

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente – PPG-CLIAMB

**DESCARGA DE MARGEM PLENA NA BACIA AMAZÔNICA ATRAVÉS DA
ALTIMETRIA ESPACIAL**

JORJÂNIA DE OLIVEIRA LEÃO

Manaus, Amazonas
Novembro, 2013

JORJÂNIA DE OLIVEIRA LEÃO

**DESCARGA DE MARGEM PLENA NA BACIA AMAZÔNICA ATRAVÉS DA
ALTIMETRIA ESPACIAL**

Prof^a. Dr^a. Joecila Santos da Silva – Orientadora

Proposta de pesquisa apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e da Universidade do Estado do Amazonas (INPA/UEA) como requisito parcial para obtenção do título de Mestrado em Clima e Ambiente, área de concentração: Hidrologia.

Manaus, Amazonas
Novembro, 2013



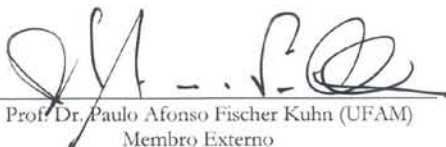
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE




ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO
DE JORJÂNIA DE OLIVEIRA LEÃO
ALUNA DO CURSO DE MESTRADO
EM CLIMA E AMBIENTE.

Aos 29 dias do mês de Novembro do ano de 2013, às 15:00 horas, realizou-se na sala de aula PPG-CLIAMB, Prédio do LBA, INPA - CAMPUS II, sito à Av. André Araújo Aleixo, a sessão de defesa pública da dissertação de Mestrado da aluna Jorjânia de Oliveira Leão, sob o título “Altimetria espacial aplicada ao cálculo de descarga de margens plenas na bacia Amazônica”, em complemento aos critérios exigidos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente, tendo como orientadora a Professora Doutora Joecila Santos da Silva, segundo encaminhamento da Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente e de acordo com os registros constantes na secretaria do Programa. A Banca Julgadora foi composta pelos seguintes membros: Professora Doutora Joecila Santos da Silva (Presidente), Professor Doutor Paulo Afonso Fischer Kuhn (Membro Externo) e Antônio Ocimar Manzi (Membro Interno).
Parecer: Encerrando os trabalhos, os membros da Banca Julgadora APROVARAM a dissertação.


Prof. Dr. Joecila Santos da Silva (UEA)
Presidente


Prof. Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn (UFAM)
Membro Externo


Prof. Dr. Antônio Ocimar Manzi (INPA)
Membro Interno

Ficha Catalográfica

L437 Leão, Jorjânia de Oliveira
Descarga de margem plena na bacia amazônica através da altimetria espacial /
Jorjânia de Oliveira Leão. --- Manaus : [s.n], 2013.
v, 53f. : il.

Dissertação (Mestrado) --- INPA/UEA, Manaus, 2013.
Orientador :Joecila Santos da Silva.
Área de concentração :Interações Clima-Biosfera na Amazônia.

1. Hidrologia. 2. Altimetria Espacial.3. Descarga de Margem Plena.
I. Título.

CDD 551.48

Sinopse:

O presente estudo é dedicado à determinação da descarga de margem plena usando satélite altimétrico e imagens para determinar os parâmetros hidrológicos, tais como a fase da descarga de margem plena no cruzamento dos traços no leito do rio, largura, amplitude, área da seção e a inclinação da superfície do rio. Aplicado nos principais afluentes do rio Amazonas, os rios Negro e Madeira, os resultados mostraram-se bastante promissores, pois verificou-se que os dados hidrológicos e geomorfológico são essenciais para um bom resultado na utilização do produto altimétrico.

Palavras-chaves: hidrologia, altimetria espacial, descarga de margem plena

Dedico

A Minha família, especialmente
a minha mãe Francisca M. de Oliveira e meu pai.
Pedro Miranda Leão(*in memoriam*).

Agradecimentos

Não poderia deixar de expressar neste trabalho os meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente colaboraram e cooperaram para a concretização desse trabalho, assim minhas palavras de gratidão vão:

- A Deus, que me deu o dom da vida e com isso a possibilidade de realizar esse trabalho.
- À minha família, em especial a minha mãe que neste período de elaboração deste trabalho tiveram que superar a dor da perda do meu pai, mesmo que as distâncias mantiveram-se sempre ao meu lado, me incentivando e dando força. Obrigada por tudo.
- À Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela oportunidade de participar de seu Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (PPG-CLIAMB) e utilização de suas instalações.
- Ao projeto Dados Espaciais para a Biodiversidade e Recursos Hídricos (DS BIODIVA), no qual este estudo está inserido, sendo financiado pela FAPEAM.
- À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão de bolsa de estudo.
- À Agência Nacional de Águas (ANA) pelos dados *in situ*. 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). À *European Space Agency* (ESA), pela garantia do uso dos dados das missões ENVISAT e JASON-2.
- À minha orientadora, Professora Dra. Joecila Santos da Silva, pela oportunidade concedida, dedicação, disponibilidade, sugestões, ensinamentos, paciência, amizade e colaboração em todas as fases de desenvolvimento deste trabalho.
- À Aline Corrêa de Souza, Robson Azevedo de Oliveira, Fank Menezes e Guilherme Figliuolo pela colaboração, gratidão, ensinamentos e disponibilidade no desenvolvimento deste trabalho.
- A todos os colaboradores do programa de pesquisa do laboratório de Recursos Hídrico de Altimetria Espacial da Amazonia - RHASA, onde principiei meus conhecimentos de Altimetria Espacial e me ajudaram nos esclarecimentos e dúvidas surgidas ao longo deste trabalho.
- À todos os colegas do PPG-CLIAMB por compartilharem momentos de estresses, tensão, alegria e carinhos.

Resumo

Esta dissertação propõe o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo da descarga de margem plena ao longo dos rios da Bacia Amazônica empregando-se dados de altimetria espacial. Utilizou-se os dados das missões altimétricas ENVISAT e JASON-2 para a determinação de parâmetros hidrológicos, tais como largura, amplitude, área da seção e inclinação da superfície do rio. Esta metodologia foi validada através do método da curva de classificação, procedimento que determina o ponto de inflexão, estabelecendo a cota de extravasamento e a vazão de margem plena. Os resultados das validações denotam uma similaridade entre os dados calculados e os dados *in situ*, com RMS variando de 38 a 1633 m³/s. Os produtos do estudo apontaram o melhor desempenho para a missão JASON-2, tendo o *Ice-1* como o melhor algoritmo de tratamento, indicando um índice satisfatório de 75% das validações. Os resultados estimulam a aplicação da metodologia em grandes rios e/ou em regiões pouco monitoradas.

Abstract

This study proposes a methodology to calculate bankfull discharge along the rivers of the Amazon Basin by radar altimetry. We used ENVISAT and JASON - 2 satellites data to determine hydrological parameters such as width, amplitude, cross-sectional area and water surface slope of the river. We have used a classification curve to validate this approach; the procedure determines the inflection point associated with the level that fills the channel to the top of its banks and at a point where the water begins to over flow onto a floodplain. Validations between bankfull discharge by altimetry data and gauges result in RMS ranging between 38 to 1633 m³/s. Comparisons with different missions and algorithms showed that JASON-2 and Ice-1 algorithm, provides the more accurate bankfull discharge, e.g. 75 % of the validations. Results encourage the potential of this methodology at large rivers and/or poorly monitored regions.

Sumário

Lista de Figuras.....	9
Apresentação.....	10
Objetivos.....	14
Geral.....	14
Artigo.....	15
Resumo.....	16
Abstract.....	17
Introdução.....	17
Materiais e métodos.....	20
Resultados.....	27
Conclusão.....	33
Agradecimentos.....	34
Referências Bibliográficas.....	34
Lista de Tabelas.....	41
Lista de figuras.....	47
Conclusões e Recomendações.....	53

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização das bacias do rio Negro e Madeira objeto de estudo e das estações virtuais.....	46
Figura 2 a) - Validação das séries temporais altimétricas de nível de água do rio Negro.....	47
Figura 2 b) - Validação das séries temporais altimétricas de nível de água do rio Madeira.....	47
Figura 3a) - Curva de classificação para estação fluviométrica de Cucuí.....	48
Figura 3b) - Curva de classificação para estação fluviométrica de Curicuriari.....	48
Figura 3c) - Curva de classificação para estação fluviométrica de Serrinha.....	48
Figura 3d) - Curva de classificação para estação fluviométrica de Humaitá.....	48
Figura 4 - Cotogramas que caracterizam o regime hidrológico da bacia do rio Negro.....	49
Figura 5 - Cotogramas que caracterizam o regime hidrológico da bacia do rio Madeira.....	50
Figura 6 - Variação espacial das vazões de margens plenas no rio Negro.....	51
Figura 7 - Variação espacial das vazões de margens plenas no rio Madeira.....	51

Apresentação

De acordo com Seyler (2009) o meio ambiente não é uma simples coleção de fatores que se pode analisar separadamente para chegar a um entendimento global, sendo as águas superficiais um fator de integração desse processo, onde seus caminhos, quantidades, qualidades são bons indicadores de respostas a parâmetros climáticos em função das modificações antropogênicas, razão pelo qual é tão importante monitorar a superfície da água continental.

Toda tentativa de caracterização dessas áreas 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, medidas de vazões e da superfície inundada durante as cheias e vazantes, cujo custo de instalação e manutenção é bastante significativo (Alsdorf 2001).

Atualmente, o monitoramento continental dos recursos hídricos, a variabilidade temporal e as descargas dos rios são fornecidos através de redes hidrológicas. Estas redes são organizadas em redes nacionais baseadas em medidas humanas, resultando em medidas subjetivas, pois, a integridade e qualidade dos registros dos dados dependem da disponibilidade do operador e sua assiduidade (Roux *et al.* 2010). Os desafios comuns à maioria das regiões incluem, entre outros fatores redes de monitoramento inadequadas e falhas nos registros (Calmant 2008).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial – WMO (1994), uma bacia precariamente monitorada possuiria pelo menos uma estação por 5.750 km², no Brasil essa exigência é atendida, pois possui uma estação a cada 4.669 km², no entanto apresenta uma má distribuição geográfica, uma vez que a bacia Amazônica ocupa cerca de 40% do território brasileiro e possui apenas 10,9 % (60) das estações fluviométricas do sistema de monitoramento nacional (ANA 2012).

Os dados de satélite de observação permitem uma visualização da superfície em escala continental, sobretudo nas regiões de difícil acesso, como na bacia Amazônica, de forma homogênea, contínua e frequente, com detalhamento espacial que as redes tradicionais de observação não permitem (Calmant e Seyler 2006 e Calmant *et al.* 2008). A partir dos

sensores remotos, os dados hidrológicos podem ser intensificados na obtenção e complementação do seu monitoramento, pois, através das estações virtuais, mecanismo que na passagem dos satélites altimétricos, que intercepta uma superfície plana de água, captam informações das variações do nível de água.

A bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo, possui uma área de drenagem de aproximadamente 6.112.000 km². Caracteriza-se por sua imensa superfície drenada (37% da América do Sul), sua baixíssima declividade na planície aluvial é de 1 a 6 cm/km Meade *et al.* (1991), e por uma relevante sazonalidade no regime hidrológico (Guyot *et al.* 1993 e 1994). Todos os cursos de água que se juntam ao rio Amazonas entre o Leste do Peru ao 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 (Holland 1988; Junk *et al.* 1989; Naiman *et al.* 1989; Kolasa e Zalewski 1995 e Ward *et al.* 1999).

Desde a década de 70, diversos trabalhos foram desenvolvidos a respeito do ciclo hidrológico na Amazônia, como Molion (1975) e Salati *et al.* (1979), porém os estudos relacionados à interpretação dos dados hidrológicos são mais recentes com os desenvolvidos por Guyot *et al.* (1993 e 1998), Molonier *et al.* (1993 e 1996) e Marengo *et al.* (1994). Dentre eles alguns trabalhos realizados na bacia do rio Negro estão relacionados à geometria dos canais fluviais como Guyot *et al.* (1994); o estudo do cálculo de descargas de alguns rios inclusive o rio Negro realizados por Filizola (2009 a e c), estimativas de curvas-chaves e descargas modeladas por Leon (2006) e Getirana *et al.* (2010).

Um dos principais conceitos metodológicos que abordam os canais fluviais é a teoria da geometria de canais fluviais, proposta por Leopold e Maddock (1953), sendo uma das primeiras aplicações de análise quantitativa em geomorfologia fluvial. A geometria hidráulica descreve a relação entre variáveis contidas na seção transversal (vazão, profundidade média, largura do canal e área da seção transversal) que se comportam de maneira alométrica (interrelação entre alterações e dimensão global). Essas relações representadas por variáveis geométricas são definidas em dois níveis de análise: o nível de água e o nível de margens plenas.

De acordo com Wolman e Leopold(1957) o nível de margens plenas corresponde a um plano horizontal no qual a descarga líquida preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à planície de inundação. Trata-se de um nível com grande significado hidrogeomorfológico, pois trata-se da interação entre os processos hidrológicos e os geomorfológicos, sendo possível identificá-lo em campo, pois, ao contrário do nível do fluxo fluvial, as margens plenas possuem certa estabilidade. Dessa maneira, o nível de margens plenas delimita os processos fluviais que modelam o canal e os que constroem a planície de inundação.

As variáveis geométricas contidas na seção transversal resultam da interação de fatores relacionados à descarga de detritos, suas dimensões médias, quantidades, litologias, formas deposicionais e fluxos de água; ou seja, suas dimensões não são arbitrárias. Quando as propriedades dos canais são alteradas por mudanças antrópicas, climáticas ou cobertura de vegetal, o canal se ajusta para um novo conjunto de condições.

A geometria hidráulica pode ser estudada de duas maneiras: ao longo do perfil longitudinal que prevê a adaptação do tamanho e da forma do canal de acordo com variação da vazão ao longo do canal (montante-jusante) e em determinada seção transversal (estações fluviométricas) que prevê as mudanças na largura, profundidade e velocidade com variação da vazão (Ferguson 1986).

A presente dissertação enquadra-se na área de conhecimento da Hidrologia, a qual tem como objetivo principal a análise da descarga de margens plenas utilizando os dados originados de satélites altimétricos. O passo de tempo normalmente utilizado é de acordo com os ciclos de cada satélite, que no caso deste estudo foi de 10 dias para o JASON-2 e 35 dias para o ENVISAT. O diferencial deste trabalho é o uso do modelo proposto por Dingman e Sharma (1997), pois diferentemente do método de Manning, não necessita da especificação do parâmetro de rugosidade (n), que tem menos vieses e minimiza a multicolinearidade tendo um desempenho melhor quando aplicado à mudança de descarga, aliado à atuação da aplicação do produto espacial, em bacias com características próprias como é o caso das bacias do rio Negro e rio Madeira.

Destaca-se que a validação do modelo utilizou a curva de classificação, método empregado pelo *United States Department of Agriculture/Federal Interagency Stream Restoration Working Group* (USDA-FISRWG 1998) onde na margem de extravasamento a curva de descarga (definida pela cota e vazão) apresenta uma pronunciada mudança em sua

trajetória, cuja cotade inflexão corresponde ao plano horizontal no qual a vazão preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à planície de inundação, além da comparação realizada entre os satélites ENVISAT e JASON-2 com os seus respectivos algoritmos de tratamento.

Uma vez que a nova forma de obtenção de dados de cota do nível da água, através da altimetria espacial, produz séries temporais de boa qualidade com valor eficaz Root Man Square (RMS) de 34 e 36 cm em relação às réguas *in situ*, o desenvolvimento do estudo com a aplicação da altimetria espacial no cálculo de vazão de margem plena utilizando o método proposto por Dingman e Sharma (1997), revelaram resultados animadores com RMS variando de 38 a 1633 m³/s entre os dados calculados e os observados *in situ*. A metodologia mostrou-se auspiciosa estimulando sua aplicação principalmente em grandes rios e lugares remotos, de difícil acesso e pouco monitorados, como a Amazônia.

Geral

Aplicar os dados dos níveis de água obtidos por satélites altimétricos para o cálculo de vazão de margens plenas nos rios Negro e Madeira. Alguns procedimentos serão realizados para alcançar o objetivo final, a saber:

- Tratar os dados altimétricos obtidos por meio das estações virtuais para obtenção dos níveis de água;
- Validar os dados altimétricos com dados *in situ*, obtendo-se o RMS;
- Obter a largura dos rios em cada seção de cruzamento dos traços dos satélites com leito do rio;
- Calcular a amplitude dos níveis de água entre os períodos de cheia e estiagem;
- Calcular a área da seção transversal de margem plena dos rios;
- Calcular a declividade da superfície da lâmina de água dos rios;
- Validar o cálculo da descarga de margens plenas através de dados de descarga *in situ* e entre os satélites com seus respectivos algoritmos de Forma de Onda (FO) *Ice-1* e *Ice-3*.

Leão, J.O; Silva, J.S, Figliuolo, G.C; Souza, A.C; Freitas, F.M, Seyler, F; Calmant S;

Descarga de margem plena na bacia Amazônica através da Altimetria Espacial a ser submetido para a revista Acta da Amazônia.

1 Descarga de margem plena na bacia Amazônia através da altimetria espacial

2

3 Jorjânia de Oliveira LEÃO¹, Aline Correa de SOUZA², Guilherme Cordeiro FIGLIUOLO³,
4 Frank Menezes de FREITAS⁴, Joecila Santos da SILVA⁵, Frédérique SEYLER⁶, Stéphane
5 CALMANT⁷

6 Resumo

7 Este estudo propõe o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo da descarga de
8 margem plena ao longo dos rios da Bacia Amazônica empregando-se dados de altimetria
9 espacial. Utilizou-se os dados das missões altimétricas ENVISAT e JASON-2 para a
10 determinação de parâmetros hidrológicos, tais como largura, amplitude, área da seção e
11 inclinação da superfície do rio. Esta metodologia foi validada através do método da curva de
12 classificação, procedimento que determina o ponto de inflexão, estabelecendo a cota de
13 extravasamento e a vazão de margem plena. Os resultados das validações denotam uma
14 similaridade entre os dados calculados e os dados *in situ*, com RMS variando de 162 a 1633
15 m³/s. Os produtos do estudo apontaram o melhor desempenho para a missão JASON-2, tendo
16 o *Ice-1* como o melhor algoritmo de tratamento, indicando um índice satisfatório de 75% das
17 validações. Os resultados estimulam a aplicação da metodologia em grandes rios e/ou em
18 regiões pouco monitoradas.

19

20 PALAVRA- CHAVE: Descarga de Margem Plena; Altimetria Espacial; Hidrologia

¹Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB, INPA/UEA). Av. André Araújo, 2936, Campus II, Aleixo, 69060-001, Manaus, AM, Brasil. ¹jolleao@gmail.com; ²alinecorrea.acs@gmail.com

³Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Escola Superior de Tecnologia (EST). Av. Darcy Vargas, 1200, Chapada, 69065-020, Manaus, AM, Brasil. ³guilhermecordeiro_f@hotmail.com; ⁴frank.meteoro@gmail.com

⁵Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Centro de Estudos do Trópico Úmido e Escola Superior de Tecnologia (CESTU/EST); Av. Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus, AM, Brasil.

⁵jsdsilva@uea.edu.br

⁶Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR 228 ESPACE-DEV (IRD,UM2,UR,UAG), 0,275 km Route de Montabo, BP 165 97323, Cayenne, Guyane Française. ⁶frederique.seyler@ird.fr

⁷Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR 5566 LEGOS (CNES/CNRS/IRD/UT3), 14 Av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France. ⁷stephane.calmant@ird.fr

21 **Bankfull discharge in the Amazon basin by satellite altimetry**

22

23 **Abstract**

24 This study proposes a methodology to calculate bankfull discharge along the rivers of the
25 Amazon Basin by radar altimetry. We used ENVISAT and JASON - 2 satellites data to
26 determine hydrological parameters such as width, amplitude, cross-sectional area and water
27 surface slope of the river. We have used a classification curve to validate this approach; the
28 procedure determines the inflection point associated with the level that fills the channel to the
29 top of its banks and at a point where the water begins to over flow onto a floodplain.
30 Validations between bankfull discharge by altimetry data and gauges result in RMS ranging
31 between 162 to 1633 m³/s. Comparisons with different missions and algorithms showed that
32 JASON-2 and Ice-1 algorithm, provides the more accurate bankfull discharge, e.g. 75 % of
33 the validations. Results encourage the potential of this methodology at large rivers and/or
34 poorly monitored regions.

35

36 **KEYWORD:** BankfullDischarge; Radar Altimetry; Hydrology

37

38 **Introdução**

39 O monitoramento das vazões se constitui em um elemento de importante significado
40 no setor de manejo e planejamento dos recursos hídricos e na instalação de obras setoriais nos
41 canais fluviais (Chow 1959). Este monitoramento é realizado através de redes de estações
42 fluviométricas, e requer uma série de observações *in situ*, por um período de tempo muito
43 longo, com custos altíssimos de instalação e manutenção Alsdorf *et al.* (2007). Os desafios
44 comuns à maioria das redes de estações fluviométricas incluem, entre outros fatores,
45 monitoramento inadequado e falhas nos registros (Calmant 2008). As medidas altimétricas
46 adquiridas nos últimos 25 anos fornecem informações, entre outras, sobre os níveis de água

47 em canais fluviais (Alsdorf *et al.* 2007; Silva *et al.* 2010; Calmant *et al.* 2013; Seyler *et al.*
48 2013) e vazão usando curvas-chave (Leon *et al.* 2006; Papa *et al.* 2010; Paiva *et al.* 2013).

49 A vazão denominada de descarga dominante determinam as dimensões físicas do canal
50 (Fernandez 2003). Para Pickup e Warner (1976) a descarga dominante pode ser materializada
51 por três categorias de descargas: descarga efetiva, descarga com determinado intervalo de
52 recorrência e descarga de margens plenas. Com relação à vazão de margens plenas, para
53 Wolman e Leopold (1957) o seu nível corresponde a um plano horizontal no qual a descarga
54 líquida preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à
55 planície de inundação.

56 Este estudo descreve as relações entre a descarga de margens plenas e as variáveis
57 independentes que controlam suas dimensões (profundidade média, largura do canal, raio
58 hidráulico, área da seção transversal e declividade) que se comportam de maneira alométrica
59 (inter-relação entre alterações e dimensão global). O propósito é estimar o valor da descarga
60 de margem plena, em respostas às mudanças dos níveis de água obtidos através das series
61 temporais altimétricas, oriundos dos satélites ENVISAT e JASON-2, para o cálculo de vazão
62 nos rios Negro e Madeira que dispõem de diversidades morfológicas distintas, utilizando o
63 modelo empírico proposto por Dingma e Sharmam (1997) uma vez que não necessita da
64 especificação do parâmetro de rugosidade (n), pois embora a equação de *Manning* seja
65 amplamente aceita como a lei de fluxo empírico para uso em canal fluvial (Chow 1964), os
66 cálculos são cheios de incertezas devido à dificuldade em especificar o valor do parâmetro n
67 que depende da rugosidade da superfície aluvial ativa.

68

69 **Área de estudo**

70 O estudo da bacia Amazônica é um desafio, devido à sua dimensão semicontinental,

71 à imensa diversidade natural e cultural e às dificuldades impostas pela floresta equatorial e
72 por áreas alagadas, lagos e imensos rios, que exige a ajuda da tecnologia espacial (Novo *et al.*
73 1998). Duas de suas grandes sub-bacias, serão utilizadas neste estudo, as sub-bacias do rio
74 Negro e do rio Madeira.

75 O Rio Negro estende-se desde os contrafortes orientais da Cordilheira dos Andes,
76 através das planícies da Colômbia e o Escudo das Guianas passa a receber a denominação de
77 rio Negro após a confluência entre o rio Guainia e o rio Casiquiare, que liga a bacia do rio
78 Negro com da bacia do Orinoco, ainda na Venezuela, com uma área de aproximadamente
79 600.000 km² (Latubresse 2005). Abrange a Colômbia (10%), Venezuela (6%), Guiana (2%)
80 e Brasil (82%), estende-se de 73°25'W para 59°35'W de longitude e de 5°4'N para 3°35'S de
81 latitude (Frappart *et al.* 2008). A média da descarga anual do rio Negro é de aproximadamente
82 28.400 m³/s (Molinier *et al.* 1997). A taxa de precipitação media anual varia mais de 50%
83 dentro da bacia do rio Negro, com valores entre 2000 a 2500 mm/a próximo a Manaus é
84 aproximadamente 3000 mm/a no Noroeste (Liebmann e Marengo 2001). O início da estação
85 das chuvas no sul da bacia ocorre em dezembro e no norte em março ou abril, o término do
86 período chuvoso está compreendido entre os meses de maio a outubro (Marengo *et al.* 2001).
87 A bacia do rio Negro possui duas unidades morfo-estruturais: Planície Amazônica e Escudos
88 das Guianas. Na Figura 1 têm-se a bacia do rio Negro, área de estudo, e a localização das
89 estações altimétricas.

90 A bacia do rio Madeira é a segunda maior sub-bacia da bacia Amazônica, com uma
91 área aproximada de 1.370.000 km², representando 23% do total da bacia Amazônica. Estende-
92 se por três países da América do Sul, Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), localiza-se
93 entre os paralelos 2 e 20 Sul e os meridianos 56 e 71 Oeste (Guyot 1993), conforme Figura 1.
94 É o maior tributário do rio Amazonas na parte Sul da bacia Amazônica, com uma descarga

95 média anual de 31.200 m³/s (Molinier *et al.* 1997). A ocorrência das precipitações na bacia
96 varia geograficamente, essa variabilidade se explica pela dinâmica das principais massas de ar
97 ativa na América do Sul e pela influência da orografia dos Andes (Roche *et al.* 1992). A bacia
98 do rio Madeira possui três unidades morfo-estruturais com a seguinte proporção: Andes
99 (15%), Planície Amazônica (44%) e Escudo Brasileiro (41%). Devido a essa característica,
100 verificam-se grandes altitudes na parte montante da bacia, vastas zonas de inundação na
101 planície e a presença de cachoeiras no Escudo Brasileiro, principalmente próximo a Porto
102 Velho (Ribeiro Neto 2006). Na Figura 1 observa-se a bacia do rio Madeira, área de estudo, e a
103 localização das estações altimétricas.

104 **Materiais e métodos**

105 **Dados *in situ***

106 Neste estudo foram utilizadas 05 estações fluviométricas, 04 no rio Negro (Cucui, São
107 Felipe, Curicuriari e Serrinha) e 01 no rio Madeira (Humaitá) obtida da rede hidro-
108 meteorológica da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site Hidroweb
109 (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), niveladas por Calmant *et al.* (2013) que empregaram o modelo
110 de ondulação geoidal EGM2008, desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008). A Tabela 1 resume as
111 principais características das estações fluviométricas.

112 **Dados Altimétricos**

113 A altimetria por satélite depende do altímetro e de sua órbita, uma vez que o radar
114 fornece a distância instantânea entre o satélite e a superfície da água. A órbita do satélite
115 fornece a altitude relativa em relação a um elipsoide de referência. A diferença entre as duas
116 distâncias é a altura do nível instantâneo da água, numa órbita de repetição (Silva 2010), dada
117 pela Eq. 1:

$$H = a_s - \rho + \delta R_j - h_g \quad (1)$$

118 onde H é o nível dos planos de água (m), a_s é a órbita do satélite (m), ρ é a distância
119 altimétrica (m), δR_j são as correções instrumentais, ambientais e geofísicas e h_g é a ondulação
120 geoidal (m). Os satélites altimétricos sobrevoam a uma dada região em intervalos regulares de
121 tempo chamado de ciclos, que varia de acordo com as características da missão.

122 O satélite *ENVironmental SATellite* (ENVISAT) é a continuação dos satélites ERS-1
123 e ERS-2 (*European Remote sensing Satellite*) da *European Space Agency* (ESA). O
124 ENVISAT estava posicionado sob uma órbita elíptica héliossíncrona com uma inclinação de
125 $98,5^\circ$, a uma altitude média de 785 km. Transportava 10 instrumentos que permitiam uma
126 análise rigorosa da atmosfera, continentes e gelo do planeta Wehr e Attema (2001) incluindo
127 um altímetro radar RA-2. O RA-2 é um radar de alta precisão direcionado para o ponto nadir
128 operando em bi-frequência na banda Ku, a 13,575 GHz, com comprimento de onda de 2,3 cm
129 e na banda S, a 3,2 GHz, com comprimento de onda de 3,4 cm (Zelli 1999). O ENVISAT
130 possuía uma cobertura espaço-temporal caracterizado por uma distância intertraço de 80 km
131 no Equador e uma repetição temporal de 35 dias. Para assegurar um tempo de vida adicional
132 de três anos, o satélite moveu-se para uma órbita a uma altitude média de 782 km, em 22 de
133 outubro de 2010. A resolução temporal passou de 35 dias para 30 dias. O satélite encerrou
134 definitivamente suas atividades em maio de 2012.

135 A família de satélites JASON teve seu início após a missão Topex/Poseidon (T/P). Em
136 dezembro de 2001 foi lançado o satélite JASON-1, cujo desempenho excedeu as expectativas
137 concebidas ao T/P. Segundo Silva (2010) a antena de recepção do satélite JASON-1, não é
138 capaz de acompanhar as mudanças rápidas de elevação do terreno, e, frequentemente, perde
139 os dados em meios continentais, portanto, esta missão quase não fornece dados para os
140 hidrossistemas continentais. Em 20 de junho de 2008 foi lançado o satélite JASON-2, também

141 conhecido como a Missão de Topografia Oceânica de Superfície (OSTM), resultante de uma
142 cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Centre*
143 *National d'Études Spatiales* (CNES), *European Organization for the Exploitation of*
144 *Meteorological Satellites* (EUMETSAT) e *National Oceanic and Atmospheric*
145 *Administration* (NOAA) dando continuidade ao programa de oceanografia iniciada pelo T/P.
146 Como seus precedentes, realiza 127 revoluções ao redor da Terra para cada ciclo, a uma
147 altitude de 1336 km, cujo plano orbital é de 66°. A largura da faixa imageada varia de 2,5 a
148 8,5 km, dependendo da superfície refletida (Chelton *et al.* 2004), com uma cobertura espaço-
149 temporal caracterizada por uma distância inter-traço de 315 km no Equador e uma repetição
150 temporal de 10 dias (Aviso 2013). Sua vida útil esperada de 5 anos já foi ultrapassada.

151 Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records* – GDRs) provenientes
152 das missões ENVISAT e JASON-2 foram processados e disponibilizados pelo *Centre de*
153 *Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* (CTOH) do *Laboratoire d'Études en*
154 *Geophysique et Océanographie Spatiales* (LEGOS), sendo obtidos entre as coordenadas
155 geográficas que compreende a área de estudo (90°W a 40°W e 13°N a 21°S). Para a missão
156 ENVISAT extraíram-se do CTOH 90 traços, totalizando 93 ciclos de 10/2002 a 10/2010,
157 utilizando-se o algoritmo de FO *Ice-1* (Wingham *et al.* 1986). Na missão JASON-2 os
158 algoritmos de tratamento da FO utilizados foram *Ice-1* (Wingham *et al.* 1986) e *Ice-3*
159 (Mercier *et al.* 2007), sendo extraídos do CTOH 150 ciclos entre 2008 a 2012.

160 **Elaboração das estações virtuais**

161 Cada interseção de um traço altimétrico com o plano de água consiste em uma
162 potencial estação virtual, permitindo obter-se uma série temporal da altura do plano de água.
163 Foi utilizada a metodologia para criação das estações virtuais pela seleção dos dados
164 altimétricos correspondentes ao cruzamento do plano de água, adaptadas às variações no

165 tempo e no espaço através da ferramenta VALS (VALS 2013), descrita detalhadamente em
 166 Silva *et al.* (2010). Neste estudo foram criadas estações virtuais utilizando-se os algoritmos de
 167 tratamento da forma de onda *Ice-1* para os satélites ENVISAT e *Ice-1* e *Ice-3* para o satélite
 168 JASON-2. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais foram
 169 convertidas em alturas geóidais, utilizando-se o modelo de ondulação geóidal EGM2008
 170 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008). A Tabela 3 apresenta as principais características das
 171 estações virtuais.

172 **Elaboração das séries temporais altimétricas**

173 As séries temporais foram obtidas utilizando-se o cálculo da mediana com a
 174 associação de dispersão, como forma de caracterizar a qualidade e a confiabilidade dos dados
 175 obtidos. Tal dispersão foi calculada pelo desvio absoluto da mediana Eq. 2:

$$DAM = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |H_i - H_{med}| \quad (2)$$

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

178 **Caracterização do regime hidrológico**

179 Para a caracterização do regime hidrológico destaca-se primeiramente a representação
 180 gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais de altura da lâmina da
 181 água, com o intuito de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros
 182 altimétricos (*i.e.*, 2002 a 2012) verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade,
 183 assim como, a possível existência de anomalias. No sentido de facilitar a identificação de
 184 períodos sazonais foram elaborados cotagramas para cada série temporal, calculando-se as
 185 médias mensais anuais das cotas altimétricas. Seguindo-se a metodologia proposta por

186 Bittencourt e Amadio (2007) delimitou-se o período de cheia, utilizando-se o valor médio
 187 menos o desvio padrão, calculado para as cotas altimétricas máximas anuais. Igualmente,
 188 utilizando-se a média acrescida do desvio padrão das cotas altimétricas mínimas anuais foram
 189 definidos os valores limítrofes para o período de estiagem.

190 **Descarga de margem plena**

191 Para o cálculo da descarga de margem plena foi utilizado o modelo empírico de
 192 Dingman e Sharma (1997) definido pela Eq. 3, onde suas variáveis foram obtidas através
 193 dos dados altimétricos selecionados nas estações virtuais:

$$Q_{MP} = 4.62 \cdot A^{1,173} \cdot Rh_{MP}^{0,40} \cdot S^{0,344} \quad (3)$$

194 onde Q_{MP} é a descarga de margem plena (m^3/s), A é a área molhada, ou seja, a área da seção
 195 transversal perpendicular à direção do escoamento ocupada pela água (m^2), Rh_{MP} é o raio
 196 hidráulico para a cota de margem plena (m) e S é a declividade da lâmina de água (cm/km).

197 Neste estudo o valor de A terá uma aproximação de acordo com a Eq. 4:

$$A = L * Y \quad (4)$$

198 sendo L a largura da superfície de contato com a atmosfera (m) medida a partir do mosaico de
 199 imagens *Google Earth* (Google Earth 2013) e Y a variação da lâmina líquida medida
 200 perpendicularmente ao fundo do canal (m). Esta variável foi obtida pela variação das cotas
 201 altimétricas máximas e de estiagens, estimada pela Eq. 5:

$$Y = (h_i)_{max} - (h_i)_{min} \quad (5)$$

202 onde $(h_i)_{max}$ e $(h_i)_{min}$ são as cotas altimétricas máximas e mínimas (m) das séries temporais
 203 altimétricas, respectivamente.

204 O raio hidráulico Rh_{MP} para a cota de margem plena é a relação entre a área molhada
 205 (A) e o perímetro molhado (P) do corpo de água e foi calculado segundo a Eq. 6:

$$Rh_{MP} = \frac{L * Y}{L + 2Y} \quad (6)$$

206 sendo L a largura da superfície de contato com a atmosfera (m) medida a partir do mosaico de
 207 imagens *Google Earth* (Google Earth 2013) e Y a variação da lâmina líquida medida
 208 perpendicularmente ao fundo do canal (m).

209 A declividade S foi obtida pelo desnível entre a estação virtual imediata e aquela
 210 imediatamente a jusante, dividida pela distância entre as duas estações conforme a Eq. 7,
 211 consideraram-se as estações V_i e V_j , onde V_i é a estação imediata e V_j é a estação virtual
 212 imediatamente à jusante. Ressalta-se que a medida da distância entre V_i e V_j foi realizada
 213 através do mosaico de imagens *Google Earth* (Google Earth 2013).

$$S = \frac{(h_i)min - (h_j)min}{dist(V_i - V_j)} \quad (7)$$

214 onde $(h_i)min$ é a cota altimétrica mínima da estação (m) e $(h_j)min$ é a cota altimétrica mínima
 215 da estação à jusante (cm), $dis(V_i)$ é a distância da estação virtual até a foz (km) e $dis(V_j)$ é a
 216 distância da estação virtual imediatamente à jusante até a foz (km). A Tabela 2 mostra os
 217 resultados estimados para os rios Negro e Madeira.

218 **Validação dos dados altimétricos**

219 Considerando-se que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada entre o traço do
 220 satélite e a posição da estação fluviométrica, a qualidade das séries temporais altimétricas foi
 221 analisada através da comparação direta por regressão linear das cotas altimétricas com as
 222 medidas da seção de réguas linimétrica computando-se o valor eficaz ou RMS, definido pela
 223 Eq. 8:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n}} \quad (8)$$

224 sendo n o número de medidas, $H_{1,i}$ as medidas altimétricas e $H_{2,i}$ as medidas da régua
225 linimétrica.

226 **Validação dos cálculos de descarga**

227 Visando uma efetiva utilização dos resultados obtidos e avaliação da qualidade do
228 cálculo da descarga de margens plenas pela equação de Dingman e Sharma (1997)
229 considerou-se as descargas líquidas de 04 estações fluviométricas, do banco de dados da
230 ANA, com seção do canal bem definida e empregou-se o método da curva de classificação,
231 utilizado pela *Federal Interagency Stream Restoration Working Group* (FISRWG) do *United*
232 *States Department of Agriculture* (USDA) (USDA-FISRWG 1998) desenvolvido para fluxos
233 de descarga relacionados à superfície de água de diferentes níveis. Para estimar as descargas
234 de margens plenas dos rios Negro e Madeira, uma simples regressão linear foi estimada
235 relacionando as medidas das cotas linimétricas e vazões. Pelo método da curva de
236 classificação, na margem de extravasamento a curva da regressão apresenta uma pronunciada
237 mudança em sua trajetória, cuja cota de inflexão corresponde ao plano horizontal no qual a
238 vazão preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à
239 planície de inundação.

240 Computou-se o RMS, entre os valores calculados pela fórmula empírica e a descarga
241 observada determinada pela curva de classificação, definido pela Eq. 9:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{MP\,cal,i} - Q_{MP\,obs,i})^2}{n}} \quad (Eq. 9)$$

242 sendo n o número de medidas, $Q_{MPcal,i}$ as medidas de descarga de margens plenas calculadas
243 pela equação de Dingman e Sharma (1997) através dos dados altimétrico e $Q_{MPobs,i}$ as
244 medidas de vazão observadas nas estações fluviométricas determinada pela curva de
245 classificação.

246 **Resultados**

247 **Validação dos dados altimétricos**

248 O estudo de validação das séries temporais de nível de água para o rio Negro foi
249 conduzido utilizando-se a estação virtual NEGRO_536_06 e a estação linimétrica São Felipe
250 posicionada abaixo do traço 536 do satélite ENVISAT (Figura 2a). As estações estão
251 localizadas próximo à foz do rio Içana onde a largura do rio Negro é de aproximadamente 935
252 km. O RMS entre as diferenças de níveis de água é 34 cm. Para o rio Madeira utilizando-se a
253 estação virtual MADEIRA_865 e a estação fluviométrica de Humaitá (Figura 2b). O traço
254 865 do satélite ENVISAT está localizado 27,2 km a jusante da estação linimétrica onde a
255 largura do rio Madeira é de aproximadamente 1,4 km. O RMS entre as diferenças de níveis de
256 água é 36 cm. Os valores dos RMSs encontrados são comparáveis com os valores de validação
257 em rios Amazônicos conduzidos por Silva *et al.* (2010) onde 70% das séries temporais
258 elaboradas com dados do satélite ENVISAT apresentaram RMS inferior a 40 cm.

259 **Validação dos cálculos de Q_{MP}**

260 A comparação das descargas de margens plenas observadas (Q_{MPobs}) e as calculadas
261 (Q_{MPcal}) nas estações virtuais altimétricas a partir do modelo de Dingman e Sharma (1997),
262 definido pela Eq. 5, foi executada para 4 estudos. Foram conduzidas 3 aplicações no rio
263 Negro nas estações fluviométricas de Cucuí, Curicuriari e Serrinha e 1 investigação, foi
264 conduzida em Humaitá, no rio Madeira. A seleção dos dados, para as 11 estações virtuais,

265 foi executada separadamente e computada independentemente para os algoritmos *Ice-1* do
266 satélite ENVISAT e *Ice-1* e *Ice-3* do satélite JASON-2.

267 *Curva de classificação*

268 Nas figuras 3a, 3b, 3c e 3d observam-se as curvas de classificação que permitiram
269 determinar a vazão de margem plena a partir de informações diárias de vazão do banco de
270 dados da ANA. Alterações na largura, profundidade, velocidade, concentração de sedimentos,
271 rugosidade entre outras variáveis da seção transversal do rio são provenientes da dinâmica do
272 regime fluvial ao longo do ano. Dessa forma, com o aumento da vazão ocorre um incremento
273 da profundidade na seção do canal fluvial resultando em uma relação direta entre as
274 variáveis, onde o crescimento da cota está diretamente ligado ao crescimento da vazão, com
275 85 a 98% das variações das cotas sendo explicadas pelas variações das vazões.

276 Na estação fluviométrica de Cucuí (figura 3a) a taxa de mudança da cota quando
277 ocorre a mudança na vazão, representada pelo coeficiente angular da regressão, passou de
278 $8,93 \times 10^{-4}$ para $6,98 \times 10^{-4}$ esse ponto de inflexão na curva de classificação correspondente ao
279 plano horizontal no qual a vazão preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de
280 ultrapassar em direção à planície de inundação, a vazão correspondente $Q_{MP_{obs}}$, referência
281 para a validação dos resultados calculados a partir dos satélites ENVISAT e JASON-2. As
282 demais variações foram de $0,64 \times 10^{-4}$, $1,22 \times 10^{-4}$ e $3,16 \times 10^{-4}$ nas estações de Curicuriari,
283 Serrinha e Humaita, respectivamente (figuras 3b, 3c e 3d).

284 *Comparação entre descarga $Q_{MP_{observada}}$ ($Q_{MP_{obs}}$) e calculada ($Q_{MP_{cal}}$)*

285 Na Tabela 2 observa-se que os resultados das $Q_{MP_{obs}}$ comparados com os resultados
286 das $Q_{MP_{cal}}$ mostraram-se satisfatórios tanto para os dados como satélite JASON-2 quanto
287 para o ENVISAT com os RMSs variando de $162 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1633 \text{ m}^3/\text{s}$. No rio Negro o menor

288 RMS foi o de Serrinha com $162 \text{ m}^3/\text{s}$ e para o rio Madeira, em Humaita o RMS foi de 547
289 m^3/s , ambos para os dados da missão JASON-2.

290 *Vazão de margem plena no ponto de cruzamento das missões altimétricas*

291 Na estação fluviométrica de Serrinha os traços 165 e 364 dos satélites JASON-2 e
292 ENVISAT, distam-se de 19611 m e 23451 m da estação *in situ*, respectivamente.
293 Considerando-se que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada entre os traços dos
294 satélites e a posição da estação *in situ* pode-se verificar a qualidade das *QMPcal* com os
295 satélites, uma vez que são obtidas de forma autônoma e independente. A *QMP* para as
296 medidas *in situ*, com os dados fornecidos pela ANA, corresponde a $31890 \text{ m}^3/\text{s}$. O resultado
297 da *QMPcal* para o algoritmo *Ice-1* do satélite ENVISAT no traço EV-364 é de $33083 \text{ m}^3/\text{s}$ e
298 para o satélite JASON-2 variaram de 31689 à $32052 \text{ m}^3/\text{s}$, para os algoritmos *Ice-1* e *Ice-3*,
299 respectivamente, indicando melhores resultados para os dados calculados pelo satélite
300 JASON-2.

301 *Comparação entre os algoritmos Ice-1 para os satélites JASON-2 e ENVISAT*

302 Nas estações de Curicuriari, Serrinha e Humaitá comparou-se os resultados obtidos
303 pelos satélites JASON-2 e ENVISAT, utilizando-se o mesmo algoritmo de tratamento *Ice-1*.
304 As estações de Serrinha e Humaitá apontaram os menores RMSs para o satélite JASON-2,
305 com valores correspondentes a $201 \text{ m}^3/\text{s}$ e $547 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

306 *Comparação Q_{MPCal} entre os algoritmos Ice-1 e Ice-3 da missão JASON-2*

307 Na análise das *Q_{MPCal}* com os algoritmos *Ice-1* e *Ice-3* para o satélite JASON-2,
308 observaram-se melhores resultados para o algoritmo *Ice-1* nas estações de Cucuí, Curicuriari e
309 Humaitá, apontando RMS variando de $210 \text{ m}^3/\text{s}$ a $547 \text{ m}^3/\text{s}$. Em estudos de validação dos
310 dados altimétricos conduzidos por Frappart *et al.* (2006a) o algoritmo *Ice-1* apontou os

311 melhores RMS, apresentando baixo ruídos, em relação aos demais algoritmo de tratamento do
312 satélite ENVISAT. No presente estudo, os dados para a realização dos cálculos de descarga de
313 margem plena do algoritmo de tratamento *Ice-1* também apresentaram os melhores resultados
314 para o satélite JASON-2.

315 **Regime hidrológico dos rios**

316 As Figuras 4 e 5 mostram os cotogramas para a caracterização do regime hidrológico
317 dos rios Negro e Madeira, que foram gerados a partir de informações proveniente das estações
318 virtuais do satélite ENVISAT, sendo possível a observação do comportamento do nível de
319 água durante oito anos selecionados para estudo (2002 a 2010).

320 Na Figura 4, percebe-se claramente as características de sazonalidade do rio Negro. A
321 inundação desenvolve-se sobre vários meses e permanece em sua superfície máxima durante
322 algumas semanas, dando origem a um cotograma multimodal, resultante do regime equatorial
323 (Rodier 1964 e Molinier 1997), com dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano
324 e ascensões e recessões assimétricas. O período de enchente avança rapidamente e a vazante
325 progride lentamente. Nas primeiras estações, à montante, quando o curso de água percorre o
326 território colombiano, o cotograma é multimodal, com a cheia apresentando um primeiro pico
327 entre junho e agosto, onde as cotas máximas são encontradas mais frequentemente no mês de
328 junho. Um ou mais picos de magnitude inferior à máxima são encontrados no segundo
329 semestre. A estiagem inicia-se em dezembro e se estende até março, apresentando, com mais
330 frequência, as cotas mínimas no mês de fevereiro. Após receber as contribuições do canal
331 Casiquiare, na estação virtual sob o traço 536, distante 1284 km da foz do rio, o cotograma é
332 mais regular, embora bimodal. A cheia apresenta um pico máximo entre maio e julho e a
333 estiagem se estendem de outubro a março. A partir da estação virtual NEGRO_650 distante
334 229 km da foz, o cotograma apresenta-se sem relação direta com o das estações anteriores,

335 denotando uma ascensão lenta e recessão acelerada, influenciado fortemente pelos níveis de
336 água do rio Solimões. Este efeito de barragem hidráulica é largamente observado sobre vários
337 quilômetros nos baixos cursos de todos os afluentes do rio Solimões-Amazonas (Meade *et al.*
338 1991). Adicionalmente, identifica-se que 82% tiveram o valor máximo anual no mês de
339 junho, enquanto que 56,4% tiveram o valor mínimo anual no mês de fevereiro.

340 A partir da análise dos cotogramas na Figura 5 foi possível observar que o rio Madeira
341 apresenta dois (2) períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de
342 estiagem que se inicia em setembro podendo se estender até novembro, apresentando com
343 mais frequência, as vazões mínimas nos meses de setembro, e um período de cheia suavizado,
344 que abrange de fevereiro à maio, onde as cotas máximas são encontradas mais frequentemente
345 no mês de abril. Particularmente, pode-se observar que a ascensão do cotograma de cheia é
346 mais acelerada, enquanto a recessão diminui progressivamente na vazante, frequentemente
347 com um ou mais picos de cheia menos acentuados no segundo semestre característico de
348 regime equatorial (Rodier 1964 e Molinier 1997). Adicionalmente identifica-se que 69,23%
349 tiveram o valor máximo anual no mês de junho, enquanto que 53,84% tiveram o valor
350 mínimo anual no mês de fevereiro.

351 **Variação da descarga**

352 A Tabela 3 apontar as estações altimétricas utilizada no desenvolvimento deste estudo,
353 mostrando os parâmetros hidrológicos utilizados para a realização do cálculo de descarga de
354 margem plena a partir do modelo de Dingman e Sharma (1997), definido pela Eq. 5. Os
355 cálculos foram realizados para as estações virtuais localizadas nos rios Negro e Madeira.

356 Os parâmetros hidráulicos aplicado neste estudo como a área (m), raio hidráulico (m) e
357 declividade (cm/km), apresentam uma variabilidade significativa da lâmina de água
358 evidenciando o crescimento em direção à foz. Os perfis hidrológicos altimétricos analisado ao

359 longo do rio Negro, com os dados da missão do satélite ENVISAT demonstram que a
360 diferença entre a cota mínima e máxima na nascente é de 3,11 m e na foz é de 13,11 m de
361 amplitude. Para o rio Madeira na estação MADEIRA_278_3 observa-se uma amplitude de 9
362 m, enquanto na foz essa variação corresponde a 13,58 m.

363 Destaca-se nas figuras 6 e 7 os resultados das Q_{MPCal} com um crescimento da descarga
364 média em direção à foz. Os estudos realizados no rio Negro apontaram uma vazão de 259,7
365 m^3/s na nascente e 30788 m^3/s até a estação NEGRO_865. Ao longo do Rio Madeira a vazão
366 apontou resultados variando de 27618,6 m^3/s partir da estação MADEIRA_278_3, próximo a
367 cidade de Porto Velho, à 30536 m^3/s na foz.

368 **As limitações da metodologia**

369 Na área de trabalho do presente estudo, alguns resultados de descarga de margem
370 plena foram poucos aceitáveis devido às mudanças geológicas e morfológicas que provocam
371 alterações na seção do canal, definindo as peculiaridades de cada bacia e conseqüentemente
372 as mudanças hidrológicas dos seus rios.

373 Nas regiões do rio Negro onde a estrutura da bacia é modificada por acidentes
374 tectônicos (curso de água anastomosado), rochas e arquipélagos evidenciam-se mudança
375 hidrológica ao longo dos traços dos satélites restringindo o uso da metodologia proposta. Esses
376 resultados foram verificados ao longo dos arquipélagos de Mariuá e de Anavilhanas nas
377 estações NEGRO_882 à NEGRO_192_01 e NEGRO_106 respectivamente. O efeito da
378 barragem hidráulica ocasionada pela confluência do rio Negro com o rio Solimões também
379 modifica a seção do leito, restringindo a metodologia, evidenciado nas estações NEGRO_149
380 e NEGRO_564.

381 No rio Madeira verificou-se tais limitações nas seções anastomosadas da estação
382 MAMORÉ_192_2. As seções meandricas ou curvas apontam diferenças na disposição do

383 meio líquido com o solo, provocadas por acúmulos de sedimentos depositados em uma das
384 margens ocasionando um estreitamento do leito do rio verificado na estação
385 MADEIRA_579_2 interferindo nos resultados da estação MADEIRA_579_1. Outro fator se
386 refere à área de várzea de um sistema lacustre acumulativa, conforme o nível do rio sobe esses
387 ambientes assume a função de reservatório, durante o período de cheia podem se tornar canais
388 de transporte de água, a passagem do traço do satélite sobre a superfície de água nesses
389 reservatórios pode ocasionar desconformidade de dados, destacando assim a sensibilidade do
390 uso da metodologia aplicada na estação MADEIRA _192_6.

391 **Conclusão**

392 A aplicação da altimetria espacial mostrou-se promissora para as remotas regiões da
393 bacia Amazônica, apresentando séries temporais de nível de água de boa qualidade com o
394 RMS de 25 cm, possibilitando a realização de grandes quantidades de medidas, necessarias
395 para avaliar a variabilidade espaço temporal do regime hidrológico e a descarga de margem
396 plena dos rios Negro e Madeira.

397 Mesmo com características geomorfológicas diferenciadas nos dois rios estudados as
398 descarga de margem plena calculada, utilizando os produtos altimétricos, mostraram
399 similaridades quando comparadas com os resultados de descarga de margem plena obtida a
400 partir das estações fluviométricas, evidenciando a aceveração através da curva de
401 classificação. Destaca-se a qualidade dos dados altimétricos que apontaram melhores
402 desempenhos para a missão do satélite JASON-2 com RMS mínimo de $162 \text{ m}^3/\text{s}$. Mesmo com
403 uma resolução temporal é de 35 dias os dados fornecidos pela missão do satélite ENVISAT
404 apontaram bons resultados.

405 A metodologia desenvolvida para o cálculo de descarga de margens plenas serve de
406 apoio a estudos geomorfológicos em pequenas e grandes bacias hidrográficas, pouco ou mal

407 instrumentadas, embora com limitações em seções transversais instáveis. Neste sentido, em
408 trabalhos futuros, sugere-se primeiramente avaliar o ajuste do percurso do leito dos rios
409 levando em consideração os efeitos da dinâmica dos processos sedimentológicos e a
410 topografia que é uma forçante fundamental para a circulação da água, sendo, ao mesmo
411 tempo, fator condicionante dessa dinâmica.

412 **Agradecimentos**

413 Este estudo se insere nos projetos de pesquisa CASAM e HIDRAS (CNPq) e DS BIODIVA
414 (FAPEAM), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM
415 (CNES/TOSCA). Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do
416 Amazonas (FAPEAM) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
417 (CNPq) pela bolsas de Mestrado e de Iniciação Científica. À Agência Nacional de Águas
418 (ANA), pelos dados das réguas. Ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère*
419 (CTOH) do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales* (LEGOS),
420 pelos *Geophysical Data Records* (GDRs) e as correções troposféricas correspondentes e à
421 *European Space Agency* (ESA) pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT
422 disponibilizados para o estudo.

423 **Referências Bibliográficas**

- 424 Alsdorf, D. E., Birkett, C. M., Dunnet, T., Melack, J., Hess, L., 2001a, "Water level changes in
425 a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry",
426 *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 14, pp. 2671-2674. doi: 0094-
427 8276/01/2001GL012962
428
429 Alsdorf, D.; Rodriguez, E.; Lettenmaier, D., 2007, Measuring surface water from space.
430 *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, p. RG2002, doi: 10.1029/2006RG000197.
431
432 ANA – Agência Nacional de Água 2007. Evol. da Rede Hidrometeorológica Nacional,
433 Brasília, v. 1, n.1, p. 1- 15..abr.2007.
434 <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/EvoluçãodaRedeHidrometeorologica>
435 Nacional.pdf. Acesso 03/08/2012.

- 436 AVISO, 2013, Archivage, Validation etInterprétation des données des Satellites Océano
437 graphiques. Disponível em: <http://www.aviso.oceanobs.com/fr/missions/index.html>
438
- 439 Bittencourt, M. M. e Amadio, S. A., 2007, Proposta para identificação rápida dos períodos
440 hidrológicos em área de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus, *Acta*
441 *Amazônica*, v. 37, n. 2, pp. 303-308.
442
- 443 Calmant, S., Seyler, F., 2006, “Continental surface water from satellite Altimetry”, *Comptes*
444 *Rendus Geosciences*, v. 338, n. 14-15, pp. 1113-1122. doi:10.1029/2001JD000609
445
- 446 Calmant, S., Seyler, F., Cretaux, J-F., 2008, “Monitoring Continental Surface Waters by 539
447 Satellite Altimetry”, *Survey in Geophysics*, v. 29, n. 4-5, pp. 1573-0956. doi: 10.1007/10712-
448 540 008-9051-1
449
- 450 Calmant S.; Silva, J. S.; Moreira, D. M.; Seyler I.; Shum, C. k.; Cretaux, J. F.; Gabalda, G.;
451 2013. Detection of Envisat RA 2/ ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin
452 rivers using GPS, *Advances in Space Research*, v. 51 p 1551 - 1564. doi: 10.1016/ j.asr.
453 2012.07.033
454
- 455 Chelton, DB, MG Sclax, MH Freilich e RF Milliff. 2004. Medição de radar de satélite
456 revelam características curta escala no campo de tensões do vento sobre o oceano mundial.
457 *Ciência* 303:978-983.
458
- 459 Chow, V. T., 1959, *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Co, 680 p.
460
- 461 Chow, V. T., 1964, *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill Book Co.
462
- 463 Dingman S. L., Sharman, K. P., 1997, Statistical development and validation of discharge
464 equations for natural channels, *Journal of Hydrology*, v. 199, PP 13-35.
465
- 466 Filizola, N., Guyot, J. L., Guimarães, V., 2009a, “Measuring the discharge of the Amazon
467 River using Doppler technology (Manacapuru, Amazonas, Brazil)”, *Hydrological Processes*,
468 v. 23, n. 22, pp. 3151-3156. doi: 10.1002/hyp.7385
469
- 470 Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., Cazenave, A., 2006a, Preliminary results
471 of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin, *Remote Sensing*
472 *of Environment*, v. 100, n. 2, pp. 252–264. doi: 10.1016/j.rse.2005.10.027
473
- 474 Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J. S., Prigent, C., Roosow, W. B., Seyler, F., 2008, 590
475 “Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case 591
476 study for the Rio Negro River basin”, *Journal Geophysical Research*, v. 113, pp. D21104,
477 592 doi: 10.1029/2007JD009438.
478
- 479 Ferguson R. I., 1986, Hydraulic and hidrologic geometry, *Progress in Pysical Geography*, v
480 10, pp 1 - 31 doi: 10.1177/0309133386010001
481
- 482 Fernandez, O.V.Q. 2003 “Determinação do nível e da descarga de margem plena cursos
483 fluviais” *Boletim de geografia* 21(1): 97-109.

- 484 GOOGLE EARTH (2013), *Google Earth*, versão 6.0.3.2197. Google Inc.
485
- 486 Guyot, J.L., Molinier, M., Guimarães, V., Cudo, K. J., Oliveira, E., 1993, “Balanço
487 hídrico da bacia do rio Negro”. In: *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*,
488 pp. 535-544, Gramado, RS: Brazil.
489
- 490 Guyot, J. L., Callede, J., Molinier, M., Guimarães, V., Oliveira, E., 1998, “L’variabilité
491 hydrologique actuelle dans le bassin de l’Amazonie”, *Bulletin de l’Institut Français
492 d’Etudes Andines*, v. 27, n. 3, pp. 779-788.
493
- 494 Guyot, J. L., Molinier, M., Guimaraes, V., Cudo, K., Oliveira, E., 1994, “Nouveau tissu les
495 débits monstrueux de l’Amazonie”, *Revue de Géographie Alpine*, n.12, pp. 77-83.
496
- 497 Getirana, A. C. V., Bonnet, M-P., Rotunno Filho, O. C., Collischonn, W., Guyot, J-L., Seyler,
498 F., Mansur, W.J., 2010, Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin:
499 evaluation based on *in situ* and spatial altimetry data. *Hydrological Processes*, 24(22): 3219–
500 3236. DOI: 10.1002/hyp.7747
501
- 502 Holland, M. M., 1988, “SCOPE/MAB technical consultations on landscape boundaries: report
503 of a SCOPE/MAB workshop on ecotones”. In: DI Castri, F., Hansen, A. J., Holland And, M.
504 M. (eds). *A new look at ecotones: Emerging international projects on landscape boundaries*,
505 *Biology International*, Special Issue 17, pp. 47-106.
506
- 507 Junk, W. J., Bayley, P. B., Sparks, R. E., 1989, “The “flood pulse” concept in river floodplain
508 system”. In: DODGE, D. P. (ed.) Proceedings of the International Large River Symposium
509 (LARS). *Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Science*, v. 106, pp.110-
510 127.
511
- 512 Kolasa, J., Zalewski, M., 1995, “Notes on ecotone attributes and functions”, *Hydrobiologia*, v.
513 303, n. 1-3, pp. 1-7. doi: 10.1007/BF00034039
514
- 515 Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., Sinha, R., 2005, “Tropical rivers” *Geomorphology*, v. 70,
516 n. 3-4, pp.187–206. doi:10.1016/j.geomorph.2005.02.005
517
- 518 Liebermann, B., & Marengo, J. A. (2001). Interannual variability of the rainy season and
519 rainfall in the Brazilian Amazon basin. *Journal of Climate*, 14, 4308–4318.
520
- 521 Leon, J.G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M.P., Cauhope, M., Frappart, F., Filizola,
522 N., Fraizy, P., 2006, “Rating curves and estimation of average water depth at the upper
523 Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges”, *Journal of Hydrology*,
524 v. 328, n. 3-4, pp. 481- 496. doi: 10.1016/j.hydrol/2005.12.006
525
- 526 Leopold, L.B.; Maddock, T. (1953) The hydraulic geometry of stream channels and some
527 physiographic implications. *Professional Paper*, United States Geological Survey, Washington,
528 252: 57 p.
529
- 530 Marengo, J.A., Miller, J.R., Russell, G.R., Rosenzweig, C.E., Abramoloulos, F., 1994.
531 Calculations of river runoff in the GISS GCM: Impact of a new land surface parameterization

- 532 and runoff routing model on the hydrology of the Amazon River, *Climate Dynamics.*, 10,
533 349-361.
- 534
- 535 Marengo, J. A. e Nobre, C. A., 2001, “General characteristics and variability of climate in the
536 Amazon basin and its links to the global climate system”. In: Clain, M. E., Victoria, R. L.,
537 Richey, J. E. (eds.), *The Biochemistry of the Amazon basin*, pp. 17–41. UK: Oxford
538 University Press.
- 539
- 540 Meade, R. H., Rayol, J. M., Da Conceição, S. C., Natividade, J. R. G., 1991, “Backwater 657
541 effects in the Amazon river basin of Brazil”, *Environmental Geology and Water Sciences*, v.
542 658 18, n. 2, pp. 105-114. doi: 10.1007/BF01704664.
- 543
- 544 Molinier, M., Guyot, J.-L., Oliveira, E., Guimaraes, V., Chaves, A., 1993. Hydrologie
545 Dubassin de l'Amazone. Grands Bassins Fluviaux, Paris, 22-24 novembro de 1993, 335-344.
- 546
- 547 Molinier, M., Guyot, J.L., Oliveira, E., Guimaraes, V., 1996, “Les régimes hydrologique de
548 l'Amazone et des affluents”. In: Chevallier, P. e Pouyaud, B.(eds.), *L'hydrologie tropical:
549 géoscience et outil pour le développement*, pp. 209-222. Actes de la conférence de Paris, 2-
550 4/05/1995. IAHS Publication n. 238. Oxfordshire, UK: International Association of
551 Hydrological Sciences.
- 552
- 553 Molinier, M. et al. 1997. “Hydrologie du bassin amazonien”, in *Environnement et
554 développement en Amazonie brésilienne*, by THÉRY, H. Paris, FR : Editions Belin, pp. 24-41.
- 555 Molinier, M., Guyot, J.L., Callède, J., Guimaraes, V., Oliveira, E., Filizola, N. (1997)
556 Hydrologie du bassin amazonien, 24-41. In *Environnement et développement en Amazonie
557 brésilienne*, Théry H. (ed.), Publ. Belin, Paris.
- 558
- 559 Molion, L. C. B., 1975. A climatonic study of the energy and moisture fluxes of
560 the Amazon basin with considerations of deforestation effects. Tese de Ph.D. Universidade de
561 Wisconsin, Madison, Estados Unidos.
- 562
- 563 Naimar, R. J.; Decamps, H.; Fournier, F. (ed.), 1989, *Role of land/inland water ecotones in
564 landscape management and restoration: A proposal for a collaborative research*. Paris:
565 UNESCO Novo, E. M. L. M., Shimabukuro, Y. E., Mertes, L., 1998, “O rio Amazonas
566 em mosaico”, *Ciência hoje*, v. 24, n. 144, pp. 59-61, Nov. 1998.
- 567
- 568 Papa, F., Prigent, C., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W. B., & Matthews, E.
569 (2010). Interannual variability of surface water extent at global scale. *Journal of Geophysical
570 Research*, 115, D12111. doi:10.1029/2009JD012674
- 571
- 572 Pavlis, N. K. et al., 2008, Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160:
573 EGM2008. Em: *Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences
574 Union*, Vienna, Austria, 13-18/04/2008. Disponível em: [http://earth-
575 info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)
- 576
- 577 Paiva, R.C. D; Collischown, W.; Bonnet, M. P.; De Gonçalves, L. G. G.; Calmant, S. ;
578 Gentirana, A.; Santos da Silva, J.; 2013. Assimilating in situ and radar altimetry data into a

- 579 large-scale hydrologic hydrodynamic model for stream flow forecast in the Amazon. *Hydrology*
 580 *and Earth System Sciences*. v. 17, p 2929 - 2946. doi: 10.5194/hess-17-2929
 581
- 582 Pickup, G.; Warner, R.F. Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency
 583 of dominant discharge. *Journal of Hydrology*, 29: 51-75, 1976.
 584
- 585 Ribeiro Neto, A., 2006. Simulação hidrológica na Amazônia: rio Madeira. Tese de
 586 D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 178p.
 587
- 588 Roche M.A., Fernandez C., Aliaga A., Peña J., Salas E., Montañó J.L. 1992. Balance hídrico
 589 de Bolivia. *Publ. UNESCO-PHICAB*, La Paz, 16 p.
 590
- 591 Salati, E. et al. Origem e distribuição das chuvas na Amazônia. *Interciência*, v.3, n.4, p.200-6,
 592 1978. Recycling of Water in the Amazon, Brazil: an isotopic study. *Geophysical*
 593 *Research. Water Resources Research*, v.15, n.5, p.1250-8, 1979.
 594
- 595 Seyler, F., Calmant, S., Santos Da Silva, J., Filizola, N., Roux, E., Cochonneau, G., Vauchel,
 596 P., Bonnet, M. P., 2008, "Monitoring water level in large transboundary ungrauged basin with
 597 altimetry: the example of ENVISAT over Amazon Basin", *Journal of Applied Remote Sensing*
 598 – *SPIE*, v. 7150, pp. 715017. doi:10.1117/12.813258
 599
- 600 Seyler, F.; Calmant, S.; Silva, J. S.; Moreira, D. M.; Mercier, F.; Shum, C. K.; 2013. From
 601 Topex/Poseidon to JASON-2 OSTM in the Amazon basin. *Advances in Space Researd* v. 51
 602 p 1542 - 1550. doi: 10.1016/J.asr.2012.11.002
 603
- 604 Silva, J. S., 2010, "Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações
 605 Hidrológicas". Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. 360p. ISBN: 978-613-
 606 1-52979-5.
 607
- 608 USDA (United States Department of Agriculture) FISRWG (Federal Interagency Stream
 609 Restoration Working Group) Stream corridor restoration: principles, processes
 610 and practices. *National Technical Information Service*, U.S. Department of Commerce,
 611 Springfield, Va, 1998.
 612
- 613 VALS Tool, 2013, *Virtual Altimetry Station*, Versão 1.0.3, 05/2011, Cochonneau, G. e
 614 Calmant, S. Disponível em: http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php
 615
- 616 Walker, I. Amazonian Stream and Small rivers. In: *Limnology in Brazil*. Tundisi, J.G.;
 617 Bicudo, C. E. M.; Matsumura_Tundisi T. (Eds) p. 167 - 1995.
 618
- 619 Ward, J. V., Tockner, K., Schiemer, F., 1999, "Biodiversity of floodplain river ecosystems:
 620 ecotones and connectivity", *Regulated Rivers: Research & Management*, v. 15, n. 1-3, pp. 125-
 621 139. doi: 10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E
 622
- 623 Wehr, T. & Attema, E. (2001). Validação de Geofísica de produtos de dados ENVISAT.
 624 *Avanços em Pesquisas Espaciais*, 28 (1), 83-91, doi: 10.1016/S0273-1177 (01) 00297-6.
 625

626 Wingham, DJ, Rapley, CG & Griffiths, H. (1986). Novas técnicas de satélite altímetro
627 sistemas de rastreamento. *Anais do IGARSS'86 simpósio, Zurique*, 08-11 setembro 1986, ref.
628 ESA SP-254 (pp. 1339-1344)

629
630 WMO (World Meteorological Organization), 1994. Guide to hydrological practices. Data
631 Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Others Applications. World
632 Meteorological Organization, WMO-nº.168.5a ed. 735p, Geneva.

633
634 Wolman M. G. e Leopold, L. B. 1957. River Flood plains: some observations on
635 their formation. *US Geological Survey Professional Paper*, 271, 56p.

636
637 Zelli, C., 1999, “ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter : Instrument design and prelaunch
638 performance assessment review”, *Acta Astronautica*, v. 44, pp. 323-333. doi:10.1016/S0094-
639 5765(99)00063-6

640
641

642 **Legenda de figuras**

643

644 Figura 1. Localização das bacias do rios Negro e Madeira, objeto de estudo e das estações
645 virtuais. Os círculos pretos e sólidos representam as estações virtuais do satélite ENVISAT.
646 Os círculos em cinza representam as estações virtuais do satélite JASON-2. Rede de
647 drenagem em cinza desenvolvida por Seyler *et al.* (2009).

648

649 Figura 2. Validação das séries temporais altimétricas de nível de água. Círculos e linhas
650 contínuas correspondem às séries temporais altimétricas e linimétricas, respectivamente.
651 Mosaico de imagens Google Earth, em segundo plano. (a) Rio Negro. (b) Rio Madeira.

652

653 Figura 3. Curva de classificação. Círculos cinza vazões na seção do canal fluvial até a cota de
654 margens plenas. Círculos pretos vazões na planície de inundação do canal fluvial. (a) Cucuí.
655 (b) Curucuriari. (c) Serrinha. (d) Humaitá.

656

657 Figura 4. Cotagramas da bacia do rio Negro. Cota de referência EGM2008.

658

659 Figura 5. Cotagramas da bacia do rio Madeira. Cota de referência EGM2008.

660

661 Figura 6. Variação espacial das vazões de margens plenas no rio Negro. Rede de drenagem
662 em cinza desenvolvida por Seyler *et al.* (2009).

663

664 Figura 7. Variação espacial das vazões de margens plenas no rio Madeira. Rede de drenagem
665 em cinza desenvolvida por Seyler *et al.* (2009).

666

667

668 **Lista de Tabelas**

669

670 Tabela 1. Principais características das estações fluviométricas utilizadas para validação.

671

672 Tabela 2. Validação do cálculo de vazão de margens plenas.

673

674 Tabela 3. Vazão de margens plenas nos rios Negro e Madeira.

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705 **Lista de Tabelas**

706 Tabela 1.

Nome da Estação	Nome do Rio	Lat (°)	Long (°)	Período Medições (anos)	Nivelamento (m)
Cucuí	Negro	1,215° N	66,852° W	2002 - 2010	57.375
São Felipe*	Negro	0,371° N	67,312° W	2002 - 2010	-
Curicuriari	Negro	0,200° S	66,802° W	2002 - 2010	30.739
Serrinha	Negro	0,481° S	64,828° W	2002 - 2010	22.063
Humaita*	Madeira	75,508° S	63,020° O	2002 - 2010	24.257

707 * Validação dos dados altimétricos

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732 Tabela 2.

Estação . (nome/ID)	Q _{MP} Obs (m ³ /s)	Q _{MP} Calculada						733	
		(m ³ /s)							
Cucuí 14110000		JASON-2 EV-089-1					ENVISAT		
		<i>Ice-1</i>	RMS	<i>Ice-3</i>	RMS	RMS	<i>Ice-1</i>	<i>Ice-1</i>	RMS
						<i>Ice-3</i>			
	8467	8257	210	7892	575	365	-	-	
Curicuriari 14330000		JASON-2 EV-089-3					ENVISAT EV-994		
		<i>Ice-1</i>	RMS	<i>Ice-3</i>	RMS	RMS	<i>Ice-1</i>	<i>Ice-1</i>	RMS
						<i>Ice-3</i>			
	20694	20968	274	20382	312	38	20508	186	
Serrinha 14420000		JASON-2 EV-165					ENVISAT EV-364		
		<i>Ice-1</i>	RMS	<i>Ice-3</i>	RMS	RMS	<i>Ice-1</i>	<i>Ice-1</i>	RMS
						<i>Ice-3</i>			
	31890	31689	201	32052	162	39	28298	1193	
Humaita 15630000		JASON 254					ENVISAT EV-865		
		<i>Ice-1</i>	RMS	<i>Ice-3</i>	RMS	RMS	<i>Ice-1</i>	<i>Ice-1</i>	RMS
						<i>Ice-3</i>			
	41415	40868	547	42763	1348	801	43048	1633	

734

735

736

737

738

739

740

RIO NEGRO								
Estação	Lat (°)	Long (°)	Cota Mín (m)	Cota Máx (m)	Área (m ²)	Raio Hidráulico (m)	Declividade (cm/km)	Vazão (m ³ /s)
ENVISAT								
NEGRO_665	2,004	-70,008	189,72	192,83	168,87	2,79	94,10	259,75
NEGRO_708	1,986	-69,831	169,34	173,76	390,72	4,01	20,34	474,70
NEGRO_121	2,305	-69,356	143,21	148,01	187,20	3,85	21,53	200,77
NEGRO_164	2,351	-69,031	129,13	134,12	314,37	4,30	32,52	444,45
NEGRO_579	2,376	-68,653	105,49	113,74	512,32	6,51	14,41	703,03
NEGRO_622	2,269	-68,331	97,68	106,00	816,19	7,11	9,35	1083,43
NEGRO_035	2,692	-68,004	88,91	95,43	958,44	5,98	10,37	1265,54
NEGRO_078	2,671	-67,524	80,39	88,97	1861,86	7,95	7,44	2755,48
NEGRO_493_01	2,396	-67,22	76,68	86,21	2820,88	8,95	0,19	1331,86
NEGRO_493_02	2,315	-67,202	76,66	85,52	1984,64	8,21	3,09	2223,61
NEGRO_493_03	2,142	-67,164	75,98	84,98	5985,00	8,76	5,11	9902,37
NEGRO_536_01	1,748	-67,009	73,19	82,69	7220,00	9,26	3,03	10546,74
NEGRO_493_04	0,869	-66,885	69,71	78,48	9822,40	8,63	4,66	17058,20
NEGRO_563_02	0,919	-67,191	67,92	77,47	7917,95	9,33	7,51	16101,26
NEGRO_563_03	0,722	-67,234	66,03	75,98	9233,60	9,74	3,77	15478,85
NEGRO_563_04	0,563	-67,269	65,25	74,64	6760,80	9,15	3,80	10505,51
NEGRO_563_05	0,529	-67,276	65,02	74,13	6786,95	8,89	5,69	11980,00
NEGRO_563_06	0,375	-67,31	63,84	72,51	8002,41	8,51	6,83	15210,03
NEGRO_563_07	0,255	-67,337	62,94	71,63	11809,71	8,58	25,90	38087,75
NEGRO_994	-0,228	-66,725	36,66	45,51	10832,40	8,72	5,64	20508,85
NEGRO_493_05	-0,325	-66,622	35,76	43,86	13737,60	8,02	3,38	21994,15
NEGRO_450	-0,321	-66,026	33,35	41,34	16307,59	7,92	9,98	38819,54
NEGRO_951	-0,309	-65,907	32,01	40,16	12648,80	8,06	4,41	21916,08
NEGRO_908	-0,369	-65,318	28,70	36,77	26082,24	8,02	0,58	25494,16
NEGRO_407_01	-0,416	-65,165	28,59	36,22	17274,32	7,57	3,45	28298,79
NEGRO_364	-0,447	-64,617	26,44	32,32	21938,28	5,86	3,24	33083,16
NEGRO_865	-0,374	-64,456	25,78	31,35	20007,44	5,55	3,83	30788,47
NEGRO_822	-0,312	-63,868	23,26	28,90	32898,12	5,62	5,23	
NEGRO_321	-0,328	-63,747	22,49	28,59	34025,80	6,08	4,47	
NEGRO_278_01	-0,628	-63,219	19,44	26,21	32184,58	6,75	3,42	
NEGRO_779	-0,959	-62,89	17,61	25,42	34832,60	7,78	2,79	

Instabilidade do canal

NEGRO_736_01	-1,116	-62,608	16,61	25,25	25773,12	8,59	2,66							
NEGRO_235	-1,254	-62,107	15,06	25,39	68415,59	10,29	6,74							
NEGRO_192_01	-1,369	-61,945	13,53	25,43	45410,40	11,82	0,39							
NEGRO_650_01	-1,923	-61,348	13,13	24,88	46823,75	11,68	10,42							
NEGRO_693	-2,075	-61,207	10,72	23,90	30564,42	13,03	1,07							
NEGRO_106	-2,647	-60,789	9,85	23,79	100005,56	13,88	1,55							
NEGRO_149	-3,065	-60,271	8,65	22,45	36625,20	13,65	13,54							
NEGRO_564	-3,071	-60,164	10,18	23,29	66861,00	13,04	29,92							
JASON-2			ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3
NEGRO_178	2,208	-69,522	147,55	147,51	154,13	154,21	334,92	341,03	5,22	5,30	7,50	7,61	312,35	322,44
NEGRO_013	2,309	-69,329	142,63	142,52	147,60	147,62	281,79	289,17	4,22	4,32	12,85	12,78	281,97	292,64
NEGRO_089_01	1,262	-66,87	70,81	71,10	80,10	79,97	5806,25	5543,75	9,02	8,62	3,23	3,49	8257,17	7892,28
NEGRO_089_02	0,904	-66,996	68,61	68,72	78,36	78,25	6552,00	6404,16	9,47	9,26	6,07	6,12	12055,65	11663,93
NEGRO_089_03	0,087	-67,287	60,76	60,81	69,01	68,90	8505,75	8340,79	8,12	7,96	14,91	15,01	20968,77	20382,71
NEGRO_254	-0,239	-65,814	31,42	31,27	38,10	38,31	16105,48	16973,44	6,64	6,99	3,91	3,34	25818,76	26558,67
NEGRO_165	-0,451	-64,645	26,00	26,64	31,56	32,15	20588,58	20403,53	5,54	5,49	3,79	4,08	31689,04	32052,35
NEGRO_076	-1,026	-62,699	16,68	16,60	24,97	25,36	33052,23	34926,12	8,25	8,72	2,83	2,81		
NEGRO_241	-1,252	-62,096	14,64	14,57	25,50	25,71	220034,50	225707,54	10,84	11,12	1,76	8,39		
NEGRO_063	-3,159	-59,942	8,71	8,52	22,75	23,18	30410,54	31753,32	13,86	14,46	94,35	2,53		

RIO MADEIRA

Estação	Lat (°)	Long (°)	Cota Mín (m)	Cota Máx (m)	Área (m ²)	Raio Hidráulico (m)	Declividade (cm/km)	Vazão (m ³ /s)
ENVISAT								
GRANDE_564_2	-19,043	-63,785	536,12	553,31	1639,92	12,6	103,82	7074,50
GRANDE_035_2	-18,747	-63,185	403,38	406,79	4913,81	3,39	90,19	14432,76
GRANDE_020_4	-17,93	-62,803	306,32	310,05	4822,89	3,70	34,24	10484,82
GRANDE_020_3	-17,884	-62,792	304,18	305,81	1160,56	1,62	79,85	1895,73
GRANDE_020_2	-17,776	-62,767	294,24	297,32	2621,08	3,05	41,52	5072,21
GRANDE_020_1	-17,723	-62,754	291,06	292,99	1682,96	1,92	49,41	2659,40
GRANDE_493_2	-17,47	-62,769	273,38	276,19	1084,66	2,76	42,53	1746,31
GRANDE_493_1	-17,134	-62,848	250,77	250,85	22,88	0,07	32,09	4,15
GRANDE_035_1	-16,106	-63,806	183,66	189,37	1467,47	5,46	0,0008	4060,73
GRANDE_106_1	-16,104	-63,813	183,34	188,89	788,10	5,14	13,55	1038,20
GRANDE_650_1	-15,982	-64,503	163,66	173,3	1118,24	8,26	8,96	1640,74
GRANDE_579_1	-15,925	-64,567	161,73	171,14	1251,53	8,24	6,64	1687,20

MAMORE_192_1	-15,117	-65,021	146,06	157,75	5926,83	11,17	0	0,00						
MAMORE_192_3	-15,058	-65,007	146,11	157,29	5478,20	10,69	12,01	12970,33						
MAMORE_192_5	-14,986	-64,991	144,64	156,49	5747,25	11,29	5,78	10837,81						
MAMORE_579_2	-13,139	-65,208	127,11	139,45	7798,88	11,87	6,73	16771,57						
MAMORE_579_3	-13,126	-65,211	126,79	139,46	4890,62	11,88	3,19	7513,36						
MAMORE_736_1	-12,468	-65,133	123,36	137,28	6152,64	13,09	6,79	13246,12						
MADEIRA_278-3	-10	-65	97,00	106,00	7668,00	8,81	43,01	27618,60						
MADEIRA_278_2	-10	-65	83,00	97,00	12320,00	13,56	6,85	30432,43						
MADEIRA_278_1	-9,548	-65,193	78,26	92,17	9305,79	13,35	18,72	30741,67						
MADEIRA_493	-9	-64	61,00	75,00	8638,00	13,39	5,66	18690,54						
MADEIRA_736	-9	-64	59,00	72,00	11791,00	12,63	17,42	38730,20						
MADEIRA_951	-8	-64	47,00	62,00	12990,00	14,49	5,25	30340,20						
MADEIRA_192_3	-8,605	-63,545	43,14	56,90	8990,04	13,20	2,86	15416,47						
MADEIRA_192_2	-8,568	-63,537	43,01	56,53	7300,80	12,87	9,62	18159,93						
MADEIRA_192_1	-8,46	-63,513	41,51	55,56	13192,95	13,64	9,68	37215,61						
MADEIRA_407	-8	-63	40,00	54,00	16814,00	13,68	4,09	36817,59						
MADEIRA_865_1	-7	-62	33,00	47,00	16268,00	13,67	5,06	38116,34						
MADEIRA_650_2	-6	-62	28,00	42,00	23968,00	13,77	0	0,00						
MADEIRA_321	-6	-62	28,00	42,00	17192,00	13,68	5,95	43013,04						
MADEIRA_650_1	-6	-62	27,00	41,00	15008,00	13,64	5,45	35534,15						
MADEIRA_779	-6	-61	21,00	37,00	19984,00	15,60	0,50	23214,23						
MADEIRA_106	-5,856	-61,497	20,74	35,42	15766,32	14,28	3,53	33043,86						
MADEIRA_235	-5,619	-61,145	18,60	32,84	16589,60	13,90	4,70	38282,33						
MADEIRA_693	-5,211	-60,516	13,96	29,02	13614,24	14,57	1,72	21906,12						
MADEIRA_149	-4,648	-59,922	12,14	25,45	20377,00	13,08	1,17	29512,50						
MADEIRA_020	-4,342	-59,725	11,67	25,15	12509,44	13,09	3,96	25300,75						
MADEIRA_607	-4	-59	9,00	22,00	15613,00	12,72	1,10	20899,86						
MADEIRA_478	-3	-58	8,00	20,00	13536,00	11,75	5,93	30536,01						
MADEIRA_063	-3,375	-58,766	7,36	20,94	13614,20	13,44	-	-						
JASON-2			ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3	ICE 1	ICE 3
GRANDE_063	181,22	191,08	81,22	181,22	191,06	191,08	1436,64	1439,56	8,67	8,68	7,16	22	076,98	2089,21
MADEIRA_241_3	-10,414	-65,418	9,66	9,00	08,07	07,00	4827,34	4592,00	8,17	7,78	40,60	38,97	15265,22	13921,06
MADEIRA_241_2	-10,103	-65,302	2,99	3,00	7,66	7,00	10635,75	11186,00	14,09	13,52	7,77	48	7155,73	29203,20
MADEIRA_241_1	-9,601	-65,116	74,74	74,00	89,54	88,00	11943,60	11298,00	14,27	13,53	10,55	10,39	34743,96	31689,01
MADEIRA_254	-8,139	-62,972	36,79	37,58	51,65	51,89	18233,22	18711,75	14,50	14,88	3,92	3,98	40868,58	42763,99
MADEIRA_076	-5,615	-61,055	18,41	18,00	31,72	31,00	8851,15	8645,00	12,79	12,51	5,01	5,45	18116,70	17971,85

MADEIRA_063_1	-5,522	-60,792	16,57	16,00	30,94	30,00	11222,97	10934,00	13,85	13,51	3,65	0,00	22168,24	0,00
MADEIRA_063_2	-5,392	-60,745	16,07	16,00	30,32	30,00	15888,75	15610,00	13,89	13,65	10,17	18,84	47436,34	57036,43
MADEIRA_063_3	-5,308	-60,714	14,99	14,00	29,92	29,00	14989,72	15060,00	14,49	14,56	2,55	2,52	28002,46	28099,39
MADEIRA_152	-3,591	-58,948	6,90	6,00	21,01	21,00	36841,21	39165,00	13,95	14,82	-	-	-	-

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

755

756

757

758

Lista de figuras

Figura 1.

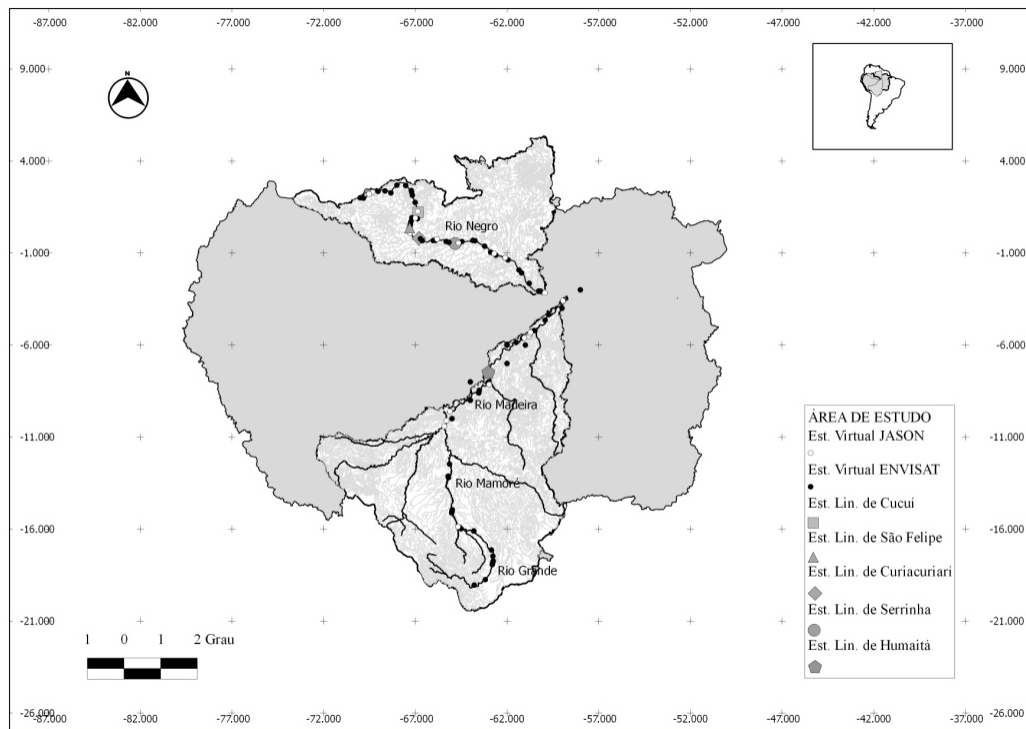
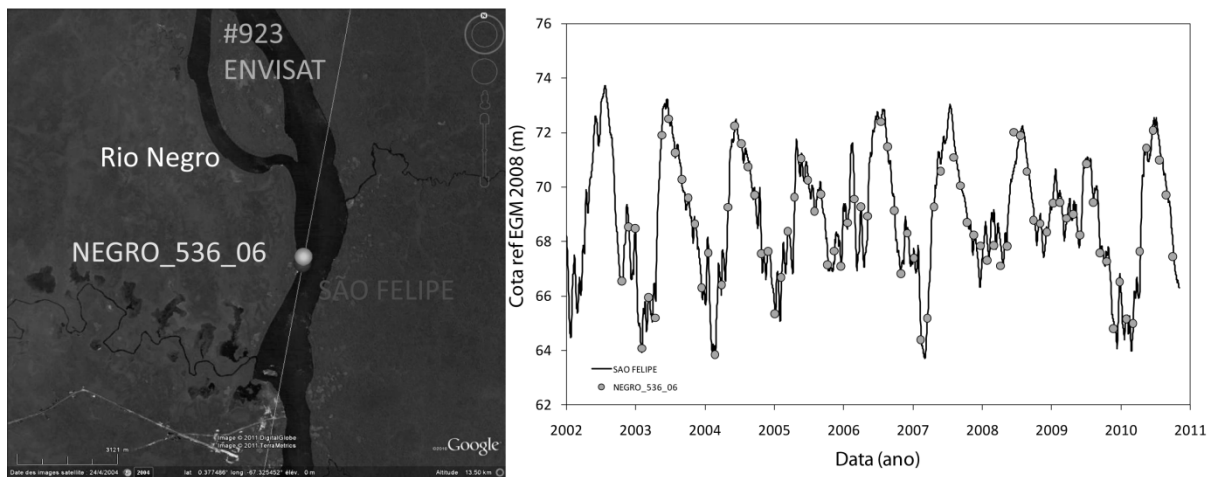


Figura 2. a)



2 b)

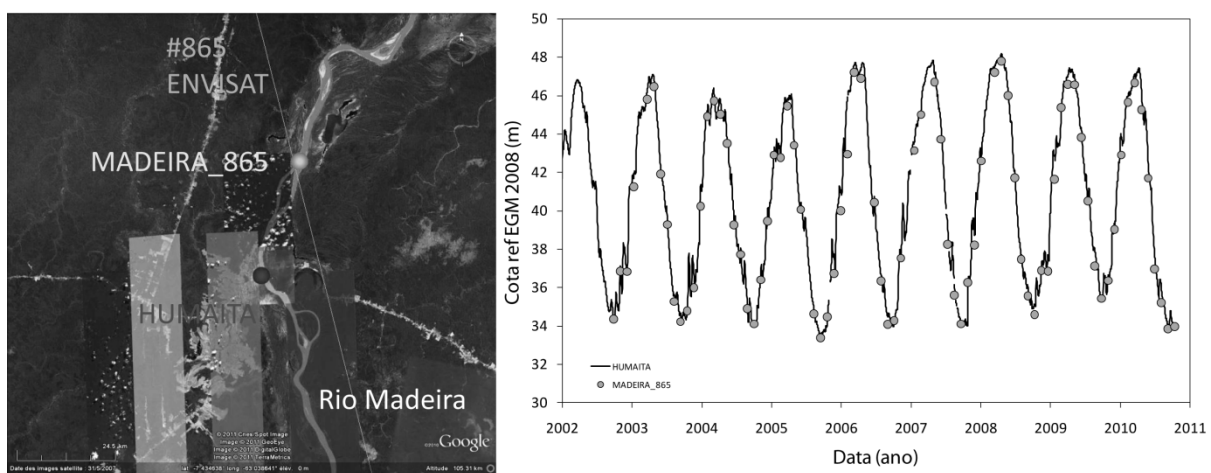


Figura 3. (a) Cucuí. (b) Curicuriari. (c) Serrinha. (d) Huimaitá.

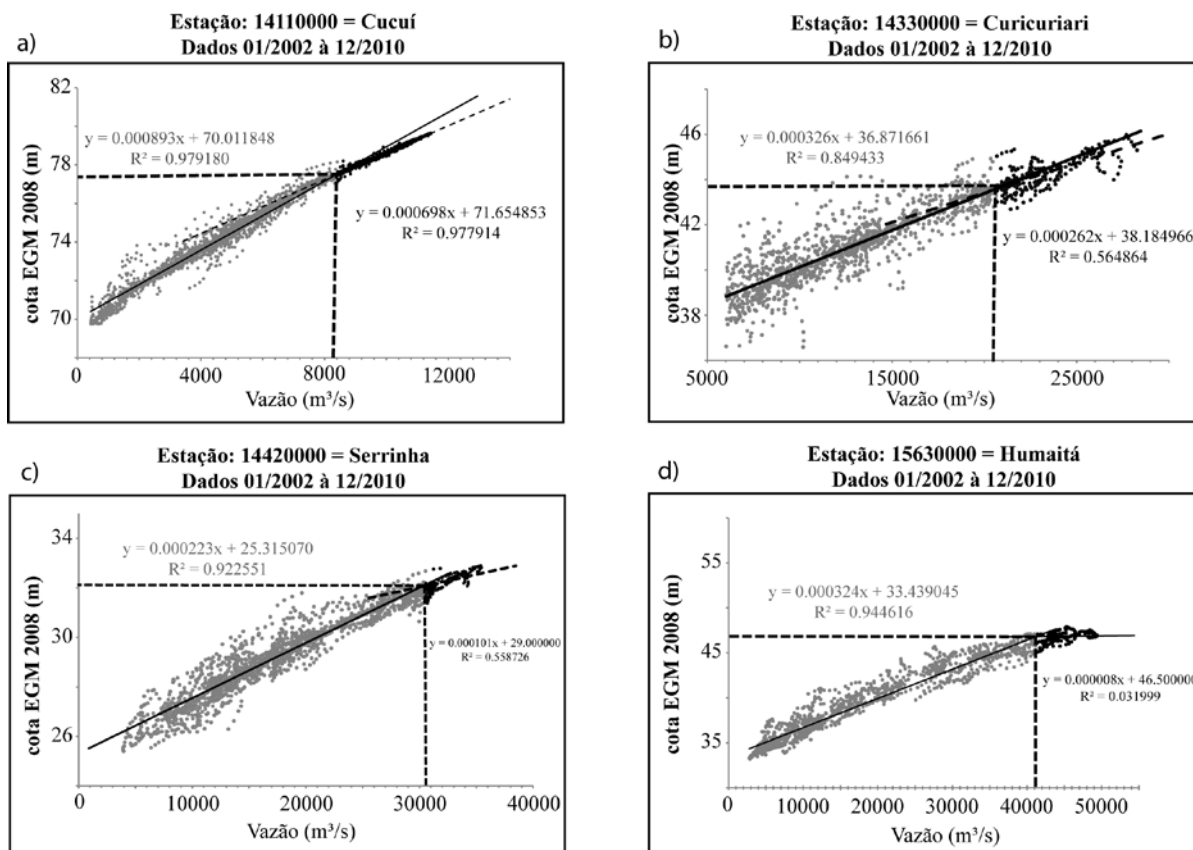


Figura 4

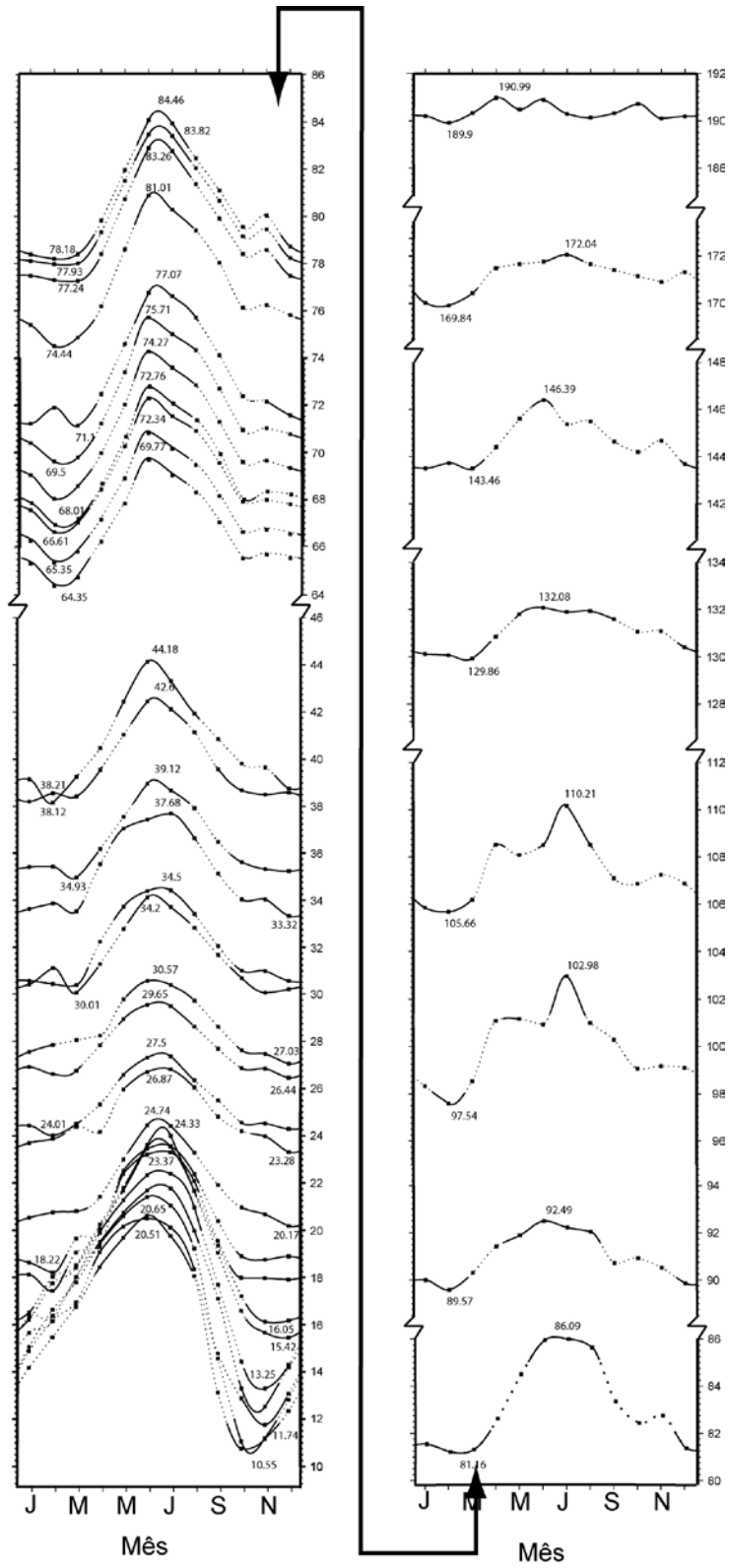


Figura 5

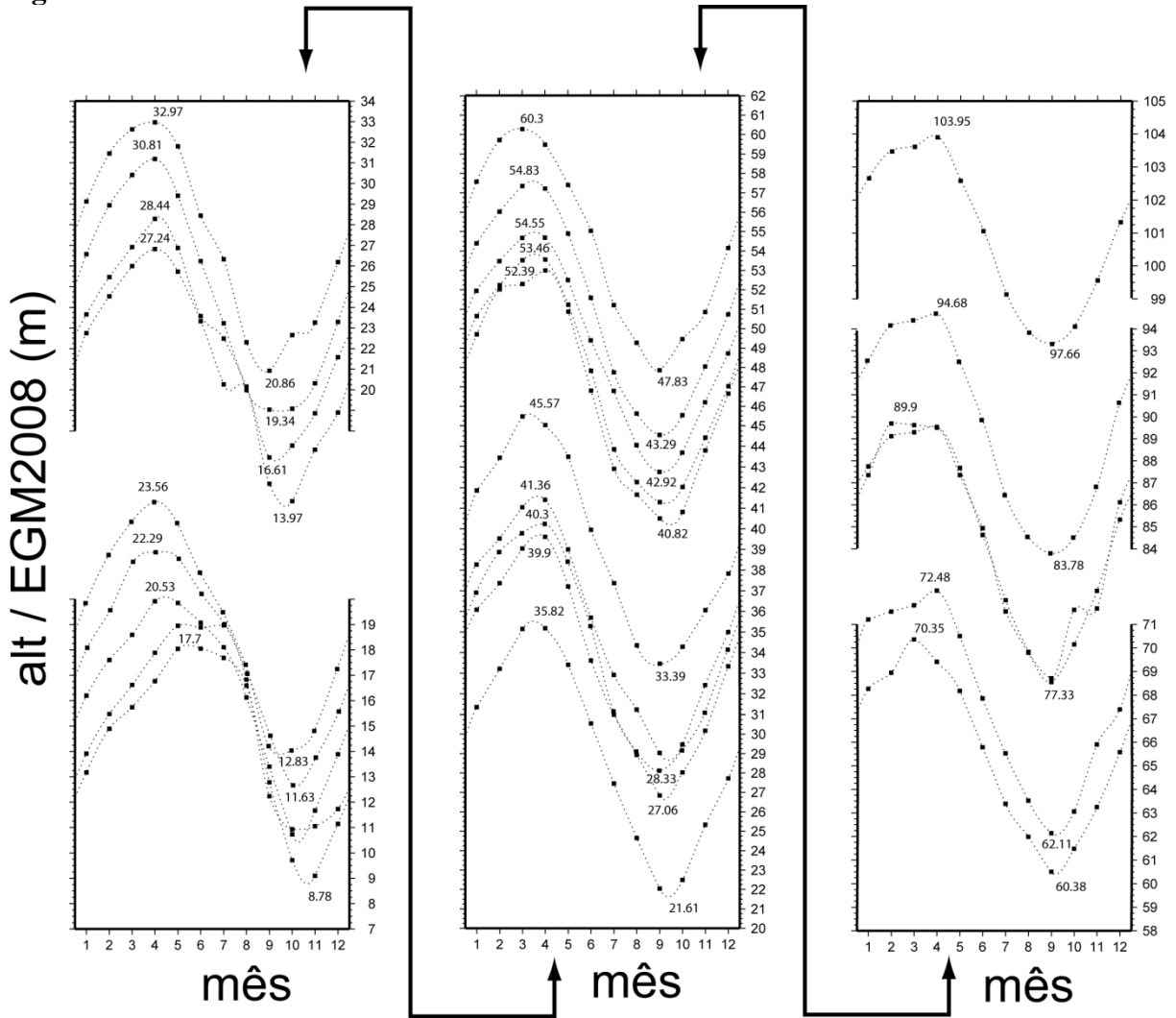


Figura 6

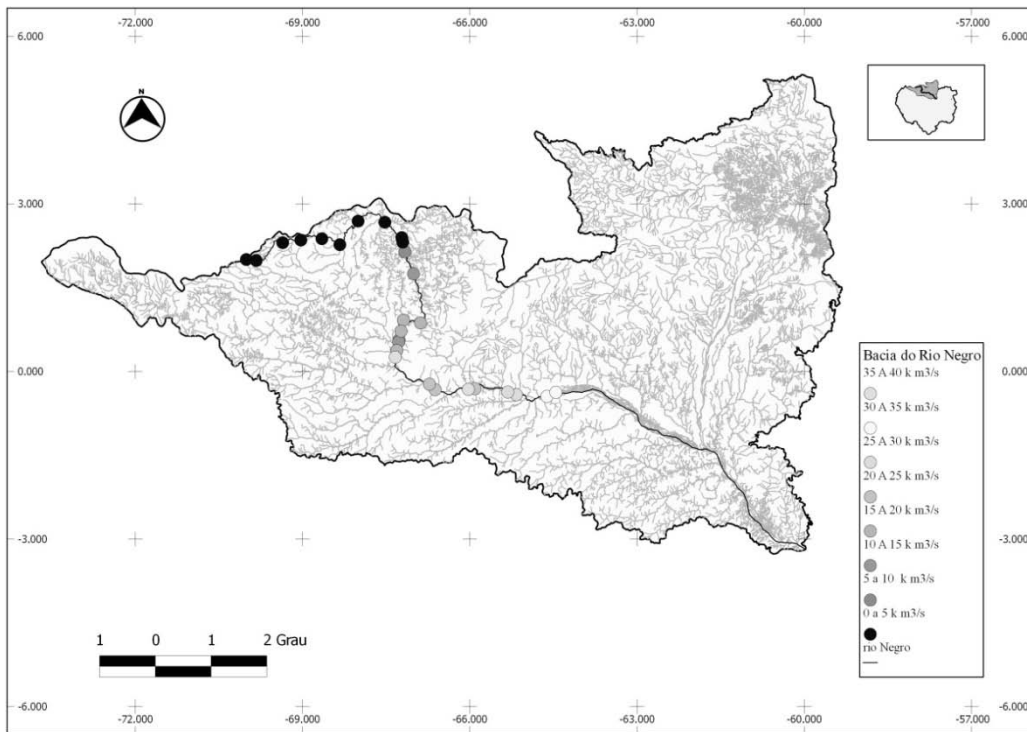
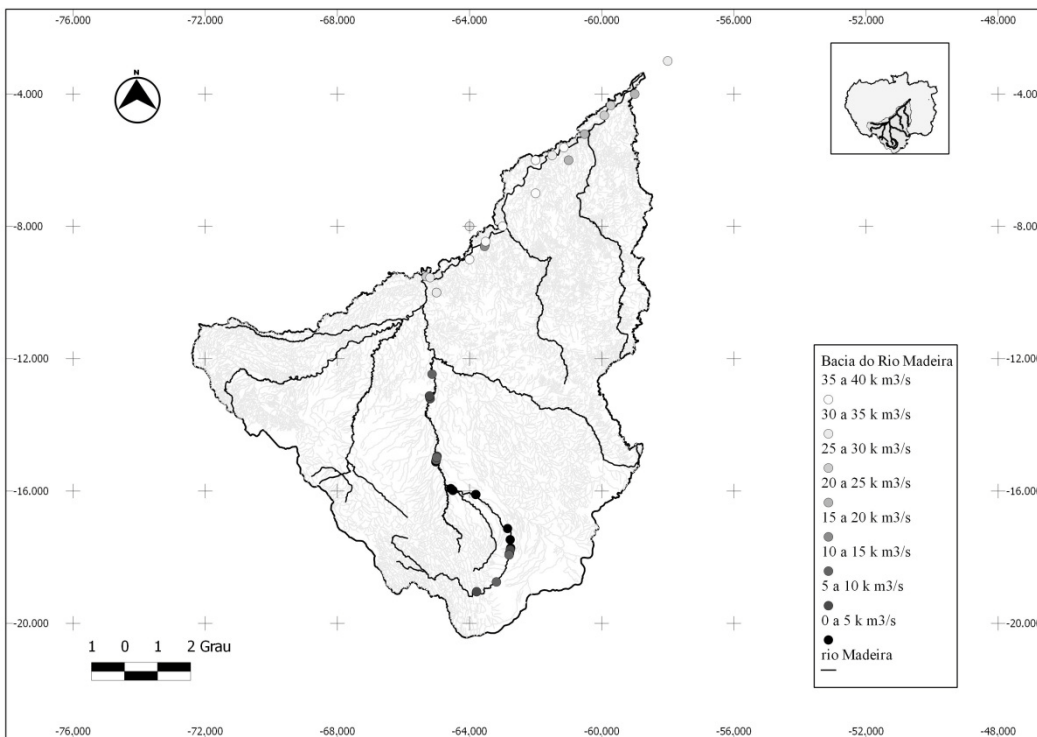


Figura 7



Conclusões e Recomendações

Os resultados deste estudo empregando o modelo de Dingman e Sharma (1997) utilizando os dados altimétricos, demonstraram claramente serem promissore para grandes Bacias como foi constatado no desenvolvimento deste estudo e, portanto esta inovação tecnologia da Altimetria espacial pode auxiliar as regiões extensas e remotas como as existentes na bacia Amazônica.

A utilização das informações provenientes das missões altimétrica torna-se uma alternativa interessante para estimar e aumentar a rede global de monitoramento de vazão em bacias pouco instrumentadas e com carência de estações fluviométricas.

As limitações da metodologia são provenientes das peculiaridades existentes nas áreas de estudo, uma vez que o modelo geomorfológico das sub-bacias analisadas pode interferir nos resultados, de modo que algumas considerações devem ser evidenciadas como: falhas tectônicas, arquipélagos, curso de água anastomosada, afluentes e barragens hidráulicas.

No caso bacia do Rio Madeira vale ressaltar que a composição granulométrico do leito do rio e dos sedimentos em suspensão drenado das cordilheiras do Andes desempenha um papel regulador na descarga de margem plena, visto que os depósitos fluviais são os principais controladores da morfologia do canal.

Neste sentido registram-se algumas sugestões para condução de estudos futuros associados com a pesquisa aqui realizada. Primeiramente avaliar o ajuste do percurso do leito dos rios levando em consideração os efeitos da dinâmica dos processos sedimentológicos e avaliação da topografia que é uma forçante fundamental para a circulação da água, sendo, ao mesmo tempo, fator condicionante da dinâmica.