

VALIDAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS DE NÍVEIS DE ÁGUA ADQUIRIDOS PELO SATÉLITE ENVISAT NA BACIA AMAZÔNICA.

Ana Carolina Zoppas Costi¹; Stéphane Calmant²; Frederique Seyler² & Gerard Cochonneau³

RESUMO – A altimetria espacial foi desenvolvida nos anos setenta com a realização das primeiras medidas para determinação da topografia e da superfície dos oceanos. A partir de então, medidas altimétricas de níveis de água continentais tem apresentado um importante papel em aplicações como: nivelamento de estações fluviométricas, estimativa de descarga líquida, estimativa de variações espaciais e temporais de armazenamento de água em rios e zonas de inundação, perfis longitudinais de água e implicações geodinâmicas. Neste contexto, o emprego da altimetria espacial para monitoramento de níveis em águas continentais apresenta a possibilidade de adquirir dados em locais com baixa densidade de estações ou de difícil acesso, como a bacia amazônica. Este trabalho analisa as medidas altimétricas de níveis de água adquiridas pelo satélite ENVISAT em relação aos dados obtidos em estações fluviométricas da bacia do rio Madeira, no Amazonas. Os resultados das análises realizadas apresentaram precisões na ordem de 30 cm. Além disso, os dados adquiridos pelo satélite acompanharam de forma satisfatória o regime de variação de níveis registrado pelas estações *in situ*, sugerindo a possibilidade de utilizar esses dados como base para eventuais falhas nas estações convencionais.

ABSTRACT - Space altimetry was developed in the Seventies with the accomplishment of the first measures for determination of the topography and the ocean's surface. Since then, altimetric measures of continental water levels has had an important place in applications as: leveling of *in situ* stations, discharge estimation, estimative of spatial and temporal variations of water storage in rivers and floodplains, longitudinal water profiles and geodynamic implications. In this context, the use of space altimetry to monitoring levels in continental waters presents the possibility to acquire data in places with low density of conventional gauging (*in situ* stations) or difficult access, as in the Amazon basin. This study analyzes the altimetric measures of water levels acquired by ENVISAT mission in relation to the water levels at conventional gauges at de Madeira basin, in the Amazonas state. The results presented precisions in the order of 30 cm. Besides that, the satellite data had a satisfactory behavior in follow the water stage variation registered in the *in situ* stations, suggesting the possibility of use these data as base for eventual imperfections in conventional gauges.

Palavras-chave: Altimetria espacial, hidrologia, bacia amazônica.

1) Engenheira Hidróloga da CPRM, Av. Pasteur, 404, Urca, 22290-240 – Rio de Janeiro. E-mail: anacarolina@df.cprm.gov.br

2) Directores de Pesquisa do Institut de Recherche pour le Développement (IRD), QL 16, CJ 04, C 08, SHIS, 71640-245 – Brasília.

3) Engenheiro de Pesquisa do Institut de Recherche pour le Développement (IRD), QL 16, CJ 04, C 08, SHIS, 71640-245 – Brasília.

1 - ALTIMETRIA ESPACIAL

As primeiras medidas altimétricas para determinar a topografia e a superfície dos oceanos foram realizadas no início da década de 70. Em 1969 a NASA estabeleceu os objetivos de longo prazo da altimetria espacial por radar. O primeiro altímetro a bordo de um satélite foi lançado pelos Estados Unidos, com destaque para os satélites Skylab, em 1973, GEOS-3, em 1975, Seasat, em 1978, e Geosat, em 1985 (Santos da Silva *et al.*, 2009). A missão Geosat, radar altimétrico da marinha norte-americana, entre 1985 e 1989, forneceu as primeiras medidas altimétricas com precisão e duração suficientes para analisar a utilidade de tais medidas no monitoramento de longo prazo de águas continentais (Koblinsky *et al.*, 1993). Essas medidas foram utilizadas por Koblinsky *et al.* (1993) como base para os primeiros estudos em grandes bacias. Esses autores pesquisaram as formas de onda especulares do satélite Geosat (*U. S. Navy's Geodetic Satellite*) para estimar os níveis de água em quatro locais na Amazônia.

Duas grandes famílias altimétricas foram desenvolvidas a partir da década de 90. A primeira, por meio de um esforço conjunto entre o CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esse projeto, especificamente dedicado ao estudo dos oceanos, foi embarcado nos satélites Topex/Poseidon (1992-2006) e seus sucessores Jason-1 (2001-) e Jason-2 (2008-). A ESA (*European Space Agency*), concebeu a segunda família, desenvolvida para o estudo dos oceanos e das terras firmes, embarcada nas plataformas ERS-1 (1991-1996), ERS-2 (1995-) e ENVISAT (2002-). O estudo das terras firmes se dá a partir de um módulo continental, instalado nesses altímetros. Dessa forma, sob certas condições, é possível adquirir medidas nos continentes e nas calotas polares. Em 2000, a marinha norte-americana (*U.S. Navy*) lançou o satélite GFO para dar continuidade à missão Geosat e, em 2003, a NASA lançou o satélite Icesat (2003-), que possui um altímetro a laser embarcado (Santos da Silva *et al.*, 2009).

As medidas altimétricas de níveis de água fornecem importantes aplicações, algumas já concluídas, outras ainda em andamento. Por exemplo: nívelamento das estações da rede hidrometeorológica, estimativa de descarga líquida a partir de medidas altimétricas, estimativa das variações espaciais e temporais de armazenamento de água em rios e zonas de inundação, perfis longitudinais de água e implicações geodinâmicas.

Atualmente, diversas bases de dados disponibilizam as séries temporais de níveis de água das grandes bacias do mundo. A primeira base de dados é resultante do processamento dos dados adquiridos pelos satélites ERS e ENVISAT na universidade de Montfort realizado para a Agência Espacial Européia (ESA). A segunda base de dados é conhecida como “*Hydroweb*”

(<http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/>) e foi criada no Laboratório de Estudos em Geofísica e Oceanografia Espacial, LEGOS (*Laboratoire d'Etudes em Oceanographie et Geodésie Spatiale*), em Toulouse, França. Essa base de dados fornece dados observados em rios (cerca de 200 locais utilizando, principalmente, dados do T/P) e lagos e reservatórios (cerca de 150 locais) ao redor do planeta, por meio do processamento dos dados oriundos dos satélites ENVISAT, GFO, T/P e Jason. O departamento de agricultura dos Estados Unidos (*United States Departament of Agriculture*) mantém a terceira base de dados (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/). A principal proposta é gerar séries temporais sobre lagos e reservatórios utilizando um arranjo de dados dos satélites T/P e Jason.

O projeto CASH (*Contribution of Spacial Altimetry to Hydrology*), fundado pelo Ministério Francês de Pesquisa e Tecnologia (*French Ministry of Research and Technology*), produziu uma base de dados consistidos do T/P (<http://www.hydrospace-cash.fr>). Para cada cruzamento de um rio em cada uma das oito maiores bacias do mundo, essa base de dados fornece uma série temporal de níveis de água, relativas ao geóide (EGM96), com freqüência de um ponto “médio” em cada um dos ciclos, isto é, no melhor caso, a cada 10 dias para o T/P. Os traços foram os mesmos utilizados para a missão ENVISAT.

A altimetria satelital, desenvolvida para medir sobre as mínimas inclinações das superfícies oceânicas, tem potencial para aumentar nossa capacidade de medir níveis de água sobre o continente (Rapley *et al.*, 1987; Guzkowska *et al.*, 1990). Se as técnicas de altimetria satelital podem fornecer medidas da variação dos níveis dos rios com a precisão e a freqüência necessárias para aplicações hidrológicas, seu valor para um país como o Brasil pode ser enorme (Koblinsky *et al.*, 1993). Para o caso da bacia Amazônica, estudos têm concluído que os dados de satélite aumentam muito significativamente o número de pontos de medida do nível da água. Certamente, as interseções entre o sistema de drenagem e os traços de satélite formam uma rede aproximadamente 10 vezes mais densa que a rede de estações hidrométricas instaladas na bacia (Leon *et al.*, 2008). Cudlip *et al.* (1992), através dos dados do satélite Seasat, estabeleceram o perfil longitudinal do rio Amazonas. Eles utilizaram 32 cruzamentos de traços do satélite sobre o Amazonas em julho de 1978. Esses autores estimaram a precisão do valor de nível d’água entre 10 cm e 20 cm.

1.1 - Técnica de medição

O conceito básico da altimetria satelital é bastante direto (Fu e Cazenave, 2001). O principal objetivo é medir a distância entre o satélite e a superfície terrestre (solo ou água). Essa medida é

realizada através de radares que são acoplados às plataformas dos satélites. Os dados utilizados neste estudo são adquiridos pelo RA-2 (*Radar Altimeter*), pertencente à plataforma do satélite ENVISAT.

A altimetria por radar do espaço consiste de medidas da distância vertical entre o satélite e o nível da água. A diferença entre a altitude do satélite acima da superfície de referência (usualmente um elipsóide convencional), estabelecida por meio da determinação precisa da órbita, e a distância satélite-superfície da água, fornece as medidas do nível da água sobre a superfície de referência. Colocado em uma órbita repetida, o altímetro sobrevoa uma dada região em intervalos regulares de tempo (chamados de ciclos orbitais), durante os quais uma completa cobertura da Terra é realizada (de Oliveira Campos *et al.*, 2001).

A medida altimétrica básica é a diferença entre a elevação do satélite relativa ao centro de massa da Terra derivada de uma precisa determinação de órbita e da altura do satélite relativa à superfície, observada pelo tempo de viagem de um pulso do radar emitido pelo satélite (Koblinsky *et al.*, 1993).

Assim, os radares altimétricos (*RAdio Detection And Ranging*) embarcados sobre as plataformas dos satélites, medem, a partir do nadir, a distância que separa o satélite da superfície terrestre. Estes instrumentos funcionam a partir de um princípio simples, a medida do intervalo de tempo dt entre a emissão de uma onda eletromagnética vertical e a recepção do eco. A partir da velocidade de propagação c da onda (velocidade da luz), a distância R (R para *range*), que separa o emissor do alvo é deduzida pela duração do trajeto de ida e volta (equação 1 e 2).

$$R = \hat{R} - \sum_j \Delta R_j \quad (1)$$

onde,

$$\hat{R} = c * \frac{dt}{2} \quad (2)$$

Na equação 2, ΔR_j (com $j = 1, \dots$) são as correções instrumentais, ambientais e geofísicas. Ou seja, são as correções relativas às componentes de refração atmosférica e relativas à polarização entre a superfície média da dispersão eletromagnética e o nível médio do mar na interface mar-atmosfera. (Fu e Cazenave, 2001).

A média dessas distâncias é calculada tipicamente para um período de 1 segundo, de forma a ampliar a relação sinal/ruído, resultando numa medida média da distância satélite/superfície do plano de água ao longo de uma distância de 6 a 7 km.

O princípio da altimetria por satélite é apresentado na figura 1. A grandeza física procurada, e utilizada na prática, é a altura H , que representa a medida instantânea da altura do refletor que retorna o eco do radar, em relação a uma superfície matemática de referência, geralmente o elipsóide de referência. (Fu e Cazenave, 2001).

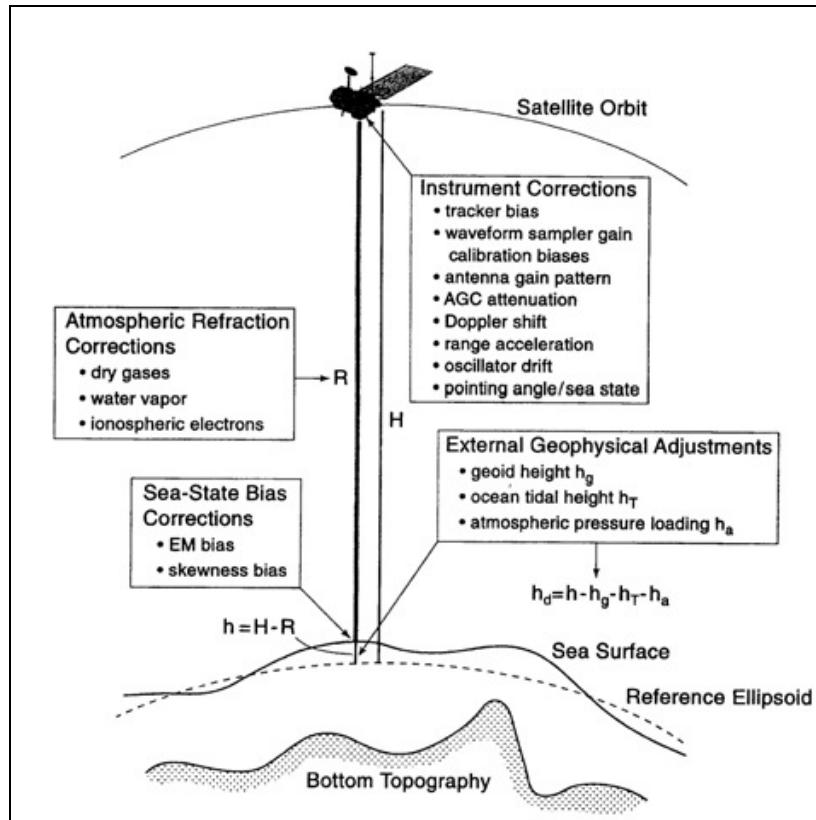


Figura 1 – A medida altimétrica. Fonte: Fu e Cazenave, 2001.

Para a estimativa da altura h (equação 3), é necessário o conhecimento das duas grandezas, R (para range) ou distância altimétrica, que representa a distância que separa o satélite da superfície terrestre, e H , a altura do satélite em relação ao elipsóide de referência (figura 1).

$$h = H - R \quad (3)$$

A figura 1 mostra também um resumo esquemático das correções que devem ser aplicadas à medida de R (*range*) adquirida pelo altímetro e as relações entre R , a altura da órbita H e a altura h da superfície do mar relativa a uma aproximação elipsoidal da superfície equipotencial do mar a partir dos efeitos combinados da gravidade da Terra e de forças centrífugas (o geóide). A elevação

dinâmica da superfície do mar h_d , que é de interesse para os estudos de circulação do oceano, é obtida a partir de h , subtraindo desse, a altura h_g das ondulações do geóide relativas ao elipsóide de referência e às variações h_t e h_a oriundas da carga das pressões de maré e atmosférica, respectivamente.

1.2 – Tratamento dos dados

O sinal de retorno ao altímetro consiste em um dado bruto, que necessita passar por um tratamento para ser transformado em uma informação sobre a estimativa dos parâmetros físicos da superfície adquiridos pelo instrumento. A partir da análise da distribuição da energia recebida pelo altímetro, busca-se a localização precisa da posição do eco no tempo τ (figura 2). Na mesma figura, o eixo vertical é posicionado no momento da emissão do pulso do radar. A informação de tempo de ida e volta é procurada na forma do eco refletido pela superfície do plano de água. No exemplo teórico da figura 2, para uma superfície oceânica, o tempo de ida e volta é correspondente à distribuição da energia recebida na metade da curva ascendente (passagem do verde ao vermelho no terceiro quadro).

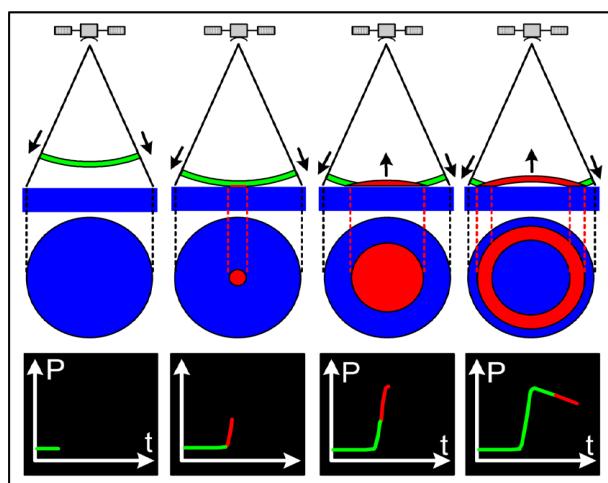


Figura 2 - Formação do sinal sobre uma superfície plana. Fonte: Santos da Silva, 2008.

O processo de tratamento dos sinais refletidos pelos planos de água continentais é bastante complexo, uma vez que as formas de onda (FOs) são extremamente diversas. O sinal refletido por um plano de água continental apresenta uma variação grande de energia. Essa variação representa a diversidade de superfícies que se apresentam junto aos corpos de água continentais (ilhas, meandros, zonas de inundação, etc.). Entretanto, por meio da comparação de diversas FOs ao longo do tempo, correspondentes às diversas passagens do satélite sobre um mesmo local, é possível observar as variações temporais importantes da FO ao longo do ciclo hidrológico anual. Isso significa que, unindo o conhecimento do comportamento característico dos níveis das águas locais,

a morfologia do corpo d'água nas secas e cheias e a observação das FOs geradas nesses diferentes períodos, é possível apurar o entendimento dos sinais refletidos em cada caso.

Atualmente, ainda não se dispõe de um algoritmo específico para o acompanhamento das águas continentais. Os algoritmos existentes foram desenvolvidos para os estudos dos oceanos, gelo e *icebergs*. Em geral as FOs obtidas nos locais com gelo são tão específicas quanto as adquiridas em águas continentais. O algoritmo *ice-1*, desenvolvido por Wingham *et al.* (1986) e aplicado por Bamber (1994) para os dados dos satélites ERS-1 e ERS-2, pretende estimar as alturas das calotas polares, e, mais geralmente, das superfícies continentais. Esse algoritmo é baseado no método de deslocamento do centro de gravidade (*Offset Centre of Gravity* ou *OCOG*), ou seja, busca o centro de gravidade da FO.

Frappart *et al.* (2006), realizaram testes utilizando quatro algoritmos para aquisição de níveis em rios da bacia Amazônica. Segundo os autores, o *ice-1*, ainda que, idealmente, não tenha sido ajustado para aplicação hidrológica, é bastante robusto para FOs obtidas nas medições altimétricas realizadas em águas continentais.

O tratamento das medidas altimétricas também inclui correções na recepção e na avaliação dos dados (*tracking/retracking*). A partir dessas operações, os dados passam a representar medidas dotadas de data e posição, expressas em unidades adequadas e, passam também, a representar informação com garantia de qualidade. Após esse tratamento, os dados, devem ser preparados para a sua disponibilização como registros de dados geofísicos – GDRs (*Geophysical Data Records*). Nesse momento são realizadas diversas correções relativas a erros instrumentais, erros de propagação através da atmosfera, erros causados pelas perturbações relativas à reflexão da superfície, além das correções geofísicas necessárias devido ao deslocamento da Terra em relação ao elipsóide de referência.

2 - A MISSÃO ENVISAT

O ENVISAT (*ENVIronmental SATellite*), o maior satélite para observação da Terra construído até o momento, foi lançado em março de 2002 pela Agência Espacial Européia – ESA (*European Space Agency*). O ENVISAT é um satélite polar-orbital que fornece medidas da atmosfera, oceanos e gelo. Os dados adquiridos pelo ENVISAT são utilizados para o estudo científico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas. Segundo Gardini *et al.* (1995), a missão ENVISAT buscou atingir dois grandes objetivos:

- coletar séries temporais do meio ambiente terrestre em escala global para observar suas tendências, melhorando o monitoramento e controle dos recursos naturais; e,
- contribuir para uma melhor compreensão dos processos que afetam a parte sólida da Terra.

O ENVISAT está posicionado na mesma órbita do satélite ERS-2 (*European Remote Sensing*), seu antecessor, ou seja, em uma órbita elíptica heliosíncrona com uma inclinação de 98,5°, a uma altitude média de 785 km e uma distância intertraço 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*). A tabela 1, apresentada por Zhang (2009) mostra um sumário das características dos altímetros de radar utilizados por alguns satélites.

Tabela 1 – Resumo dos altímetros de radar dos satélites. Fonte: Zhang, 2009.

Nome	Seasat	Geosat	ERS-1	ERS-2	ENVISAT	T/P	Jason 1 e 2
País	USA	USA	Europa	Europa	Europa	USA / França	USA / França
Período da missão	Jul/1978 – out/1978	Mar/1985 – dez/1989	Jul/1991 – mai/1996	Abr/1995 – jun/2003	Mar/2002 – atualmente	Ago/1992	Dez/2001
Altitude da órbita (km)	800	800	785	785	785	1336	1336
Inclinação da órbita (graus)	108	108	98,5	98,5	98,5	66	66
Distância intertraço ao Equador (km) ⁽¹⁾	800,160	164	20-80	80	80	318	318
Período de revisita (dias)	3,17	17	3, 35 e 168	35	35	10	10
Precisão de medida (cm) ⁽²⁾	5	4	3	3	3	2	2

(1) A distância intertraço ao Equador é obtida a partir da equação: $\Delta = 2\pi * R/(n-1)$, onde R é o raio da Terra na linha do Equador, 6378 km; n é o número de ciclos cruzando a linha do Equador para passagens descendentes e ascendentes (para o ENVISAT n = 501, para o T/P n = 127).

(2) A informação da precisão do Seasat e do Geosat se refere aos valores obtidos após as melhorias na determinação da órbita aplicadas retroativamente, as quais reduzem os erros de órbita em aproximadamente 20cm para o Seasat e 10-20 cm para o Geosat (Fu e Cazenave, 2001).

O plano da missão ENVISAT é realizado no *European Space Research Institute* (ESRIN), baseado em demandas dos usuários e em um conjunto de regras predefinidas apontadas pelo uso do satélite e tem uma carga útil otimizada, assegurando a disponibilidade dos dados para a maioria da comunidade de usuários e a resolução de conflitos. ESRIN é um dos cinco centros de observação da Terra especializados da ESA.

O ENVISAT possui diversos produtos e serviços, sendo que os dados utilizados neste estudo são adquiridos através do RA-2 (*Radar Altimeter*). O radar altimétrico do ENVISAT (RA-2) foi desenvolvido para dar continuidade aos radares altimétricos ERS-1 e ERS-2, oferecendo um melhor desempenho nas medições além de novas capacidades.

O RA-2, radar altimétrico que integra a plataforma do ENVISAT, é um radar de alta precisão direcionado para o ponto nadir operando em bi-frequência nas bandas Ku, a 13,6 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 de aproximadamente 3,4 km.

A missão ENVISAT tem os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*) processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydroosphère* – CTOH do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales* – LEGOS.

3 - ESTUDOS PARA VALIDAÇÃO DOS DADOS DE SATÉLITE

Segundo Birkett *et al.* (2002), a validação de um resultado altimétrico é realizada pela comparação com medidas diárias dos níveis locais obtidas a partir de uma régua bastante próxima ao traçado de passagem do satélite. Esses autores obtiveram os dados de níveis a partir de alguns locais na bacia amazônica na década de 90. No geral, o resultado para os valores de rms, entre as estações *in situ* e o altímetro, teve uma variabilidade considerável, com uma média geral de 1,1 m. Os melhores valores obtidos ficaram entre 40 e 60 cm de rms, obtidos para os rios Amazonas, Solimões, Unini e Xingu.

O valor rms (*root mean square* ou média quadrática), usualmente utilizado em bibliografia da área de altimetria, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. É especialmente útil quando as variações são positivas e negativas. Portanto, sempre que mencionado, significa o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos e os níveis *in situ*.

De Oliveira Campos *et al.* (2001), validou as séries temporais do satélite T/P através de duas metodologias: (1) comparação das séries temporais de níveis d'água próximas a um ponto de cruzamento entre perfis ascendentes e descendentes, e (2) comparação com dados de níveis de água fixos oriundos de estações fluviométricas. Nesse trabalho, realizado em um cruzamento de dois traços do satélite T/P localizado nas proximidades do rio Japurá, na bacia amazônica, os autores calcularam um valor de rms de 82 cm para os 134 dados analisados. Esse resultado rms pode ser interpretado como um erro relativo ao uso de médias de medidas instantâneas do T/P na seção do rio Japurá utilizada, cujo alto valor de rms, provavelmente, é causado pela largura estreita do rio (500 m). A utilização de medidas do T/P por intervalos de tempo mais longos resultaria em um valor de rms menor. Segundo os autores, adotando uma média corrida de 150 dias, o rms seria de 55 cm.

Koblinsky *et al.*, 1993, direcionaram seu estudo na comparação entre séries temporais de alturas altimétricas estimadas dos níveis dos rios com estimativas de estações convencionais fluviométricas. As comparações foram realizadas entre as medidas altimétricas e as observações das estações convencionais de réguas para o período entre novembro de 1986 e dezembro de 1988. Foram selecionados locais onde as medidas do Geosat foram realizadas com uma distância de 5 km da estação de réguas. Os autores encontraram quatro traços do Geosat cruzando diretamente sobre as estações *in situ*, nessa região; Serrinha, no rio Negro; Novo Aripuanã, no rio Madeira; Careiro, no rio Paraná; e Manaus, no rio Negro. Os resultados desse trabalho sugeriram que os altímetros de radar podem ser praticáveis para realizar estimativas de rotina dos níveis de rios com uma precisão da ordem de 10 cm de rms.

4 - ÁREA DE ESTUDO

Esse estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Madeira, localizada na parte sudoeste da bacia Amazônica. A bacia do Madeira corresponde, em área, a 23% da bacia Amazônica. Capta 18% da precipitação de chuvas e contribui com 15% do volume de água do rio Amazonas.

A captação de água da bacia do rio Madeira é atípica em relação às demais bacias hidrográficas da Amazônia. Seus afluentes são de pequena importância quanto à descarga hídrica, constituindo, apenas, 25% do total de seu volume de água. Por esta razão, o seu regime hídrico é discordante com o do sistema Solimões/Amazonas, estando seu regime de cheia e vazante relacionado com o clima da região Andina do leste da Bolívia.

Em consequência de um clima muito particular da região sul amazônica, na qual somente duas estações climáticas são bem definidas (verão e inverno), há um período em que as precipitações pluviométricas diminuem, interferindo no rebaixamento do nível das águas fluviais. Este fenômeno coloca em evidência inúmeras ilhas ao longo do rio Madeira, normalmente constituídas de bancos de areia e afloramentos de variados tipos de rocha.

O rio Madeira nasce da confluência dos rios Mamoré e Beni, a jusante da cidade de Guajará-Mirim, na zona de fronteira internacional do Brasil com a Bolívia e, após drenar toda a parte leste do Bolívia, norte e oeste do estado de Rondônia e sul do estado do Amazonas, em um percurso em torno de 1450 km, deságua na margem direita do rio Amazonas, 27 km a montante de Itacoatiara, que fica situada na margem esquerda do mesmo rio.

Através de análise da localização dos traços do satélite sobre a bacia, foram selecionados previamente alguns pontos de estudo onde os traços cruzam o rio principal e estão a menos de 10

km à montante ou à jusante de uma estação fluviométrica. Seguindo esses critérios foram encontrados três locais na sub-bacia do rio Madeira.

5 - METODOLOGIA

5.1 – Fonte dos dados altimétricos

A base de dados utilizada para os estudos que serão apresentados nesse trabalho, foi criada no LEGOS (*Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales*), em Toulouse, França, como parte da estrutura do projeto CASH (*Contribution of Spatial Altimetry to Hydrology*), fundado pelo Ministério Francês de Pesquisa e Tecnologia. Esse projeto coletou observações em rios (cerca de 200 pontos) e lagos (cerca de 150 pontos) no mundo, principalmente provenientes do satélite Topex/Poseidon (T/P).

O trabalho proposto será executado com a utilização dos dados altimétricos obtidos por meio do satélite ENVISAT, entre as coordenadas geográficas 65°W a 60°W e 8°S a 14°S. Esses dados foram extraídos da base de dados do CTOH (*Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère*) do LEGOS. Algumas características da missão e dos dados estão resumidas na Tabela 2. Para o satélite ENVISAT, extraíram-se três traços, totalizando 56 ciclos entre 15/09/2002 e 27/02/2008. O passo de tempo das séries altimétricas é dado pelo período de repetição da órbita. No caso do ENVISAT esse período é de 35 dias.

Tabela 2 – Características da missão altimétrica ENVISAT. Fonte: AVISO (2008).

Missão	ENVISAT
Vocação	Análise ambiental e alterações climáticas
Disponibilidade de dados	09/2002 – atualmente
Traços	2
Ciclos	56
Altitude	785 km
Inclinação da órbita	98,5°
Distância intertraço ao Equador	80 km
Período de revisita	35 dias
Algoritmo das formas de onda	<i>Ice-1</i>
Freqüência de medidas / distância entre duas medidas	20 Hz / 350 m

5.2 – Estações virtuais

Sempre que um traço do satélite cruza um plano de água, tem-se uma potencial estação virtual. O termo estação virtual corresponde à série de medições altimétricas representativas da altura do corpo d'água a cada passagem do satélite equipado com altímetro. Uma estação virtual é definida pelos pontos de medições altimétricas utilizados para o cálculo dos níveis. A estação

virtual representa uma janela retangular. Em cada uma dessas janelas, é possível obter uma série temporal dos níveis de água.

As séries temporais são geradas por meio da seleção da informação referente aos dados altimétricos adquiridos pelo satélite dentro da janela de interesse. Isso significa dizer que, dentro do conjunto de dados adquiridos por um traço do satélite em seus diversos ciclos, posso escolher, a partir da localização da área de interesse, apenas os dados referentes aos níveis de água dessa área. Nesse estudo, a seleção dos dados é realizada através do programa VALS (*Virtual ALtimetry Station*), que identifica os pontos dentro da área de interesse e apresenta seus respectivos valores de níveis em cada tempo. O VALS é um programa disponibilizado através do endereço eletrônico do IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*). Uma identificação e senha de usuário são exigidas para baixar o programa, que utiliza o programa Java Web Start para possibilitar a sua distribuição.

O VALS consiste de rotinas desenvolvidas e incorporadas ao programa GRASS GIS 6.2.1 que permitem a seleção tridimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade. Essa metodologia é descrita detalhadamente em Roux *et al.* (2008) e Seyler *et al.* (2008).

A metodologia para a obtenção da informação inerente às medidas altimétricas é finalizada pela estimativa das séries temporais de níveis de água. A estimativa dos níveis é dada pelo cálculo da média e da mediana do conjunto de valores medidos pelo altímetro.

5.2.1 – Criação das estações virtuais e geração das séries temporais de níveis de água

Através da análise da localização dos traços do satélite ENVISAT sobre a sub-bacia escolhida para o estudo preliminar, são selecionados os locais que preenchem dois requisitos: (1) o traço do ENVISAT cruza o canal do rio, e (2) existe uma estação fluviométrica a menos de 10 km à jusante ou à montante do traço.

Após a seleção dos locais, são criadas as estações virtuais que dão origem às séries temporais de níveis de água. Nesse estudo, as séries temporais de cada estação virtual criada por meio dos dados adquiridos pelo ENVISAT, serão geradas com o auxílio do algoritmo *ice-1*.

A partir da região de interesse, nesse caso a bacia do rio Madeira, a escolha dos pontos de estudo é realizada pela análise das imagens fornecidas pelo Google Earth. Sobre as imagens da bacia são, então, inseridas as estações fluviométricas (estações *in situ*) com o auxílio do cadastro das estações da rede hidrometeorológica nacional disponibilizado e atualizado pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Pelo programa VALS, é possível acessar os dados do traço ENVISAT escolhido. A área de estudo é estabelecida por meio do desenho de um polígono sobre a imagem do Google Earth, que englobe a seção do rio sendo cruzada pelo traço do satélite. Assim, o programa seleciona apenas os dados que serão analisados, ou seja, as medidas realizadas no interior do polígono.

Após o acesso aos dados de interesse, o VALS produz um gráfico com os níveis altimétricos medidos no interior do polígono. De posse das medidas dos níveis altimétricos adquiridas dentro do polígono, parte-se para a fase da análise visual realizada pelo usuário. Esse é um ponto decisivo nessa metodologia, pois deverão ser excluídos todos os pontos que não representam planos de água (margens do rio, ilhas, vegetação ciliar, etc.). Nessa fase do trabalho também deverão ser identificados e excluídos os ciclos defeituosos, caso existirem. Esse processo é realizado pela análise das medidas de níveis visualizadas no VALS. Assim, por exclusão, são selecionados os pontos que representam alturas de níveis de água. Todos os pontos que representem qualquer alvo além do plano de água são excluídos e não pertencerão à estação virtual, assim como não serão considerados na geração da série temporal.

De posse dos pontos escolhidos para definir a estação virtual, o VALS gera a série cronológica dos níveis dos valores médios e dos valores da mediana dos pontos selecionados para um ciclo. Todos os dados de níveis extraídos são, então, exportados por meio de um arquivo texto. Assim os pontos são caracterizados individualmente através da posição geográfica, data de aquisição e valores estatísticos (média, mediana, etc.) das alturas.

Pela análise e comparação desses resultados, busca-se validar ou não o uso dos dados do satélite para o objetivo proposto, ou seja, a complementação e verificação das informações geradas pela rede de estações fluviométricas presentes na bacia em estudo.

Criada a estação virtual e gerada a série temporal de níveis altimétricos, parte-se para o estabelecimento da série temporal *in situ* que servirá como base de comparação para a avaliação do comportamento dos dados gerados pelo altímetro através da metodologia proposta.

6 – RESULTADOS

Na bacia escolhida para estudo, a bacia hidrográfica do rio Madeira, foram encontrados três locais que satisfizeram as condições iniciais de escolha, ou seja, uma distância máxima de 10 quilômetros entre o cruzamento do traço do satélite sobre o rio e a estação *in situ*. Esses locais foram selecionados com o auxílio das imagens do Google Earth, como apresentado na figura 3.

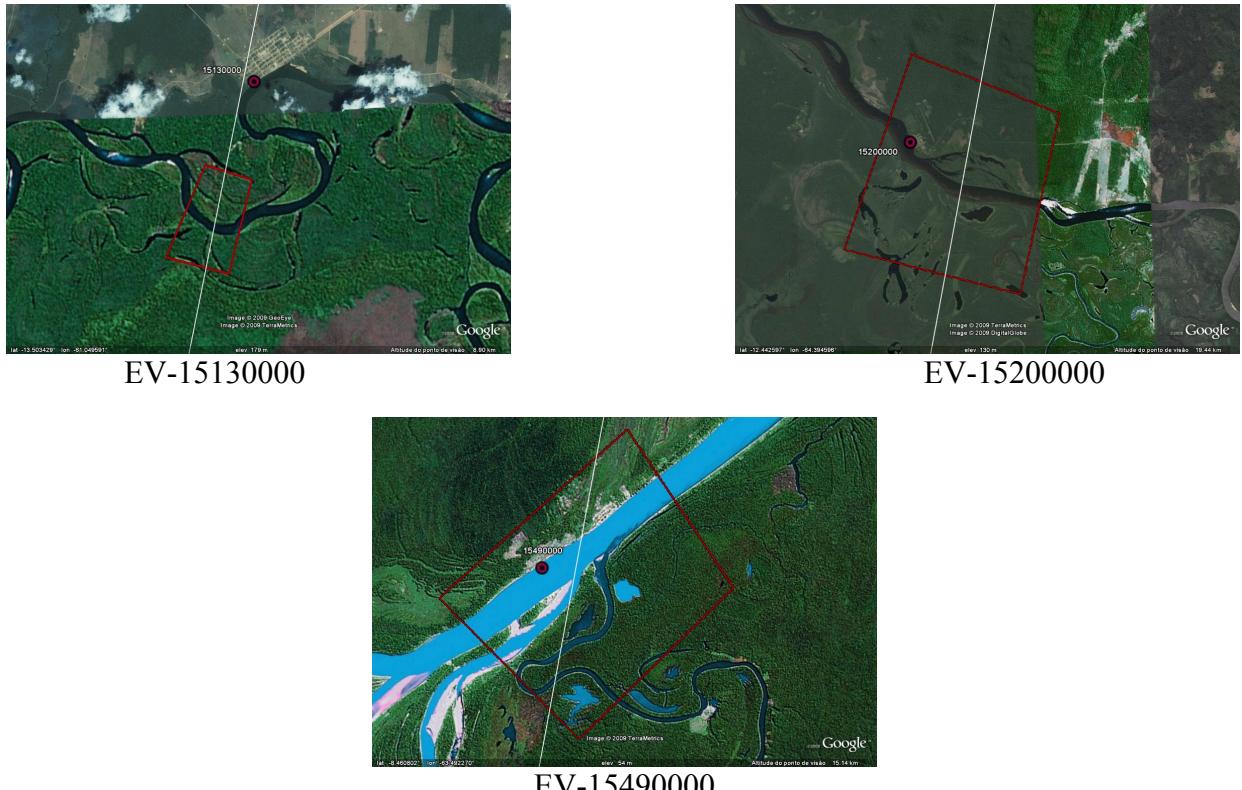


Figura 3 – Locais selecionados para a criação das estações virtuais.

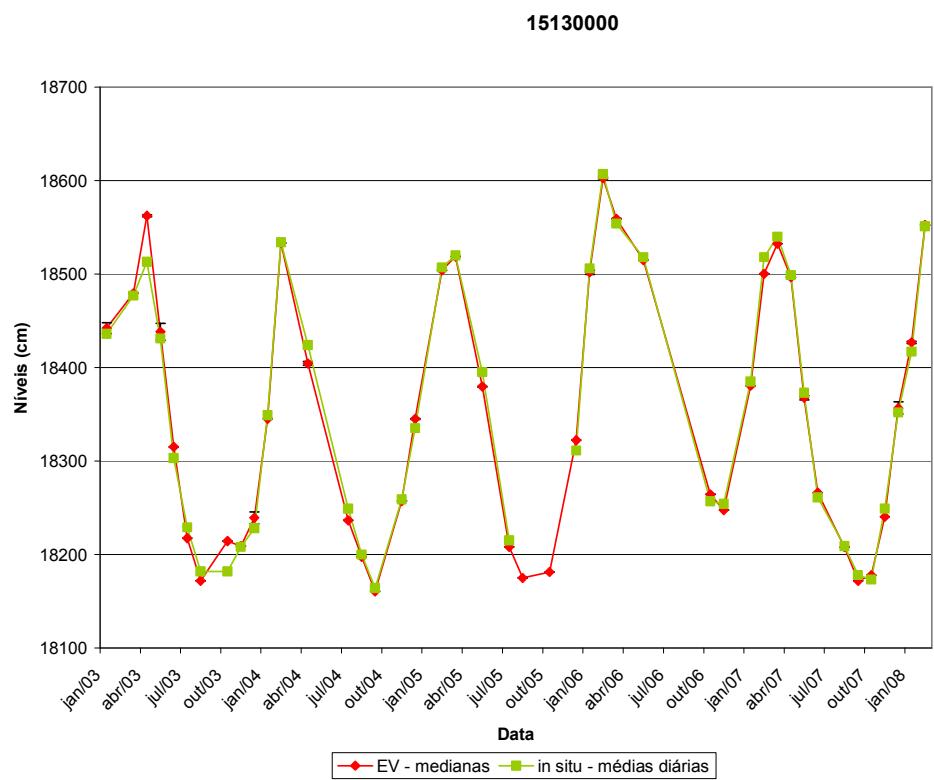
Na figura 3, a linha branca representa o traço do ENVISAT e o círculo em vermelho mostra a localização da estação fluviométrica. O polígono vermelho é desenhado sobre a imagem do Google Earth para delimitar os dados de interesse que serão extraídos através do VALS. Assim, para cada uma das três interseções escolhidas, foram extraídas as medidas altimétricas correspondentes ao plano de água que geraram as estações virtuais apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Estações virtuais criadas para o estudo.

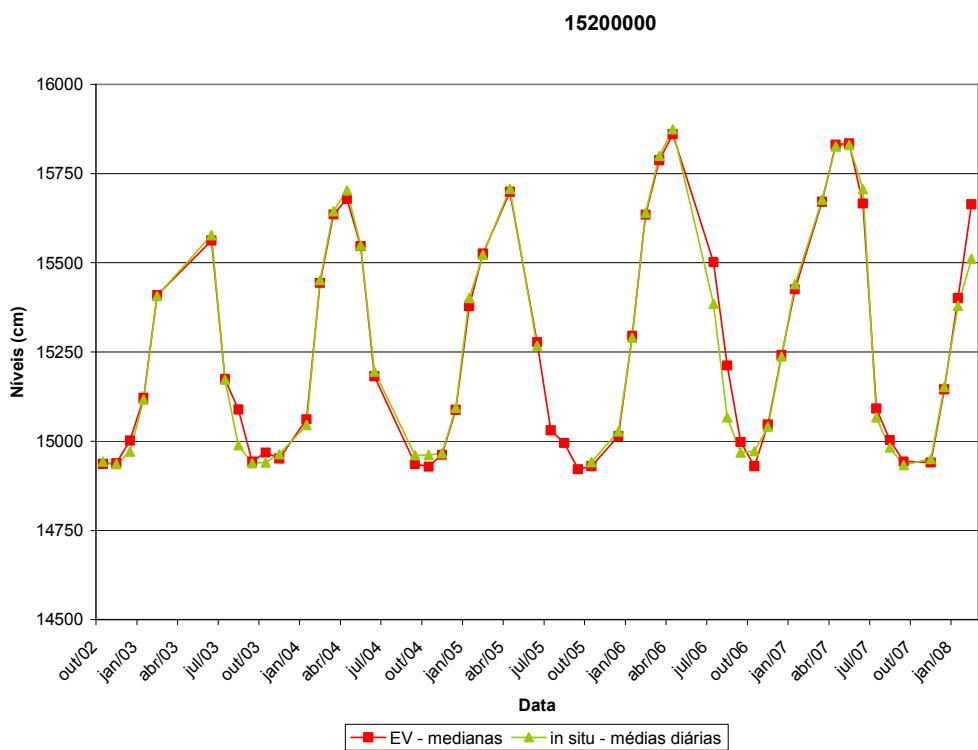
Estação Virtual	Local	Traço ENVISAT	Longitude Média (°)	Latitude Média (°)
EV-15130000	Rio Guaporé	478	-61.06	-13.51
EV-15200000	Rio Guaporé	192	-64.41	-12.45
EV-15490000	Rio Madeira	192	-63.51	-8.45

A seguir são apresentados os resultados obtidos na análise preliminar realizada nos três locais selecionados da bacia do rio Madeira. Os gráficos mostram as duas séries temporais geradas. A série dos níveis altimétricos, gerada a partir do ENVISAT e a série de níveis de água medida pela estação fluviométrica (estação *in situ*).

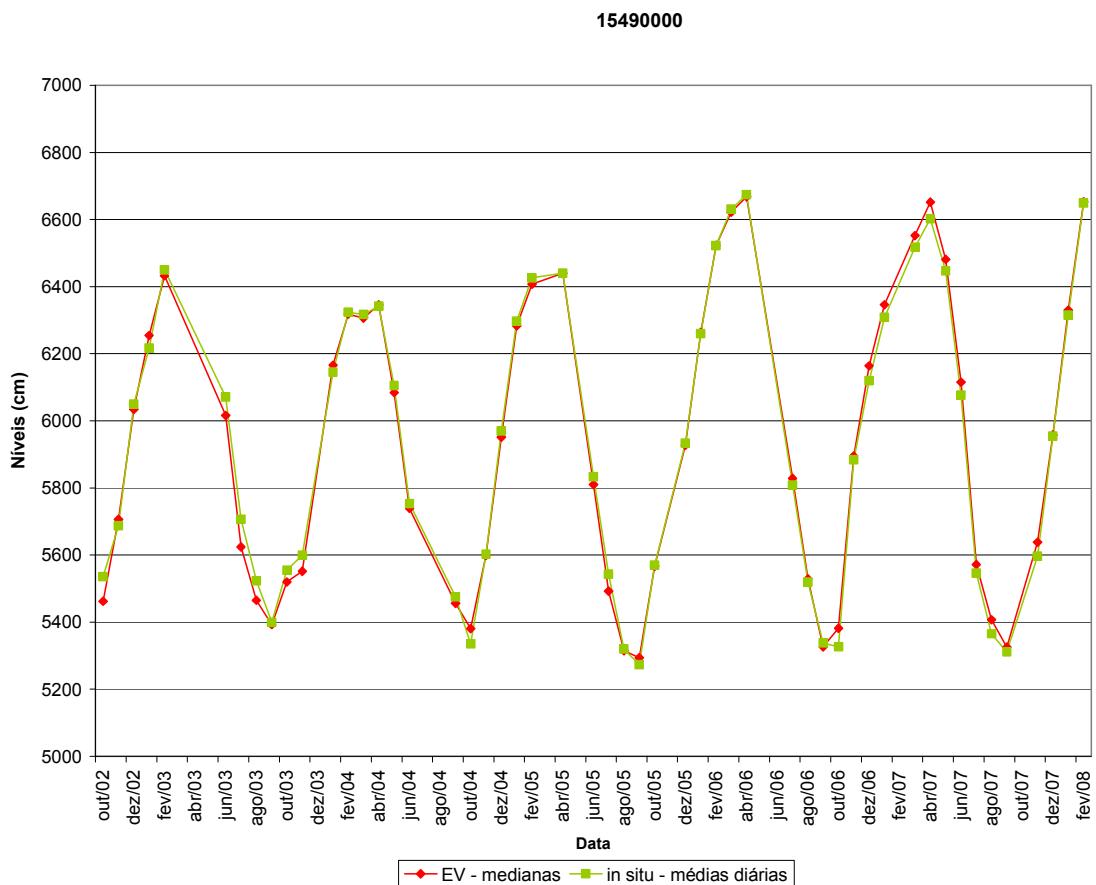
a) Estação virtual EV-15130000 (traço ENVISAT 478) e estação fluviométrica 15130000 (Pimenteiras).



b) Estação virtual EV – 15200000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15200000 (Príncipe da Beira).



c) Estação virtual EV – 15490000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15490000 (Prosperidade)



7 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os gráficos apresentados mostram as séries temporais geradas a partir das réguas fluviométricas e a partir das estações virtuais oriundas do ENVISAT. As séries temporais de registros das estações fluviométricas convencionais são formadas pela média diária das duas leituras realizadas diariamente pelos observadores, às 7 horas e às 17 horas. Por outro lado, cada ponto das séries temporais altimétricas representa a mediana calculada para os pontos selecionados para um ciclo. Assim, o tratamento dos dados realizado possibilita obter arquivos para cada posição, com data, latitude e longitude, e altura do nível de água.

Os resultados mostram que as séries tem comportamento bastante similar. Essa afirmação pode ser interpretada como uma boa eficiência do ENVISAT no registro dos níveis de água dos rios estudados. Partindo do princípio que a série de dados *in situ* reproduz com fidelidade a variação dos níveis, é possível assumir que os dados altimétricos do ENVISAT são bastante realistas. Também é

importante observar que o altímetro registrou os dados com a mesma qualidade em épocas de níveis altos e baixos das águas.

Outro fator importante a considerar, é que a eficiência do altímetro para a captação das variações de comportamento dos corpos d'água, está estreitamente ligada à qualidade no momento da escolha dos pontos que realmente representam superfícies de água. Nesse trabalho, isso, supostamente, pôde ser realizado a partir da ferramenta de análise visual oferecida pelo programa VALS. Entretanto, essa ferramenta torna-se de grande valia, quando aliada ao conhecimento dos locais estudados. Conhecer o local possibilita uma visão ampla do perfil apresentado pelos dados do satélite, uma vez que é possível ligar a geometria do perfil transversal visualizado no VALS com o desenho real da seção.

Pretende-se com isso, ressaltar que um conhecimento prévio de características como o tipo de seção (se encaixada ou não), o comportamento da seção nas épocas de máxima amplitude de variação dos níveis (secas e cheias), os efeitos dessa amplitude sobre a geometria da seção (desbarrancamentos, ocupação de áreas de inundação ou, ainda, surgimento de ilhas), torna-se o diferencial que pode trazer confiabilidade às análises. Essa é a confiabilidade necessária para validar tanto resultados bons como resultados ruins.

A observação das duplas de séries temporais (*in situ* e altimétricas), nos três casos, possibilita dizer que os dados obtidos através da altimetria satelital podem auxiliar, de forma bastante prática, o preenchimento de falhas da série histórica de dados. Essa conclusão é importante, pois aborda o problema a partir de outra referência, ou seja, a estimativa de níveis de água nas réguas fluviométricas a partir dos dados altimétricos. Nesse caso, a base de dados é altimétrica.

Em relação aos parâmetros numéricos de comparação, a tabela 4 apresenta os valores de rms obtidos para cada comparação realizada entre os dados de níveis de água *in situ* e altimétricos. Conforme exposto anteriormente, o valor rms (média quadrática) representa o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos (médias ou medianas) e os níveis *in situ*.

Tabela 4 – Resultados de rms obtidos para cada estação.

Código das estações que geraram as séries <i>in situ</i> e altimétricas	Número de ciclos considerados	Amplitude aproximada de variação dos níveis (cm)	rms (cm)
15130000	44 (42)	600	12
15200000	52 (49)	1250	35
15490000	52	1600	32

Observação: os valores entre parênteses na coluna "Número de ciclos considerados" significam o número de efetivo de ciclos utilizados para o cálculo do rms. Por exemplo, 44 ciclos foram selecionados na estação virtual 15130000, porém, devido a falha na série de níveis *in situ*, 2 ciclos foram desconsiderados.

A partir da tabela 4 é possível observar que a estação 15130000 foi a que teve o menor rms calculado. Isso pode estar ligado ao fato dessa estação possuir uma menor amplitude de variação entre os períodos de águas baixas e altas. Pode-se ver, pelo eixo vertical dos gráficos (níveis em cm) que as estações 15200000 e 15490000 possuem uma amplitude de variação bem maior.

Assim, é possível interpretar esse resultado como uma queda no desempenho do satélite para registrar grandes variações de níveis. Para níveis de água baixos, a seção torna-se mais estreita. Dessa forma, haverá um menor número de respostas do eco originadas diretamente sobre a superfície da água. Isso pode ocasionar uma perda dessa informação em meio aos dados recebidos pelos ecos provenientes de outras superfícies adjacentes ao curso do rio. Assim, o resultado obtido através da mediana seria superestimado. Isso pode ser observado muito sutilmente no gráfico da estação 15200000.

Por outro lado, seções com grandes variações de níveis sofrem mudanças consideráveis nas margens após a passagem da cheia e durante o período de estiagem do rio, quando os taludes ficam desprotegidos e sujeitos à erosão. Esse fato causa, muitas vezes, o deslocamento e até o desmoronamento da seção de réguas. Nessas situações, bastante comuns na Amazônia, os registros são feitos pelo observador carregando erros, muitas vezes difíceis de serem recuperados, uma vez que o intervalo normal de manutenção das estações fluviométricas estudadas é de cerca de três meses. Assim, nessas situações, os registros de níveis *in situ* poderiam ser a fonte do erro. Essa situação é bastante usual na estação fluviométrica 15490000, Prosperidade, localizada na calha do rio Madeira, a jusante de Porto Velho.

BIBLIOGRAFIA

- AVISO. (2008). “*Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques*”. Disponível em: http://www.jason.oceanobs.com/html/alti/principe_fr.html. Acesso em: 03/05/2008.
- Bamber, J. L. (1994). “*Ice sheet altimeter processing scheme*”. International Journal of Remote Sensing, 15 (4), pp. 925-938.
- Birkett, C. M.; Mertes, L. A. K.; Dunne, T.; Costa, M. H.; Jasinski, M. J. (2002). “*Surface water dynamics in the Amazon basin: Application of satellite radar altimetry*”. Journal of Geophysical Research, 107 (D20), pp. 8059-8080.
- Cudlip W.; Ridley J. K.; Rapley C. G. (1992). “*The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands*” in Remote Sensing and Global Change (Proceedings of the 16th Annual Conference of Remote Sensing Society, London, UK), pp. 207-216.
- De Oliveira Campos, I.; Mercier, F.; Maheu, C.; Cochonneau, G.; Kosuth, P.; Blitzkow, D.; Cazenave, A. (2001). “*Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon Basin*”. C. R. Acad. Sci. Series IIA Earth and Planetary Science, 333 (10), pp. 663-643.
- Frappart, F.; Calmant, S.; Cauhopé, M.; Seyler, F.; Cazenave, A. (2006). “*Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin*”. Remote Sensing of Environment, 100, pp. 252–264.
- Fu, L. L.; Cazenave, A. (2001). *Satellite Altimetry and Earth Science, A Handbook of Techniques and Applications*. Academic Press. London, UK, 464 p.
- Guzkowska, M. A. J.; Rapley, J. K.; Cudlip, W; Birkett, C. M.; Scott, R. F. (1990). “*Developments in inland water and land altimetry*”. Eur. Agency Conf. Rep.
- Koblinsky, C. J.; Clarke, R. T.; Brenner, A. C.; Frey, H. (1993). “*Measurement of River Level Variations with Satellite Altimetry*”. Water Resources Research, 29 (6), pp. 1839-1848.
- Leon, J. G.; Bonnet, M. P.; Cauhopé, M.; Calmant, S.; Seyler, F. (2008). “*Distributed water flow estimates of the upper Negro river using a Muskingum-Cunge routing model constrained by satellite altimetry*”. J. Hydrol. (submetido).

Rapley, C. G.; Guzkowska, M. A. J.; Cudlip, W.; Mason, I. M. (1987). “*An exploratory study of inland altimetry using Seasat data*”. ESA Contract Rep., Eur. Space Agency.

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

Santos da Silva, J.; Rotunno Filho, O. C.; Roux, E.; Seyler, F.; Calmant, S. (2009). “*Níveis de água nas zonas úmidas da bacia Amazônica estimadas por satélites altimétricos*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, submetido.

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

Wehr, T.; Attema, E. (2001). “*Geophysical validation of ENVISAT data products*”. Advances in Space Research, 28 (1), pp. 83-91.

Zhang, M. (2009). “*Satellite radar altimetry for inland hydrologic studies*”. Geodetic Science and Surveying, report no. 491.

Zelli, C. (1999). “*ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter: Instrument design and pre-launch performance assessment review*”. Acta Astronautica, 44, pp. 323-333.