

Revista Brasileira de Cartografia (2017), N° 69/2: 347-360
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ALTIMETRIA POR SATÉLITE RADAR APLICADA A HIDROLOGIA NO BRASIL

Satellite Altimetry for Hydrology in Brazil

**Eric Oliveira Pereira, Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu &
Philippe Maillard**

¹Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências - Departamento de Geografia
Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - Brasil
{ericpereira, luizagontijoaca, philippe}@ufmg.br

Recebido em 26 de Abril, 2016/ Aceito em 7 de Dezembro, 2016
Received on April 26, 2016/ Accepted on December 7, 2016

RESUMO

A altimetria por satélite é uma técnica que viabiliza a tomada de medidas de nível em oceanos, gelo, rios e lagos. Inicialmente foi desenvolvida com o objetivo de monitorar os oceanos, entretanto a grande quantidade de dados gerados para áreas continentais viabilizou a realização de estudos relativos a variação espacial e temporal do volume de água em rios e lagos. Tradicionalmente o monitoramento do nível dos rios e lagos é realizado com equipamentos de medição *in situ* o que gera alto custo de instalação e operação, e dificulta sua instalação em localidades remotas. Neste contexto, a altimetria por satélite pode ser utilizada de modo a complementar a rede de monitoramento convencional. No Brasil, a maioria dos estudos de altimetria por satélite se concentra na bacia Amazônica devido a importância e visibilidade da região para o mundo, além da escala dos rios permitirem o uso direto da altimetria radar. O uso desta técnica fora do contexto amazônico apresenta ainda muitos desafios devido às limitações impostas pela natureza do porte dos rios (pequeno e médio) e também pela resolução espacial (*footprint*) dos sensores embarcados nas missões atuais. O objetivo deste trabalho é apresentar as pesquisas realizadas no Brasil desde 1993 até o presente e avaliar o modo de funcionamento dos sensores altimétricos radar. O aprofundamento nos estudos e técnicas de obtenção e processamento de dados, assim como o lançamento de novas missões e desenvolvimento de sensores mais precisos, possa auxiliar no desenvolvimento desta área do conhecimento tanto na Amazônia quanto em outras regiões do Brasil, viabilizando e melhorando o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos.

Palavras chaves: Altimetria por Satélite, Águas Continentais, Bacia Amazônica, Rio São Francisco, Radares Altimétricos.

ABSTRACT

Satellite altimetry is a technique that enables measurements of ocean, ice, river and lake levels. Although satellite altimetry was developed mainly for the purpose of monitoring oceans, the large amount of data generated for continental areas also allows hydrological studies, once the systematic temporal and spatial monitoring of water levels in, in a precise and regular manner is essential to understand hydrological processes. The monitoring of rivers and lakes is traditionally made by *in situ* measuring, but these monitoring stations have a high cost of operation and maintenance and the difficulty to reach remote areas limits their installation in many parts of the territory. In this context, satellite altimetry can be used as a way to complement the conventional network of *in situ* stations. In Brazil, most studies were concentrated in the Amazon basin due to its importance and visibility for the world, but also due to the size of

the rivers allowing direct use of satellite altimetry. The use of this technique outside of the Amazon still presents many challenges because of the river width limitations (small and medium) and also the spatial resolution (footprint) of the sensors aboard the current missions. The objective of this article is to present a review on the main studies in Brazil from 1993 until present, and also to show the principles of altimetric radar sensors. The increased number of studies, improvements in techniques of data processing, the launch of new missions and the development of more accurate sensors and missions are very promising for this field of study. It is expected that the next few years will bring many more studies in this area whether in the Amazon or elsewhere in Brazil, enabling and improving the monitoring and management of water resources.

Keywords: Satellite Altimetry, Inland Waters, Amazon Basin, São Francisco River, Altimetric Radars.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais, um dos que apresenta os mais variados, legítimos e correntes usos é a água (BENETTI & BIDONE, 1993). Esse recurso possui usos múltiplos, dos quais se destacam o agropecuário, o industrial, o hidroenergético e o abastecimento público (GLEICK & AJAMI, 2014). Conforme Postel *et al.* (2014) cada vez mais os recursos hídricos são utilizados sem se levar em conta seus limites de renovação.

Conhecer a qualidade e a quantidade de água disponível ao longo do tempo é essencial para a garantia de oferta desse recurso. A forma mais comum de regular a quantidade e qualidade da água é através da instalação estações de monitoramento diretamente nos rios, lagos e reservatórios. Em conjunto elas formam uma rede hidrológica e contribuem com a gestão dos recursos hídricos (TUCCI, 2001).

A rede hidrológica de estações *in situ* de monitoramento, em todo o mundo, sofre com o decréscimo em quantidade (HARVEY & GRABS, 2003; CALMANT *et al.*, 2006). Isso ocorre por diversos fatores, entre eles o alto custo de instalação e operação, além da perda de pontos de monitoramento pela ocorrência de eventos climáticos extremos e da depredação (GOVATSKI, 2002).

Uma alternativa que pode contribuir na minimização dos problemas enfrentados no monitoramento dos recursos hídricos é a possibilidade da geração de dados de nível (cotas), semelhantes aos das estações *in situ*, por sensoriamento remoto com o uso da altimetria por satélite radar.

Apesar de não ter sido o objeto principal da altimetria por satélite, as pesquisas em hidrologia têm se valido da grande quantidade de dados gerados em todo o planeta e de sua

rápida disponibilização, se tornando uma nova ferramenta para a medição do nível de rios e lagos (CALMANT & SEYLER, 2006). Os estudos com uso da altimetria radar possibilitam além da medição do nível de rios e lagos, o cálculo de vazão e a elaboração de modelos hidrológicos, entre outros (BERRY *et al.*, 2005; CRETAUX & BIRKETT 2006; CRETAUX *et al.*, 2011; VIGNUDELLI *et al.*, 2011; PAPA *et al.*, 2012; RIČKO *et al.*, 2012).

Apesar de ser amplamente utilizada no mundo, a altimetria por satélite radar aplicada a hidrologia conta com poucas publicações no Brasil, tanto no que diz respeito ao seu funcionamento quanto no seu potencial de uso e aplicabilidade.

Neste contexto, os objetivos deste artigo são: apresentar os principais conceitos da altimetria radar de baixa resolução (*Low Resolution Mode – LRM*), seus princípios de funcionamento e também, o estado da arte de trabalhos realizados em território brasileiro até 2016.

1.1 História da altimetria

A altimetria radar foi desenvolvida para medir a forma da Terra (McGOOGAN *et al.*, 1974). As primeiras missões com utilização de radares na obtenção de informações geodésicas e oceanográficas surgiram na década de 1970, com o lançamento dos satélites SKYLAB, GEOS-3 e SEASAT (VIGNUDELLI *et al.*, 2011).

Já nas décadas de 1980 e 1990 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) fizeram investimentos significativos na área com o lançamento das missões Geosat (1985), ERS-1 (1991), TOPEX/Poseidon (1992) e ERS-2 (1995). As missões Geosat e ERS-1 tiveram como produtos mais relevantes os

modelos geoidal e de superfície da topografia oceânica (SMITH *et al.*, 1997). Ainda no século XX, a Rússia lançou o satélite GEOIK (parte da constelação Kosmos) destinado ao desenvolvimento de um modelo gravitacional e, posteriormente, de um geóide marinho (VIGNUDELLI *et al.*, 2011). No século XXI houve um crescimento significativo no número de missões lançadas. Essas missões (Tabela 1) tiveram um aumento na acurácia dos

dados obtidos, principalmente nos oceanos e superfícies de gelo.

As perspectivas futuras nos estudos envolvendo altimetria por satélite são bastante promissoras com o lançamento de diversas missões, com a incorporação de tecnologias que visam uma maior precisão na obtenção de dados altimétricos e podem melhorar a qualidade dos dados obtidos através de radar altimétrico.

Tabela 1: Missões Alitmétricas Século XXI

Satélite	Agência	Lançamento	Altimetro	Banda	Período de revisita
Jason-1 *	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2001	Poseidon-2	Ku e C	10 dias
ENVISAT *	ESA	2002	RA-2	Ku	30-35 dias
Icesat-1	NASA	2003	Laser	-	8 e 9 dias
Jason-2 *	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2008	Poseidon-3	Ku e C	10 dias
Cryosat-2	ESA	2008	Siral	Ku	369 dias
HY-2A	CHINA	2011	-	Ku e C	14 dias
SARAL *	CNES/ISRO	2013	AltiKa	Ka	35 dias
Jason-3 *	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2015	-	Ku e C	10 dias
Sentinel-3	ESA	2016	-	Ku e C	-
Icesat-2	NASA	Previsão 2017	Laser	-	-
SWOT	CNES, NASA CSA	Previsão 2020	Karin	Ka	21 dias
Jason-CS	EUMETSAT	Previsão 2020	-	-	-

Fonte: Adaptado de (SULISTIOADI, 2013).

1.2 Princípios de funcionamento de um radar altimétrico

O termo radar é derivado de *Radio Detection And Ranging*, seu sistema é composto por um gerador de pulsos, um transmissor, um receptor, um gravador e uma antena, conforme ilustrado na Figura 1 (RIDENOUR, 1965).

Os radares funcionam com ondas eletromagnéticas nos comprimentos das micro-ondas (~1 mm-1m). No caso dos altímetros radar LRM, as bandas Ku e Ka são as mais comumente utilizadas (Tabela 1).

O satélite emite um pulso na direção da superfície, após interagir com a mesma a parte

refletida na direção do satélite é registrada. Sabendo-se o tempo gasto, a velocidade da luz e a distância entre o satélite e o elipsóide, é possível calcular a altitude da superfície (Figura 2).

A energia eletromagnética emitida pelo radar percorre a distância de ida e volta à superfície com velocidade próxima a da luz. A antena registra o tempo gasto para o sinal percorrer essa trajetória, o tempo medido é, então, dividido por dois e multiplicado pela velocidade da luz (CHELTON *et al.*, 1989). O valor encontrado é subtraído da altitude do satélite em relação ao elipsóide e, assim, é estimada a altitude da superfície com precisão centimétrica (GARDINI *et al.*, 1995).

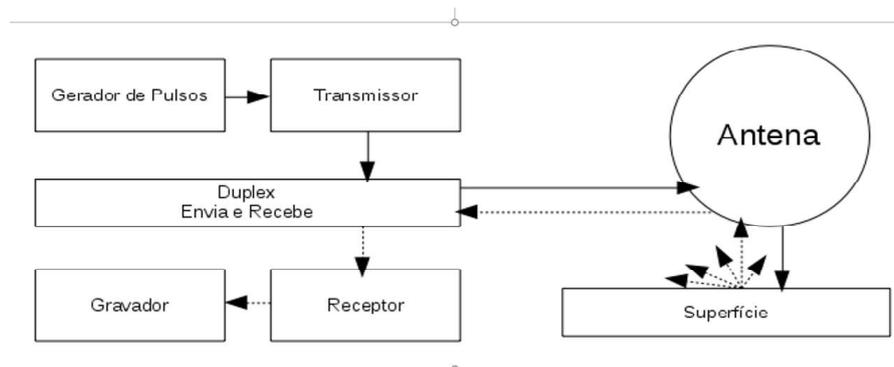


Fig. 1 – Esquema básico dos elementos que compõem um radar altimétrico, que são o gerador de pulso, o transmissor, o receptor, o gravador e uma antena. Adaptado de Jensen (2009).

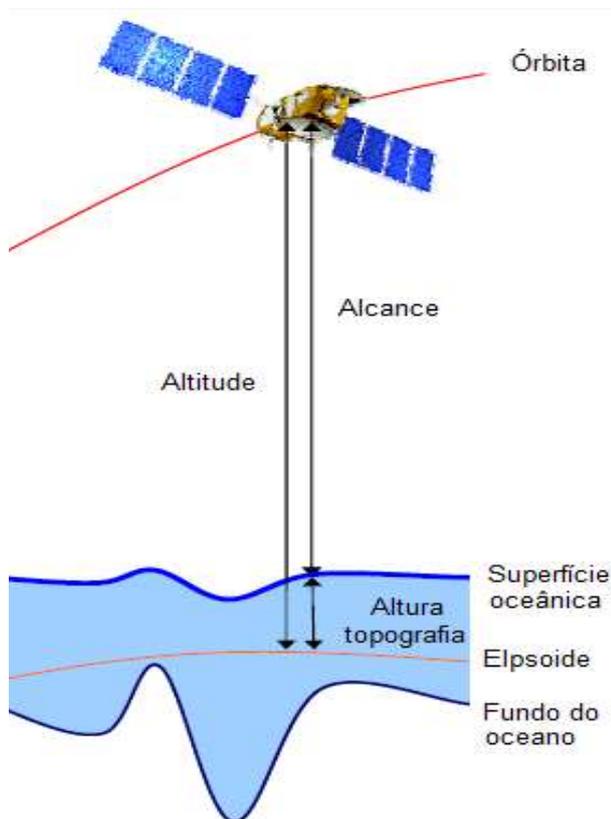


Fig. 2 – Princípio da altimetria. Para obter a altitude da superfície um pulso é enviado em direção à superfície, esse pulso é, em parte, refletido na direção do sensor onde é registrado. Adaptado de BRONNER *et al.*, 2013.

1.2.1 Funcionamento do radar altimétrico LRM

Os dados altimétricos utilizados pelos trabalhos citados neste artigo são obtidos através de sensores de baixa resolução (LRM). Nesse caso o sensor trabalha como um altímetro de pulso limitado, que é baseado na transmissão de um sinal de curta duração, com poucos nano-segundos (ns), e com largura de banda relativamente ampla (CHELTON *et al.*, 1989). O

signal é transmitido de forma contínua e o retorno é processado e sumarizado com o objetivo de reduzir os ruídos causados por respostas múltiplas (FENOGLIO-MARC *et al.*, 2015). O tempo de duração entre a transmissão e o retorno de um pulso é medido e, conhecida a velocidade da luz, é possível estimar o alcance (*range*) das ondas eletromagnéticas emitidas pelo sensor do satélite, conforme Equação 1.

$$R = \frac{T * c}{2} \quad (1)$$

onde R é o alcance do satélite (*range*), T é o tempo gasto para percorrer a distância de ida e volta entre o satélite e a superfície e c é a velocidade da luz.

A variação do *range* do sinal é muito maior que aquela possível de ser registrada pelo sistema de gravação do satélite (ROCA *et al.*, 2009). Por isso é necessário que o sensor acompanhe a variação da superfície continuamente, isso é feito através do algoritmo de *tracker*. Esse algoritmo estima o tempo gasto para um pulso percorrer a distância de ida e volta entre o satélite e a superfície. Esse processo deve garantir a recepção de todos os retornos necessários para estimar a altitude da superfície. Em alguns casos, como no sistema implementando no satélite ENVISAT, a resolução do radar pode ser ajustada, o que resulta em melhores estimativas e menor quantidade de perda de dados (BACKER *et al.*, 2002).

Os valores de retorno correspondem a algumas centenas de pulsos, que são então discretizados e gravados na janela estimada pelo *tracker*. Esses valores correspondem à amplitude ou potência dos retornos, e são

registrados pelo gravador do radar. O conjunto de retornos sumarizados para um determinado ponto pode ser representado como uma forma de onda (*waveform*), conforme exemplificado na Figura 3.

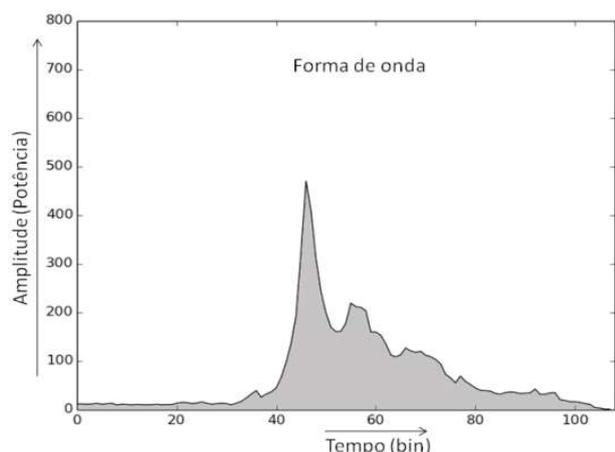


Fig. 3 - Forma de onda obtida sobre um lago. O eixo x representa o tempo e o eixo y corresponde às amplitudes do sinal.

As formas de onda (FO) representam, em média, uma variação altimétrica entre 40 e 100 metros, a depender da frequência e variação da largura da banda do sensor utilizado (BACKER *et al.*, 2007; BRONNER *et al.*, 2013). Cada um dos pontos gravados ao longo da projeção das órbitas dos satélites possui uma FO, a partir delas é possível calcular a altitude da superfície de forma precisa.

As ondas eletromagnéticas respeitam os princípios ópticos, sendo refletidas em várias direções e podem conter respostas de vários pontos da superfície (CHELTON *et al.*, 1989). Aquelas que são refletidas no nadir tendem a representar a resposta de maior potência e aparecem como picos nas FOs.

Quanto mais irregular for a superfície (refletor difuso), maior será a área responsável pelas respostas registradas. Esta área tem origem no ponto central (nadir) e expande de forma circular de acordo com as características da superfície e é chamada de pegada do satélite ou *footprint* (Figura 4).

Associado ao *tracker*, a pegada do satélite e as formas de onda (Figura 5), foram desenvolvidos os algoritmos *retracker*. Esses são utilizados para calcular a altitude das superfícies a partir da análise das respostas registradas nas formas de onda, dentre os algoritmos mais conhecidos tem-se o ICE-1, o ICE-2 e o Ocean. Algoritmos *retracker* podem ser divididos em dois tipos: os físicos e os empíricos. Os *retrackers* físicos são

baseados no conhecimento dos parâmetros físicos do retroespalhamento das micro-ondas. Já os modelos empíricos de classificação das formas de onda têm como base as propriedades estatísticas dos dados ou funções de ajuste das formas de onda (VIGNUDELLI *et al.*, 2011).

No primeiro momento, antes da onda eletromagnética atingir a superfície, nenhum retorno é gravado, a partir do momento que a superfície é atingida os retornos são gravados e o sinal se expande em forma de anéis concêntricos (CNES apud SULISTIOADI, 2013).

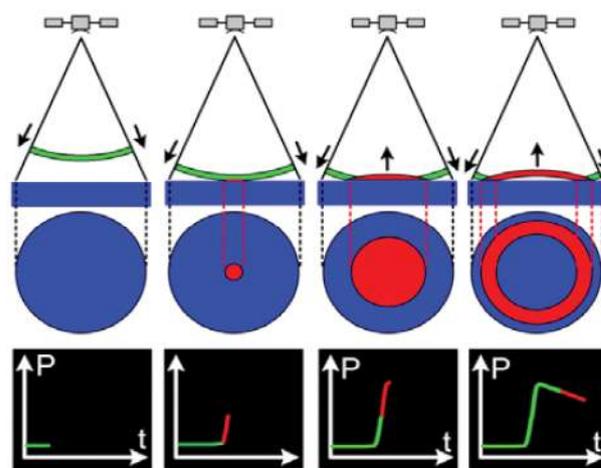


Fig. 4 – Expansão do sinal radar sobre o oceano.

O produto final obtido diretamente dos dados dos sensores radar LRM é a altitude das superfícies, para isso é necessário aplicar a Equação 2 (MAILLARD *et al.*, 2015).

$$H_a = H_s - (\rho + iono + dry + wet + pt + set) + GC \quad (2)$$

onde H_a é a altitude ortométrica, H_s é a altitude do satélite em relação ao elipsóide, ρ é o *range* (alcance), *iono* (correções ionosféricas), *dry* (correção da pressão atmosférica), *wet* (correção da umidade atmosférica), *pt* (correção da maré polar), *set* (correção da maré terrestre) e *GC* (correção da ondulação geoidal).

Devido à complexidade e diversidade das superfícies continentais e da incapacidade dos algoritmos *retracker* desenvolvidos para o monitoramento dos oceanos no tratamento correto das formas de onda geradas nesses ambientes, os *retrackers* são pouco eficientes na estimativa de nível de rios e lagos, principalmente nos de pequeno porte (SMITH, 1997).

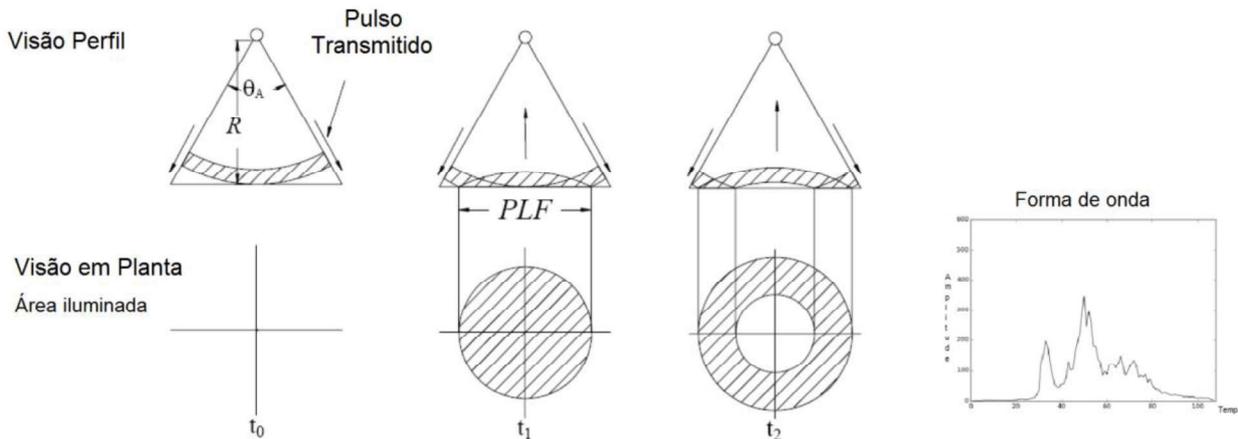


Fig. 5 – Representação em perfil e planta do sinal radar ao longo do tempo e a sua forma de onda. Conforme o tempo passa o círculo se expande em anéis concêntricos, como resultado desse processo tem-se a forma de onda, representada à direita. Fonte: adaptado de (LEE, 2008).

1.3 Dados altimétricos

Os dados de altimetria radar LRM são geralmente disponibilizados de forma gratuita para uso em pesquisas. As principais agências e instituições que hospedam esses dados são a NASA, a “European Space Agency” (ESA), a “Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data” (AVISO), a “Physical Oceanography Distributed Active Archiving Center” (PODAAC), “Indian Space Research Organization” (ISRO). Os dados gerados à bordo dos satélites são baixados através de estações terrestres distribuídas no mundo. Essas estações recebem os dados brutos do satélite e enviam para os centros de controle e processamento das agências responsáveis, que tratam os dados para melhoria da qualidade e precisão.

Os formatos de disponibilização dos dados para os usuários da altimetria por satélite são determinados, basicamente, pela necessidade de compressão para o armazenamento das informações. Com o crescimento no número de missões e o conseqüente crescimento na quantidade de dados gerados, surgiu a necessidade de um se utilizar um padrão que fosse eficiente no armazenamento dos dados e que garantisse sua consistência. Os formatos adotados tendem a não ser tão compactos, mas possibilitam uma maior flexibilidade de conteúdo e um maior nível de detalhamento dos metadados.

Produtos recentes de altimetria passaram a utilizar formatos mais padronizados, influenciados pela comunidade científica usuária e apoiadora das tecnologias *open-data* e *open source*. Os dois tipos de formatos de dados mais utilizados na altimetria radar são o *Hierarchical Data Format* (HDF) e o *Network Common Data Form* (NetCDF), sendo o segundo utilizado amplamente pela comunidade científica de estudos climatológicos e mais recentemente pela altimetria.

Esses formatos são autodescritivos, fazendo com que o programa desenvolvido para ler e analisar os dados altimétricos possa determinar seu próprio conteúdo. Dessa forma, as ferramentas necessitam de um número menor de parâmetros de configuração específicos para analisar dados de diferentes missões. As convenções determinadas pelo *NetCDF Climate Forecast Conventions* foram adotadas por vários projetos e grupos de pesquisa. Essas convenções definem metadados que descrevam o que os dados de cada variável armazenada representam, e as propriedades espaciais e temporais dos mesmos. Essas convenções facilitam a construção de aplicações com capacidades de extração, exibição e re-interpolação de dos dados de forma mais eficientes. Com isso o código pode determinar o conteúdo dos arquivos sem a necessidade de dados auxiliares, o que viabiliza a automatização na inclusão de dados em sistemas integrados, até mesmo em sistemas que não

tenham sido originalmente criados para trabalhar com altimetria (EATON *et al.*, 2003).

O ISRO e o AVISO fornecem registros de dados para diferentes radares altimétricos. Alguns serviços *online*, como o “*Centre de Topographie des Oceans et de l’Hydrosphere*”, (CTOH) - <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/> e o “*Open Altimeter Database*” (*OpenADB*), disponibilizam os dados de altimetria para *download*.

Além desses, o projeto “*Prototype Innovant de Systeme de Traitement pour les Applications Cotieres et l’Hydrologie*” (PISTACH) fornece dados do Jason-2, com maior quantidade de processamentos, o que torna estes dados mais precisos e acurados para regiões costeiras, e que são disponibilizados de forma rápida (quase em tempo real) para zonas costeiras (PISTACH Handbook, 2010).

Alguns serviços *online*, como o “*Database for Hydrological Time Series over Inland Waters*” (DAHITI) fornecem dados de melhor acurácia e precisão, produzidos a partir da calibração cruzada dos produzidos pelos satélites ENVISAT, ERS-2, Jason-1, Jason-2, Topex Poseidon e SARAL/AltiKa, que incluem as incertezas das medições com a incorporação da abordagem do filtro de Kalman (SCHWATKE *et al.*, 2015). Outro banco de dados que disponibiliza os produtos com maior nível de processamento é o *Radar Altimeter Database System* (RADS), da Universidade Tecnológica de Delft, esses dados são validados e calibrados, também de forma cruzada.

Uma serie de centros de pesquisa e universidades fornecem dados de nível água (produto final da altimetria por satélite). Exemplos de iniciativas que oferecem esses dados são: o programa *Hydrology from Space*, do CNES, mantido pelo *Laboratoire d’Études en Geophysique et Oceanographie Spatiale* (LEGOS), que oferece produtos de altimetria para reservatórios, lagos, terras úmidas e rios (CRETAUX *et al.*;2011); o *Global Reservoir and Lake Monitor* (GRLM), do Serviço de Agricultura Exterior do Departamento Americano de Agricultura (USDA/FAS) juntamente com a NASA (BIRKETT *et al.*, 2011) e o programa *River and Lake European Space Agency/De Montfort University* (ESADMU) (BERRY & WHEELER, 2009). Recentemente, o *Meteorological and Oceanographic Satellite*

Data Archival Centre (MOSDAC) também passou a disponibilizar dados derivados de altimetria para nível de rios, reservatórios e vazão para alguns locais na Índia.

1.4 Hidrologia

Satélites altimétricos radar têm a vantagem de coletar medidas globais, homogêneas e de forma constante o que possibilita a realização de monitoramento sistemático ao longo do tempo, sem depender das condições atmosféricas e da luz solar. Além disso, os dados possuem referência espacial absoluta, o que facilita a comparação entre as medidas realizadas ao longo do globo, independente do país, da época e da missão altimétrica.

Embora o foco inicial da altimetria por satélite não seja a hidrologia, a sua contribuição para os estudos nesta área já foi amplamente demonstrada (CALMANT & SEYLER, 2006). Os dados produzidos podem ser utilizados de modo complementar aos dados convencionais (estações fluviométricas), para a criação de séries temporais, perfis altimétricos de rios, geração de dados para modelos hidrológicos e, também, para o nivelamento de estações *in situ*. A cobertura global é uma vantagem, que torna possível realizar medidas em áreas de difícil acessibilidade em todo planeta. Por outro lado, um dos maiores problemas está relacionado a frequência temporal (de 10 a 35 dias) dos satélites (ROSMORDUC *et al.*, 2006), que é incompatível com o modelo tradicional de medições diárias. Além disso, a incerteza é também um fator limitador desta área, uma vez que o erro das medições em águas interiores pode variar de poucos centímetros (nos melhores casos) a alguns metros (nos piores casos). Devido às potencialidades e às possibilidades de evolução dos sensores radar nos próximos anos, além da grande quantidade de missões presentes e futuras, a altimetria por satélite tende a se tornar cada vez mais útil e eficiente. Problemas como a frequência temporal poderão ser sanados com estudos multimissão. Já a acurácia tende a melhorar com o surgimento de novas tecnologias e sensores como os sensores em modo “SAR” (*synthetic aperture radar*) em “SARIN” (*synthetic aperture radar interferometer*) como os instrumentos a bordo das missões CryoSat-2 (SAR e SARIN) e Sentinel-3 (SAR).

2. O ESTADO DA ARTE DA ALTIMETRIA SATÉLITE RADAR

A altimetria por satélite radar tem sido amplamente utilizada na hidrologia e hoje conta com um crescente número de trabalhos, resultado da maior disponibilidade de dados gerados por diversos satélites. Nesse contexto, é importante ter um panorama das principais aplicações, dos trabalhos realizados com seu uso, aqui optamos por dar ênfase aqueles realizados em território brasileiro. Além disso, destaca-se as perspectivas futuras da altimetria radar por satélite, que podem colaborar ainda mais com o uso na hidrologia.

2.1 Aplicabilidade

A altimetria radar por satélite apresenta aplicações em diversas áreas tais como a dinâmica tropical dos oceanos, a variação do nível dos mares em larga escala, a construção de séries históricas, os estudos de fenômenos naturais globais (ex.: *El Niño* e *La Niña*) (FU & LE TRAON, 2006, BERGÉ-NGUYEN *et al.*, 2008; LUO *et al.*, 2015).

A maioria dos estudos em altimetria é feito para os oceanos, uma vez que os sensores foram, em sua maioria, desenvolvidos para monitorar esse tipo de superfície. Nessas áreas são apresentados os melhores resultados, já que as técnicas são bem desenvolvidas e a quantidade de trabalhos é grande. O uso da altimetria, porém, vai além das aplicações em oceanos, a altimetria tem sido utilizada para estudos em regiões costeiras e um número crescente de trabalhos tem sido realizado em áreas continentais (CALMANT *et al.*, 2006;2008).

No que diz respeito aos estudos hidrológicos, os dados altimétricos produzidos podem ser utilizados para complementar os dados convencionais produzidos nas estações fluviométricas, na criação de séries temporais, na elaboração de perfis altimétricos de rios e, também, para o nivelamento de estações *in situ* (CALMANT & SEYLER, 2006; BIRKINSHAW *et al.*, 2010; MICHAILOVSKY *et al.*, 2012; BECKER *et al.*, 2014).

2.2 Estudos de altimetria no Brasil

No Brasil os estudos com o uso da altimetria radar são mais frequentes na bacia Amazônica, pois as técnicas aplicadas a mares e oceanos podem ser utilizadas de forma eficaz

devido à dimensão dos corpos hídricos desta região, que torna as respostas espectrais mais semelhantes às obtidas nos oceanos.

O primeiro trabalho realizado no Brasil foi o de Koblinsky *et al.* (1993), com a utilização do satélite Geosat, que foi o primeiro com precisão suficiente para aplicação em hidrologia. O estudo foi realizado para quatro pontos na bacia Amazônica, de modo que a órbita do satélite estivesse próxima a estações fluviométricas convencionais. Foi desenvolvido um método automatizado para aplicação das técnicas de altimetria, o qual produziu um erro médio quadrático de 1,2 metros em relação aos dados *in situ*, já na aplicação da técnica manual o erro foi de 0,7 metros considerado como promissor.

LEON *et al.* (2006) calculou a relação nível-vazão para 21 estações virtuais na bacia do Rio Negro com dados ENVISAT. O estudo estabeleceu curvas chaves para as 21 estações virtuais, e apresentou um método para minimizar os erros médios quadráticos que permitiu estimar fluxo zero efetivo e conseqüentemente a profundidade das 21 seções com uma diferença média de 1,1 metros entre a profundidade medida e a estimada. O método permitiu a extração da elevação de fundo, declividade de fundo e superfície livre e coeficientes de rugosidade a partir da combinação de dados de altimetria e vazão.

Visando auxiliar no monitoramento de vazão de bacias hidrográficas com baixa quantidade de estações fluviométricas, Getirana *et al.* (2009) utilizaram os dados altimétricos com o desenvolvimento de uma metodologia baseada na distribuição de chuva calibrada e validada com o uso de dados locais. O Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Branco (sub-bacia do rio Amazonas) e os resultados das vazões calculadas indicaram uma relação entre a acurácia do modelo e o tamanho da área de drenagem, o que foi atribuído primeiramente à baixa quantidade de dados pluviométricos e também a restrições do modelo, que foi desenvolvido para grandes bacias. Além disso, foram feitas análises quanto a declividade dos rios, que foram comparados aos dados ENVISAT e *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Os resultados sugerem que os dados gerados por altimetria de satélite têm maior

acurácia entre os outros analisados e deveriam ser utilizados sempre que disponíveis. Getirana *et al.* (2013) realizou um segundo estudo na bacia Amazônica buscando analisar o potencial de grandes conjuntos de dados de altimetria na configuração de uma rede complementar de monitoramento capaz de fornecer dados de vazão em áreas não monitoradas.

De Paiva *et al.*, 2013, fizeram a modelagem hidrológica/hidrodinâmica da Bacia do Rio Amazonas, com a utilização do MGB-IPH. Para fins de validação foram utilizados dados observados através do sensoriamento remoto. Os dados de nível de água obtidos através da altimetria radar, através do satélite ENVISAT, foram um dos dados utilizados na validação.

Da Silva *et al.* (2010), compararam a performance de dois algoritmos de *retracker* (ICE-1 e ICE-2) para dados de duas missões altimétricas, ERS-2 e ENVISAT. A comparação foi aplicada para diversos trechos de rios da bacia amazônica que variam tanto em extensão quanto em largura. Quando comparados aos dados de estações convencionais, os erros médios foram de 12 centímetros nos melhores casos, 40 centímetros na maior parte das situações e muitos metros nas piores situações. Os dois *retrackers* apresentaram resultados semelhantes, quanto aos satélites, foi constatado que o ENVISAT apresentou uma melhoria na altimetria, quando comparado com o ERS-2.

Ainda em 2010, Roux *et al.* (2010) propuseram a comparação entre aspectos qualitativos e quantitativos entre três métodos diferentes de criação de estações virtuais de monitoramento: a) seleção manual de pontos; b) método semi-automático baseado nas características de cobertura do solo que permite a localização da superfície de água do corpo hídrico estudado; e c) procedimento inédito totalmente automático que utiliza um modelo digital de elevação e a estimativa da largura do rio. O estudo foi aplicado na bacia amazônica e os resultados obtidos através desses três métodos são comparados, nos quais o erro de nível de água absoluto foi de 46, 26 e 15 centímetros respectivamente, para 95, 90 e 80 por cento dos valores de nível de água gerados. Os resultados mostraram que o método automático teve erros próximos aqueles obtidos pelo método manual, isso gera a possibilidade de usar a altimetria

por satélite para obter séries temporais de nível de água em grande escala e ajudou a aumentar consideravelmente a aplicação da altimetria radar em hidrologia.

No ano de 2005, a bacia Amazônica foi afetada por um evento climático extremo, com uma seca excepcional. Devido ao número limitado de estações fluviométricas *in situ* ao longo da bacia não foi possível quantificar de forma precisa os dados de nível e vazão do rio no período. Frappart *et al.*, (2012) com a utilização de dados altimétricos multimissões observaram e calcularam a quantidade de água entre 2003 e 2007 de modo a monitorar mensalmente o nível de água armazenada na bacia Amazônica. Assim, a partir dos dados de sensoriamento remoto constatou-se que, na seca de 2005 o nível de armazenamento foi, aproximadamente, 76% menor que a média calculada entre 2003-2007. Deste modo, mostrou-se a aplicabilidade da altimetria radar como auxílio na detecção dos efeitos causados pelas mudanças climáticas.

Costi (2012) comparou as medidas altimétricas obtidas por radar com aquelas disponíveis para as estações *in situ* entre os anos de 2002 e 2008. Os dados remotos acompanharam o regime de variação de níveis registrados nas estações convencionais, o que indica o grande potencial de uso desses dados como fonte complementar em estudos hidrológicos.

Schwatke *et al.* (2015) criaram uma série temporal de dados para lagos e rios na América com o uso combinado das missões altimétricas ENVISAT, ERS-2, Jason-1 e 2, TOPEX/Poseidon e SARAL. Os erros médios quadráticos variaram entre 4 e 36 centímetros para lagos, já para rios os erros ficaram entre 8 e 114 centímetros, quando comparados aos dados das estações convencionais. Com a aplicação do filtro de Kalman, o erro médio foi de 19,6 centímetros para rio Madeira, no Brasil, em frente aos 45 e 53 centímetros obtidos por técnicas convencionais.

Paris *et al.* (2016) utilizaram radares altimétricos orbitais como suporte à modelagem de vazão. Nesse caso foram selecionados dados dos satélites Jason-2 e ENVISAT para elaboração de séries temporais para mais de 100 afluentes do rio Amazonas. Esse estudo mostrou o grande potencial da altimetria radar para o fornecimento de dados para modelos hidrológicos de grandes

bacias, uma vez que foi possível a utilização dos dados altimétricos no modelo. Como pode ser constatado a partir dos trabalhos citados a altimetria por satélite radar tem um grande potencial no monitoramento espaço-temporal das variações do nível de água, na modelagem hidrológica, entre outros. Porém os estudos são mais concentrados em grandes rios, com o Amazonas. Os estudos em regiões fora da Amazônia são mais raros, devido a própria natureza dos rios (menor porte), da topografia das margens e da região, entre outros fatores que dificultam a obtenção de dados com boa precisão e acurácia. Estudos pioneiros fora da bacia Amazônica foram desenvolvidos por Maillard e Calmant (2013), Pereira e Maillard (2014), Abreu e Maillard (2014) e Maillard *et al.* (2015).

Com a utilização de dados das missões ENVISAT e SARAL, Maillard e Calmant (2013), fizeram um estudo em um trecho de 1000 km do rio São Francisco. No artigo foram descritos uma série de processamentos espaciais para corrigir medidas de nível não relacionadas com a água. A acurácia média obtida no trecho do rio São Francisco foi de 60 cm (45 cm se eliminados os *outliers*). Posteriormente, MAILLARD *et al.* (2015) calcularam o nível de água para várias estações virtuais de monitoramento no rio São Francisco, o qual é considerado estreito para aplicações de altimetria radar em hidrologia. Técnicas de processamento baseadas na forma e largura do rio, medições fora do nadir (*off-nadir*) e conhecimentos prévios das áreas de estudo, foram utilizadas com o intuito de melhorar a precisão das medidas de nível. Quando comparado às medidas *in situ*, os erros médios quadráticos foram menores que 0,6 metros e, nos melhores casos, 0,3 metros. Os resultados mostraram que a acurácia varia significativamente dependendo de fatores ambientais tais como a cobertura do solo e a variação topográfica nas margens.

Pereira e Maillard (2014), buscando compreender a influência do comportamento da cobertura do solo nas áreas adjacentes às estações virtuais de monitoramento distribuídas ao longo do território brasileiro, analisaram as formas de onda das diferentes classes. Foram amostrados e analisados dados das coberturas mais comuns que são: agricultura, floresta nativa, floresta plantada, cerrado, pastagem, áreas urbanas e

águas abertas. As classes de águas abertas e floresta apresentaram boa separabilidade quando comparadas as outras classes. Entretanto, estas duas apresentaram respostas muito similares podendo ser facilmente confundidas entre si. Um estudo mais aprofundado sobre a influência da cobertura do solo e das formas de cobertura vegetal poderá trazer melhoria na acurácia das medidas de nível em rios de pequeno e médio porte.

Abreu e Maillard (2014) estudaram a variação de volume da represa de Três Marias, no Alto São Francisco. Os dados altimétricos radar foram comparados com os dados *in situ*, neste caso o erro médio quadrático foi de 0,24 metros, próximo ao encontrado em estudos similares (CALMANT *et al.*, 2006; DA SILVA *et al.*, 2010; MAILLARD & CALMANT, 2013). Além disso, Abreu e Maillard (2014) trabalharam com a relação entre cota, área do espelho d'água e volume da represa de Três Marias. A partir dessa relação foi proposto um modelo de três variáveis, onde a partir de um desses dados é possível inferir sobre os outros dois.

3. Perspectivas Futuras

O uso da altimetria radar possui uma série de vantagens para a hidrologia. A cobertura global torna possível realizar medidas em áreas de difícil acessibilidade, além de constituir um referencial comum na superfície terrestre. O tempo entre a aquisição e disponibilização dos dados é quase em tempo real permitindo monitoramento mais próximo aos eventos climáticos extremos. Por outro lado, uma das desvantagens relaciona-se a taxa de revisita (de 10 a 35 dias) dos satélites (ROSMORDUC, 2011), que é incompatível com o modelo tradicional de medições diárias; um problema que a capacidade de utilizar dados de várias missões promete reduzir em grande parte nos próximos anos. A incerteza é outro fator limitador a altimetria, uma vez que o erro das medições em águas continentais pode variar de poucos centímetros (nos melhores casos) a alguns metros (nos piores casos). Além dos avanços tecnológicos em sensores, são as pesquisas em técnicas de processamento que representam a melhores formas de aprimorar a acurácia das medições.

Devido a grande quantidade de missões presentes e futuras, a evolução dos sensores radar

e suas potencialidades de aplicação, a altimetria radar por satélite tende a tornar-se o futuro para os estudos de monitoramento de nível e vazão de rios. As missões previstas para os próximos anos (Sentinel-3, Jason-CS e SWOT) vão trazer melhorias significativas em todos os aspectos das aplicações hidrológicas da altimetria por satélite. Devido a maior resolução espacial dos sensores, o que poderá reduzir a contaminação dos dados por respostas vindas de áreas vizinhas aos corpos d'água, além da introdução de novos tipos de sensores, que tendem a ter uma maior precisão e acurácia na obtenção dos dados.

Conclusão

A utilização dos dados altimétricos obtidos por sensoriamento remoto já complementa os dados obtidos de forma tradicional (estações *in situ*), e permite obter dados em áreas de difícil acesso.

A maior parte dos estudos realizados em território brasileiro está relacionada à região amazônica. Isso ocorre pela possibilidade de utilização direta das técnicas e algoritmos já desenvolvidos para os estudos oceânicos. Os rios dessa região possuem larguras maiores ou compatíveis com o tamanho dos *footprint* dos sensores em modo LRM. Ademais, a quantidade de pontos sobrepostos a água são, na maioria dos casos, grande, o que permite gerar boas medições. Por outro lado, as aplicações fora do contexto amazônico são ainda escassas, devido às limitações impostas pelo porte dos rios (pequeno e médio) e também pela resolução espacial dos sensores embarcados nas missões atuais. O uso da altimetria para a medição do nível em rios de pequeno e médio porte é influenciado por diversos fatores, como a contaminação do sinal radar, respostas fora do nadir (*off-nadir*), baixa quantidade de pontos sobrepostos ao curso d'água, inexistência de técnicas e algoritmos próprios para lidar com a natureza desses rios, entre outros.

O aprofundamento nos estudos e técnicas de processamento de dados tende a oferecer medidas de nível com maior acurácia. Além disso, o lançamento de novas missões com sensores mais precisos e de tecnologia SAR e SARIN irá permitir a expansão das aplicações para outras regiões do Brasil. Com isso, é esperado que mais estudos sejam realizados fomentando a criação

de bases de dados mais robustas que ajudem a melhorar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, inclusive em áreas remotas.

Referências Bibliográficas

ABREU, L. G. A. C.; MAILLARD, P. A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in Brazil. In: **SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics**, p. 92391B-1 - 92391B-13, 2014.

BACKER, S., O., BOMBACI, C., ZELI, P., VENDITTI, O., ZANIFE, B., SOUSSI, J., DUMONT, J., STUM, M., MILAGRO PEREZ, e BENVENIST, J. **ENVISAT RA2/MWR Product Handbook**. 2007. 204p. Disponível em: <<http://wwwwcpq.mssl.ucl.ac.uk/RA2Handbook/concepts/ra2/ra2-mwr-PH.html>>. Acesso em: 02 Junho 2014.

BENETTI, A.; BIDONE, F. . O meio ambiente e os recursos hídricos. **Hidrologia: ciência e aplicação**, v. 2, p. 651-658, 1993.

BERGÉ-NGUYEN, M.; CAZENAVE, A.; LOMBARD, A.; LLOVEL, W; VIARRE, J.; CRETAUX, J.F.; Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 1, p. 1-13, 2008.

BERRY, P. A. M.; GARLICK, J. D.; FREEMAN, J. A.; MATHERS E. L. . Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, p. 1-4, 2005.

BIRKINSHAW, S. J.; O'DONNELL, G.; MOORE, P.; KILSBY C.; FOWLER, H.; BERRY, P. Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 26, p. 3811-3825, 2010.

BRONNER, E.; GUILLOT, A.; PICOT, N.; NOUBEL, J. . **SARAL/AltiKa products handbook**. Toulouse: CNES SALP-MU-M-OP-15984-CN, 2013. 77 p.

CALMANT, S.; SEYLER, F. . Continental surface waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1113-1122, 2006.

- CALMANT, S.; SEYLER, F.; CRETAUX, J. F. . Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 247-269, 2008.
- CHELTON, D. B.; WALSH, E. J.; MACARTHUR, J. L. Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry. **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v. 6, n. 3, p. 407-438, 1989.
- COSTI, A. C. Z. **Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica**. Dissertação de Mestrado. Brasília, Distrito Federal, 2012. 158 p.
- CRÉTAUX, J. F.; BIRKETT, C. . Lake studies from satellite radar altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1098-1112, 2006.
- CRÉTAUX, J. F.; JELINSKI, W.; CALMANT, S.; KOURAEV, A.; VUGLINSKI, V.; BERGÉ-NGUYEN, M.; GENNERO, M.-C.; NINO, F.; ABARCA DEL RIO, R.; CAZENAVE, A.; MAISONGRANDE, P. . SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. **Advances in space research**, v. 47, n. 9, p. 1497-1507, 2011.
- EATON, B.; GREGORY, J.; DRACH, B.; TAYLOR, K.; HANKING, S.; CARON, J.; PAMMENT, A. . **NetCDF Climate and Forecast (CF) metadata conventions**. 2003. 147 p.
- FENOGLIO-MARC, L.; DINARDO, S.; SCHARROO, R.; ROLAND, A.; SIKIRIC, M. D.; LUCAS, B.; WEISS, R. . The German Bight: A validation of CryoSat-2 altimeter data in SAR mode. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 11, p. 2641-2656, 2015.
- FRAPPART, F.; PAPA, F.; da SILVA, J. S.; RAMILLIEN, G.; PRIGENT, C.; SEYLER, F.; CALMANT, S. . Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 044010, 2012.
- FU, L. L.; LE TRAON, P. -Y. Satellite altimetry and ocean dynamics. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1063-1076, 2006.
- GARDINI, B.; GRAF, G.; RATIER, G. The instruments on ENVISAT. **Acta Astronautica**, v. 37, p. 301-311, 1995.
- GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M. -P.; CALMANT, S.; ROUX, E.; FILHO, O. C. R.; MANSUR, W. J.;. Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall–runoff modeling and spatial altimetry. **Journal of Hydrology**, v. 379, n. 3, p. 205-219, 2009.
- GETIRANA, A. C. V.; PETERS-LIDARD, C. Estimating water discharge from large radar altimetry datasets. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 923-933, 2013.
- GOVATSKI, C. A. H. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco-subprojeto 4.7: diagnóstico e proposta de complementação da rede hidrometeorológica da bacia do São Francisco**. Brasília: ANA. GEF/PNUMA/OEA, 2002.
- GLEICK, P. H.; AJAMI, N. . **The world's water volume 8: The biennial report on freshwater resources**. Island press, 2014. 478 p.
- HARVEY, K. D.; GRABS, W. (Eds.). **WMO Report of the GCOS/GTOS/HWRP Expert Meeting on the Implementation of a Global Studies**. Toronto, Canadá, 18-20 Novembro, 2003. 51 p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 598p.
- KOBLINSKY, C. J.; CLARKE, R. T.; BRENNER, A. C.; FREY, H. . Measurement of river level variations with satellite altimetry. **Water Resources Research**, v. 29, n. 6, p. 1839-1848, 1993.
- LEE, H. K. . **Radar altimetry methods for solid earth geodynamics studies**. Tese de Doutorado. The Ohio State University, 2008. 116 p.
- LEON, J. G.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; BONNET, M. -P, CAUHOPÉ, M.; FRAPPART, F.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P. . Rating curves and average water depth estimation at the upper Rio Negro from altimetric spatial data and calculated remote discharges. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 481-496, 2006.
- LUO, W.; YI, L.; YU, Z.; SUN, H.; YUAN, L. Barycenter reflected equatorial Pacific sea level structure evolution and its indication of ENSO events. **Oceanologia**, v. 57, n. 2, p. 107-115, 2015.

- MAILLARD, P.; CALMANT, S. . Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. In: **SPIE Remote Sensing**. International Society for Optics and Photonics, 2013. p. 88870W-88870W-14.
- MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. . New processing approaches on the retrieval of water levels in ENVISAT and SARAL radar altimetry over rivers: A case study of the São Francisco River, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 226-241, 2015.
- MCGOOGAN, J. T.; MILLER, L. S.; BROWN, G. S.; HAYNE, G. S. . The S-193 radar altimeter experiment. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 793-803, 1974.
- MICHAILOVSKY, C.I.; McENNIS, S.; BERRY, P.; SMITH, R.; BAUER-GOTTWEIN, P. . River monitoring from satellite radar altimetry in the Zambezi River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 2181-2192, 2012
- PAPA, F.; BALA, S. K.; PANDEY, R. K.; DURAND, F.; GOPALAKRISHNA, V. V.; RAHMAN, A; ROSSOW, W. B. . Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 117, n. C11, p. 1-13, 2012.
- de PAIVA, R. C. D. . Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.
- PARIS, A.; de PAIVA, R. C.; da SILVA, J. S.; MOREIRA, D. M.; CALMANT, S.; CARAMBOIS, P. A.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; SEYLER, F. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 3787-3814, 2016.
- PEREIRA, E. O.; MAILLARD, P. . The effect of land cover type on radar altimeter response and its influence on retracker algorithms. In: **SPIE Remote Sensing**. International Society for Optics and Photonics, p. 923905-923905-13, 2014.
- POSTEL, S.; REEVE, T.; McGUIGAN, C. . **Change the course: A new model of freshwater conservation and restoration**. Disponível em < <http://www.thesolutionsjournal.com/print/237223>>. Acesso: 10 abril 2016.
- RIDENOUR, L. N. (Ed.). **Radar system engineering**. Nova York, 1965. 748 p.
- RIČKO, M.; BIRKETT, C. M.; CARTON, J. A.; CRÉTAUX, J. F. . Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 061710-061710, 2012.
- ROCA, M.; LAXON, S.; ZELLI, C. . The ENVISAT RA-2 instrument design and tracking performance. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions online**, v. 47, n. 10, p. 3489-3506, 2009.
- ROSMORDUC, V.; BENVENISTE, J.; PICOT, N.; DORANDEU, J.; EARITH, D.; LAURET, O.; SICARD, P. . Basic Radar Altimetry Toolbox and radar Altimetry Tutorial: A New Set of Tools for All Altimetry Users. In: **ESA Special Publication**. 2006.
- ROSMORDUC, V. . **Radar altimetry tutorial**. J Benveniste e N. Picot Ed, 2011. 301 p.
- ROUX, E.; da SILVA, J. S.; GERITANA, A. C.; BONNET, M. P.; CALMANT, S.; MATINEZ, J. M.; SEYLER, F. . Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry—a comparative study. **Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 1, p. 104-120, 2010.
- SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BOSCH, W.; SEITZ, F. . DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 10, p. 4345-4364, 2015.
- da SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; FILHO, O. C. R.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W. J. . Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2160-2181, 2010.
- SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D. T. . Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science**, v. 277, n. 5334,

p. 1956-1962, 1997.

SULISTIOADI, Y. B. . **Satellite altimetry and hydrologic modeling of poorly-gauged tropical watershed**. Tese de Doutorado. The Ohio State University, 2013. 136 p.

TUCCI, C. E. M. I. . **Hidrologia: ciência e**

aplicação. Porto Alegre: Editora da , 2012. 943 p.

VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. (Ed.). **Coastal altimetry**. Springer Science & Business Media, 2011. 566 p.