto entre o satélite e a superfície da água R . O tempo é transformado em distância em relação a uma superfície matemática de referência ou elipsóide de referência H considerando-se a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas emitidas. Essas distâncias são calculadas mediante certo período (1 segundo) para obter uma medida mais representativa da distância satélite/superfície do plano de água. Os níveis dos planos de água h , deduzidos das medidas altimétricas, são obtidos pela diferença entre a órbita do satélite H , em relação a um elipsóide de referência e a distância altimétrica R (Equação 1).

$$h = H - R = H - \check{R} + \sum_j \Delta R_j \quad (1)$$

onde $\check{R} = c\tau/2$ é a distância altimétrica calculada desconsiderando-se as iterações com a atmosfera, c é a velocidade da luz no vácuo, τ é o tempo de ida e volta do pulso, e ΔR_j são as correções instrumentais, ambientais e geofísicas (Fu e Cazenave, 2001).

O tratamento dos dados brutos é uma operação que permite estimar os parâmetros físicos a partir da análise do sinal de retorno ao altímetro, aplicando-se um tratamento adaptado à forma de onda (FO), onde, partindo-se da distribuição da energia recebida, busca-se localizar precisamente a posição no tempo τ do eco. As FOs refletidas pelos planos de águas continentais são extremamente diversas, dificultando o processo do tratamento. Atualmente ainda não existe um algoritmo específico para águas continentais. Os algoritmos desenvolvidos são específicos para o oceano, o gelo e os *icebergs*, ou seja, *Ocean* desenvolvido por Brown (1977), *Ice-1* desenvolvido por Wingham et al. (1986) e aplicado por Bamber (1994), *Ice-2* desenvolvido Legrésy et Rémy (1997) e *Sea Ice* desenvolvido por Laxon (1994).

Além dos tratamentos efetuados diretamente no satélite, com tratamento do sinal e constituição das FOs, tratamentos corretivos devem ser efetuados na recepção dos dados, permitindo transformar esses dados de nível 1 em dados de nível 2, ou seja, medidas com data e posicionamento, expressas nas unidades adequadas e apresentando um controle que garanta que os dados ofereçam sempre uma boa qualidade. Nos dados de nível 2, também são inclusos os parâmetros para se corrigir os erros instrumentais, os erros de propagação através da atmosfera, bem como as perturbações devidas à reflexão sobre a superfície e as correções geofísicas, para serem finalmente disponíveis como registro de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*).

2.1 A missão ENVISAT

No âmbito do seu programa de observação da Terra, a *Agence Spatiale Européenne* (ESA) lançou o satélite *ENVironmental SATellite* (ENVISAT) em março de 2002, sendo o maior satélite para observação da Terra construído até agora. Os dados recolhidos pelo ENVISAT são utilizados para o estudo científico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas. O ENVISAT está posicionado em uma órbita elíptica héliossíncrona com uma inclinação de 98,5°, a uma altitude média de 785 km e uma distância inter-traço ao Equador de aproximadamente 80 km, sendo constituído por 10 instrumentos que permitem 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*). O RA-2 é um radar de alta precisão direcionado para o ponto nadir operando em bi-frequência na banda Ku a 13,575 GHz com comprimento de onda de 2,3 cm e na banda S a 3,2 GHz com comprimento de onda de 3,4 cm (Zelli, 1999). A largura da faixa imageada é aproximadamente 3,4 km.

3. Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange a zona úmida da bacia Amazônica correspondente a várzea do rio Amazonas na foz do rio Madeira, incluída na planície Amazônica, onde são encontradas grandes extensões de áreas aplainadas que têm como características a ausência de drenos definitivos, denominada planície de inundação ou várzea amazônica (Figura 1). Possui características variáveis de acordo com a época do ano ou mesmo de acordo com o ano, apresentando como principal característica a dinâmica hidrológica ligada à variação do nível das águas do rio Amazonas. Tal área não contém qualquer estação limimétrica tradicional, sendo que a mais próxima encontra-se em Nova Olinda, distante 70 km da foz do rio Madeira.

3.2 Extração e tratamento dos dados altimétricos

Os GDRs da missão ENVISAT são disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS* onde foram processados os algoritmos de tratamento das

FOs *ocean*, *ice-1*, *ice-2* e *sea-ice*. Extraíram-se 90 traços, totalizando 66 ciclos de 02/10/2002 à 29/02/2008. Foram desenvolvidos algoritmos que permitem calcular a posição da medida altimétrica com data, longitude, latitude e altura do plano de água relacionada ao elipsóide WGS84 a partir da equação da órbita do satélite, com as devidas correções ambientais e geofísicas para cada algoritmo de tratamento das FOs (*ocean*, *ice-1*, *ice-2* e *sea-ice*).

3.3 Estações Virtuais

Cada interseção de um traço altimétrico com o plano de água consiste numa estação virtual, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do plano de água. Foi desenvolvida uma metodologia para criação das estações virtuais pela seleção dos dados correspondentes ao cruzamento do plano de água, adaptadas às variações no tempo e no espaço através do programa VALS 1.0 (*Virtual ALtimetry Station*), que consiste de rotinas desenvolvidas e incorporadas ao programa GRASS GIS 6.2.1, permitindo uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade, descrita detalhadamente em Roux et al. (2008), Santos da Silva et al. (2008) e Seyler et al. (2008). Neste estudo foram criadas estações virtuais utilizando-se o algoritmo *ice-1* para o satélite ENVISAT, que, segundo Frappart et. al. (2006) é o algoritmo que melhor se adapta às medições altimétricas em águas continentais. Para cada interseção, extraíram-se as medidas altimétricas correspondentes ao plano de água totalizando 15 estações virtuais (Tabela 1). Destaca-se que, o mosaico de imagens do satélite *Japan Earth Resources Satellite-1 – JERS-1* do período de cheia, definido a partir do projeto de mapeamento global de florestas tropicais *Global Rain Forest Mapping – GRFM*, foi utilizado em segundo plano.

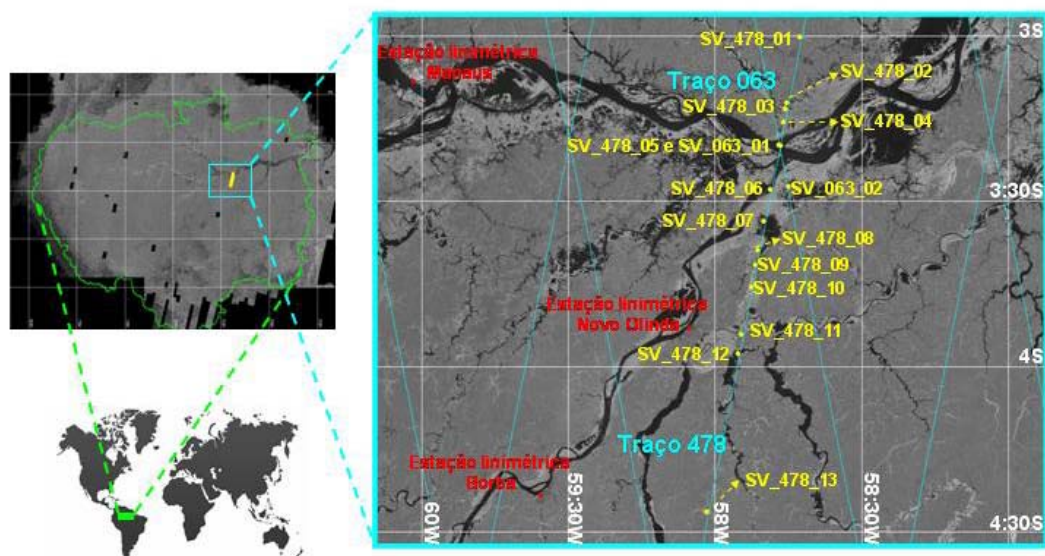


Figura 1: Localização da área objeto deste estudo com as estações virtuais (em amarelo) ao longo dos traços 063 e 478 do satélite ENVISAT (em azul) e as estações limimétricas das proximidades (em vermelho). Mosaico de imagens JERS-1 no período de cheia.

3.4 Séries Temporais para cada Estação Virtual

Com vistas a finalizar a metodologia para exploração das medidas, a informação disponível, para cada estação virtual, permite estimar as séries temporais de altura de água calculando-se a média e mediana para o conjunto das medidas. Frappart et al. (2006) descrevem que a mediana mostrou-se uma medida estatística mais representativa do que a média para definição da altura de água a cada passagem. Associando-se uma dispersão à

mediana, caracteriza-se a qualidade dos resultados obtidos. Tal dispersão foi calculada pelo desvio absoluto da mediana – DAM (Equação 2).

$$DAM(h) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |h_i - h_{med}| \quad (2)$$

onde, N é o número de observações, h_i é a i ésima observação e h_{med} é a mediana. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais foram convertidas em altitude utilizando-se o modelo de ondulação geoidal MAPGEO2004 desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e Escola Politécnica da USP.

Tabela 1. Estações virtuais na zona úmida da bacia Amazônica correspondente a várzea do rio Amazonas na foz do rio Madeira.

Estação Virtual	Local	Traço ENVISAT	Longitude Média (°)	Latitude Média (°)	Ondulação Geoidal MAPGEO 2004 (m)
SV_478_01	Rio Caru	478	-58,712	-3,002	-15,13
SV_478_02	Rio Urubu	478	-58,756	-3,202	-14,48
SV_478_03	Lago 1	478	-58,760	-3,221	-14,41
SV_478_04	Lago 2	478	-58,769	-3,261	-14,26
SV_478_05	Rio Amazonas	478	-58,776	-3,331	-14,02
SV_063_01	Rio Amazonas	063	-58,784	-3,330	-14,01
SV_063_02	Lago do Arrozal	063	-58,749	-3,456	-13,51
SV_478_06	Rio Madeira	478	-58,813	-3,463	-13,42
SV_478_07	Lago Curupira	478	-58,835	-3,560	-12,92
SV_478_08	Lago Curupira	478	-58,854	-3,648	-12,39
SV_478_09	Lago Curupira	478	-58,864	-3,692	-12,11
SV_478_10	Lago Curupira	478	-58,879	-3,759	-11,67
SV_478_11	Rio Curupira	478	-58,910	-3,904	-10,66
SV_478_12	Rio Marimari	478	-58,923	-3,960	-10,29
SV_478_13	Igarapé Miraçaoeira	478	-59,029	-4,440	-9,62

4. Resultados e Discussão

No período de cheia, as águas do rio Amazonas controlam toda a planície aluvial apresentando diversos meandros fluviais divergentes devido a baixa declividade do curso do rio. Em conseqüência, a energia fluvial é diminuída e não consegue carrear muito da carga sedimentar que é depositada, colmatando o vale com sedimentos fluviais, formando diversos meandros. As águas superficiais do Amazonas entram nos igarapés e lagos, onde grandes regiões são temporariamente inundadas, podendo permanecer vários meses, alterando o valor do pico da cheia, que progride lentamente. Em período de vazante, as águas estocadas são liberadas, aumentando o valor da estiagem. As Figuras 2 e 3 ilustram como os dados altimétricos do ENVISAT representam esse fenômeno.

Na Figura 2.a, o satélite ENVISAT (traço 478), cruza a região de estudo recoberta por vegetação inundada, regiões mais brilhantes da imagem JERS-1, no sentido norte-sul (N-S). O perfil hidrológico medido pelo altímetro durante o trajeto do ENVISAT é mostrado na Figura 2.b, onde cada linha representa um ciclo de passagem do satélite e os pontos indicam as médias da medida do altímetro a um segundo. De norte a sul o satélite cruza toda a planície de inundação, permitindo avaliar o regime hidrológico da região, perfazendo um total de 165 km ao longo do traço, com uma declividade de 0,84 cm/km claramente observada no perfil hidrológico. Durante a vazante e a estiagem, em diversos momentos, o altímetro perde a ancoragem. Na região da foz do Madeira, esse fenômeno é fortemente observado. Tal situação acontece quando o altímetro continua a medir a altura de uma superfície reflexiva que ele acabou de sobrevoar, mas que não se encontra mais em seu nadir, ou simetricamente, se a

superfície encontra-se antes do seu nadir, formando um perfil hidrológico em formato parabólico, superestimando a medida altimétrica (efeito *hooking*). Na Figura 2.c, são apresentadas séries temporais altimétricas do rio Urubu, rio Amazonas, lago do Arrozal, lago Curupira, rio Marimari, igarapé Maraçoiera e rio Caru. Verifica-se no traço retratado, o mesmo regime hidrológico com a cheia progredindo lentamente e a vazante mais acelerada, que se inicia ao norte do rio Urubu, em rosa claro, até o igarapé Miraçoiera, em rosa escuro, passando pelo rio Amazonas em azul escuro, cuja série temporal é composta pelos dados altimétricos dos dois traços do ENVISAT que se cruzam exatamente sob o plano de água observado, permitindo uma obtenção de um conjunto de dados com intervalo de tempo inferior ao período de revisita do satélite. As séries temporais apresentam bons resultados, com pequenas dispersões também na vazante, que Birkett (1998) e de Oliveira Campos et al. (2001) citaram como sendo um problema das medidas altimétricas do satélite TOPEX/Poséidon (T/P). Adicionalmente, pode-se conferir a variação temporal dos fluxos da planície de inundação com valores de 1,91m na cheia e 5,44m na estiagem. O rio Caru pertence à bacia do rio Uatumã, a jusante da região de estudo, apresentando uma série temporal diferenciada (vermelho), não acompanhando o mesmo regime hidrológico.

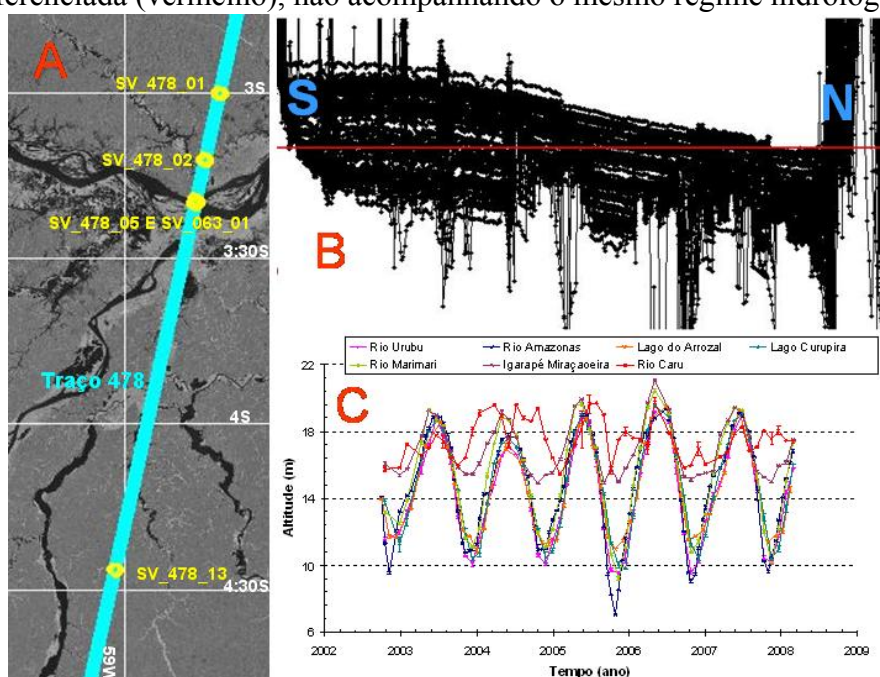


Figura 2: Planície de inundação do rio Amazonas. A – Trajetória do traço 478 do satélite ENVISAT, mosaico de imagens JERS-1 no período de cheia; B – Perfil hidrológico medido pelo altímetro; C – Séries temporais ao longo da planície de inundação.

Na Figura 3, apresenta-se o perfil de elevação da planície de inundação, ilustrado no sentido sul-norte do trajeto do satélite ENVISAT, onde se verifica que, durante a cheia todos os rios e lagos da região de estudo apresentam-se conectados a um único sistema de fluxo hidrológico, o do rio Amazonas. Todavia a medida altimétrica é superestimada em virtude do efeito de *hooking* observado. Na estiagem, observam-se cinco domínios de fluxos hidrológicos diferentes. O igarapé Miraçoiera e o rio Marimari contribuem para o fluxo hidrológico do rio Curupira, pois são seus afluentes. O lago Curupira, rio Urubu e rio Caru apresentam-se desconectados da planície de inundação, formando sistemas hídricos individualizados. Fato contrário acontece com o rio Madeira, lago do Arrozal e os lagos entre o rio Amazonas e rio Urubu, que continuam conectados com o rio Amazonas mesmo na estiagem.

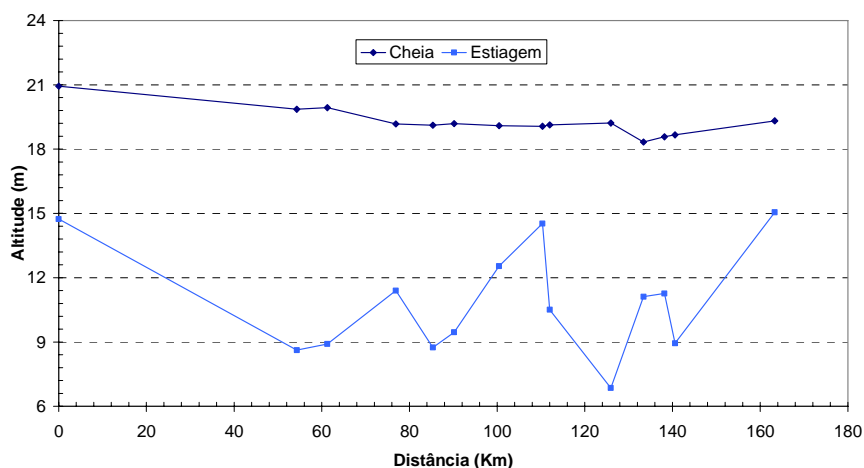


Figura 3: Perfil de elevação da planície de inundação da foz do rio Madeira.

4. Conclusões

Os recentes avanços obtidos na aquisição e no tratamento dos dados altimétricos, destacando-se os dados do ENVISAT, possibilita a realização de um grande número de medidas necessárias para a quantificação dos fluxos de água nos rios e nas zonas de inundação, produzindo séries temporais de boa qualidade. Constituem, em princípio, a única fonte com potencial para alcançar a medição das extensas zonas de inundação da bacia Amazônica, onde, na área objeto deste estudo, foram criadas 15 estações altimétricas. Uma seleção espacializada dos dados altimétricos utilizando o GRASS GIS 6.2.1 permitiu uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade, apresentando-se vantajosa, promovendo uma melhor seleção dos dados e reduzindo suas dispersões. Ao longo de 165 km, a planície de inundação apresenta uma baixíssima declividade 0,84 cm/km, onde, no período de cheia, todos os rios e lagos apresentam-se conectados com o fluxo hidrológico do rio Amazonas. O conjunto desses dois elementos aqui apresentados, incluindo nova missão com diversos sensores e desenvolvimento de uma ferramenta específica para a seleção de dados para águas continentais, continuam um avanço em relação aos trabalhos anteriores realizados com os dados T/P e seu algoritmo *Ocean*, onde uma simples seleção geográfica foi então empregada.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) no âmbito do projeto CAPES/COFECUB Nº. 516/05 – Modelagem Hidrológica-Atmosférica Aplicada à Gestão de Grandes Bacias Hidrográficas pelas bolsas de doutorado em co-tutela concedida ao primeiro autor e mestrado para o segundo autor. Ao *Global Rain Forest Mapping* – GRFM pelas imagens do satélite JERS-1 disponibilizadas para a pesquisa. Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, pela disponibilização de mapas da região. 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 do satélite ENVISAT utilizados na pesquisa.

Referências Bibliográficas

Als Dorf, D. E.; Birkett, C. M.; Dunne, T.; Melack, J.; Hess, L. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. **Geophysical Research Letters**. v.28, n.14, p. 2671-2674, 2001a.

Bambe, J. L. Ice sheet altimeter processing scheme, **Int. J. Remote Sensing**, v.15, n.4, p.925-938, 1994.

Birkett, C. M. Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. **Water Resources Research**, v. 34, n.5, p.1223– 1239, 1998.

Brown, G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications. **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, v.25, n.1, p.67-74, 1977.

Calmant, S.; Seyler, F. Continental surface water from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geosciences**. v. 338, n.14-15, p.1113-1122, 2006.

De Oliveira Campos, I. et al. 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, v. 333, p. 1–11, 2001.

Frappart, F.; Calmant, S. ; Cauhopé, M. ; Seyler, F.; Cazenave, A. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**. v.100, p.252–264, 2006.

Fu, L. L.; Cazenave, A. **Satellite Altimetry and Earth Science, A Handbook of Techniques and Applications**. London (UK), Academic Press., 464p., 2001.

Guyot, J.L. et al. Hydrologie du Bassin de l'Amazone. In : OLIVRY, J. C. ET BOULEGUE, J. (eds): Grands bassins fluviaux péri-atlantiques : Congo, Niger, Amazone. **Actes du Colloque PEGI/INSU/CNRS. ORSTOM**, Paris, France, 22-24 novembre 1993, p. 335-344, 1993.

Guyot, J. L. et al. Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone. **Dossier de la Revue de Géographie Alpine**, n.12, pp 77-83, 1994.

Junk, W.P.; Bayley, P.B.; Sparks, R. E. The “flood pulse” concept in river floodplain system. In: Dodge, D. P. (ed.) Proceedings of the International Large River Symposium (LARS). **Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Science**, v.106, p.110-127, 1989.

Laxon, S. Sea ice altimeter processing scheme at the EODC, **Int. J. Remote Sensing**, v.15. n.4, p.915-924, 1994.

Legrésy, B.; Rémy, F. Surface characteristics of the Antarctic ice sheet and altimetric observations, **J. Glaciol.**, v.43, n.144, p.265-275, 1997.

Roux, E., Santos Da Silva, J., Vieira Getiranaa, A. C., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Seyler, F. Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods. **Hydrological Sciences Journal**, em revisão, 2008.

Santos Da Silva, J.; Roux, E.; Rotunno Filho, O. C; Seyler, F.; Calmant, S. ERS-ENVISAT Altimetry over the Amazon basin : Quality assessment, applications and perspectives. **Remote Sensing of Environment**, submetido, 2008.

Seyler, F.; Calmant, S.; Santos Da Silva, J.; Filizola, N.; Roux, E.; Cochonneau, G.; Vauchel, P.; Bonnet, M-P. Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over Amazon Basin. **Journal of Applied Remote Sensing – SPIE**, submetido, 2008.

Walker, I. Amazonian streams and small rivers. In: **Limnology in Brazil**. Tundisi, J. G.; Bicudo, C. E. M.; Matsumura-Tundisi T. (Eds). p.167-193, 1995.

Wehr, T.; Attema, E. Geophysical validation of ENVISAT data products, **Adv. Space Res.**, v.28, n.1, p.83-91, 2001.

Wingham, D. J.; Rapley, C. G.; Griffiths, H. New techniques in satellite altimeter tracking systems. **Proceedings of IGARSS'86 Symposium**, Zürich, 8-11 Sept. 1986, Ref. ESA SP-254, p.1339-1344, 1986.

Zelli, C. ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter : Instrument design and pre-launch performance assessment review, **Acta Astronautica**, v.44, p.323-333, 1999.