

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

USO DE DADOS DE RADAR ALTIMÉTRICO DO SATÉLITE CRYOSAT PARA OBTENÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DO RIO SÃO FRANCISCO

Luana K. L. A. Martins¹; Philippe Maillard²; Eber J. A. Pinto³

RESUMO – A utilização de diferentes tipos de produtos de sensoriamento remoto em hidrologia já é uma realidade. A altimetria espacial é um desses produtos. Os radares altimétricos são equipamentos a bordo de missões espaciais que permitem a obtenção do nível de um ponto na superfície, especialmente nos oceanos ou gelo. O uso de dados de altimetria nos recursos hídricos continentais envolve desafios, como a frequência de passagem do satélite, o tratamento e processamento dos dados, especialmente para rios de porte menor. O satélite Cryosat foi lançado em 2010 e continua em operação, possuindo um ciclo de 369 dias e subciclos de cerca de 30 dias, o que o difere notoriamente das demais missões altimétricas. No presente trabalho apresenta-se um possível uso dos dados altimétricos do satélite Cryosat na obtenção do perfil do rio São Francisco. Os dados obtidos foram comparados aos dados da missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) e de algumas estações fluviométricas da ANA instaladas na calha do rio São Francisco, considerando o período de cheia e de seca. Os resultados demonstram o potencial de uso dos dados do Cryosat para obtenção de variáveis hidrológicas ao longo do curso d'água, graças à elevada resolução espacial deste satélite.

ABSTRACT– The use of different types of remote sensing products in Hydrology is already a reality, including the spatial altimetry data. Radar altimeters are instruments carried on space missions that allows to observe heights, especially in ocean or ice. The use of altimetry data on continental waters brings many challenges, such as the revisit frequency of satellite overpasses, data handling and processing, especially for medium size rivers. The Cryosat satellite was launched in 2010 and still work, has a 369-day cycle and 30-day subcycle, which may differ markedly from other altimetric missions. In this paper is showed a possible use of the altimetric data from Cryosat satellite to derive the profile of Sao Francisco river. The data were compared with the SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) and some ANA fluviometric stations located in São Francisco river, considering the flood and dry seasons. The results demonstrate the potential of using the Cryosat data to obtain hydrological variables along the watercourse, due to a high spatial resolution of this satellite.

Palavras-Chave – altimetria espacial, satélite Cryosat, rio São Francisco

¹ CPRM – Av. Brasil 1731, Funcionários-Belo Horizonte/MG. CEP 30.140-002. Tel: 3878-0307 luana.martins@cprm.gov.br;

² Instituto de Geociências - UFMG-Av. Antônio Carlos 6627- Belo Horizonte/MG CEP 31.270-901 philippermaillard@yahoo.com.br;

³ CPRM – Av. Brasil 1731, Funcionários-Belo Horizonte/MG .CEP 30.140-002. Tel: 3878-0307 eber.andrade@cprm.gov.br;

INTRODUÇÃO

A altimetria por satélite radar é uma das inúmeras informações que pode ser gerada via sensoriamento remoto e teve início com foco na obtenção dos níveis dos oceanos, calotas polares e gelo de mar, e ainda é hoje o objetivo principal do lançamento dessas missões. Contudo, a acurácia dos dados altimétricos averiguada em missões mais recentes e os resultados convincentes obtidos em estudos anteriores sugerem que estes dados podem ser empregados em análises hidrológicas e hidráulicas (TARPANELLI, 2013).

Grande parte dos esforços tem sido direcionada a estudos dos grandes sistemas hídricos, majoritariamente a Bacia Amazônica, que se tornou um verdadeiro celeiro de modelos hidrológicos para grandes bacias e validação de dados de sensoriamento remoto. Num primeiro momento é natural que ocorra esse direcionamento, em consequência da importância desses grandes sistemas fluviais, assim como pela falta de conhecimento a cerca de sua dinâmica. O emprego de dados de altimetria espacial em cursos d'água de menor porte constitui um desafio e é um ramo pouco explorado da Hidrologia espacial, sendo que esta por si só constitui uma parte muito recente na história da Hidrologia.

Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar a utilização de dados de altímetro radar num curso d'água de médio porte (em termos de largura de seção transversal). O curso d'água escolhido foi o rio São Francisco que pode ser considerado um rio de médio porte em termos de largura de seção transversal (100 a 1000m de largura) na maior parte de sua extensão.

A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento do radar altimétrico do CryoSat-2, que se aplica também a outras missões. Os radares altimétricos emitem impulsos em direção ao nadir e captam o eco refletido pela superfície (solo, gelo ou água). A análise do eco (ou forma de onda) permite extrair uma medida muito precisa do tempo de trajeto entre o satélite e a superfície. Considerando-se a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas emitidas, o tempo de trajeto é transformado em distância. Essa distância é subtraída da altura do satélite e então se obtém o nível da superfície relativa ao elipsóide de referência. Na sequência o dado obtido é corrigido considerando fatores tais como a propagação da onda eletromagnética através da atmosfera e ionosfera e a maré terrestre.

Dentre as vantagens do emprego dos dados de nível obtidos por satélite radar vale destacar a economia de gastos de aquisição e instalação de novos equipamentos, bem como dos custos operacionais de leituras diárias ou deslocamento de equipes para realização de medições e manutenções, sendo que em alguns locais o acesso é extremamente complicado e perigoso ou até mesmo inviável. Outro ponto diferencial é o fato de que as estações *in situ* são niveladas utilizando

uma referência local, já as informações obtidas com satélite fornecem dados altimétricos com referência a um sistema único e global de elipsóides, tal como o WGS84. Tal fato viabiliza o cálculo da declividade da linha d'água entre pontos de um curso d'água (Getirana, 2009; Leon *et al.*, 2006).

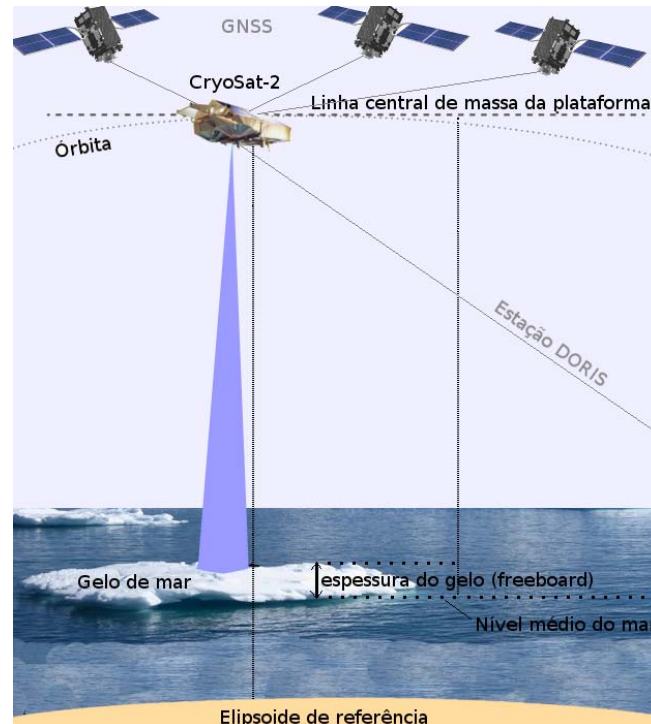


Figura 1 – Princípio de funcionamento dos radares altimétricos

Os satélites sobrevoam o mesmo traço em intervalos fixos chamados tempo de revisita, tipicamente entre 10 a 35 dias. Assim, a frequência de obtenção dos dados de altimetria espacial pode ser apontada como uma desvantagem em comparação aos dados de leitura diária às 7h e 17h realizada por observadores da Rede Hidrometeorológica Nacional. Outro ponto a ser considerado é a precisão dos níveis d'água obtidos pelo altímetro, que mesmo com a evolução destes instrumentos ainda está na ordem de decímetros (Maillard, 2015; Jiang, 2017; Sichangi, 2018).

Os erros nas medidas de nível d'água obtidas pelo altímetro decorrem de vários fatores. O primeiro deles é que devido a distância entre as medições do satélite podem não ser capturados pontos diretamente sobre a superfície da água, por exemplo para o Envisat a distância entre medições é de 350m e para o Cryosat cerca de 320m na região do rio São Francisco operando no modo de baixa resolução. Conforme Maillard (2015) há ainda fatores que podem dificultar a obtenção de dados pelo altímetro tais como sinuosidade do curso d'água, classe de cobertura do solo e topografia nas margens.

Comparar a precisão e a resolução temporal dos dados altimétricos obtidos por satélite aos dados das estações *in situ* pode soar desanimador, entretanto os ganhos com a resolução espacial e referência altimétrica global dos dados permitem obtenção de informações inviáveis para a rede de

monitoramento *in situ* e que demandariam campanhas de campo dispendiosas. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar um potencial uso dos dados altimétricos de satélite para obtenção do perfil longitudinal, que é um dado importante de caracterização do curso d'água e pode permitir o cálculo da declividade da linha d'água de um dado trecho, informação esta essencial para modelagem hidráulica por exemplo. Ademais, o perfil do rio São Francisco se mostrou interessante para análise de qualidade dos dados de radar altimétrico devido a sua extensão longitudinal de mais de 2000km e a existência de lagos extensos e desníveis significativos em decorrência das barragens dos aproveitamentos hidrelétricos instalados em seu leito. A bacia do rio São Francisco ocupa uma área de 639.219km², correspondente a 7,5% do território nacional e abrange as mais variadas características fisiográficas e climáticas, carregando para região semiárida do país um volume significativo de água (CBH SÃO FRANCISCO, 2019).

O satélite escolhido foi o Cryosat devido a grande quantidade de dados de nível propiciada por esta missão. O primeiro satélite Cryosat foi perdido numa falha no foguete durante seu lançamento em Outubro de 2005. O segundo satélite Cryosat foi lançado em 08/04/2010 e opera ainda hoje, com objetivo central de observação dos polos e monitoramento da espessura de camadas de gelo continental e marítimo (*freeboard*). Seu altímetro intitulado Sival opera na banda-Ku (1,67-2,40cm) em três modos diferentes: baixa resolução (LRM- low resolution mode, altímetro nadir com operação limitada por pulso convencional), modo SAR (Synthetic Aperture Radar - radar de abertura sintética) que utiliza os princípios do efeito doppler para melhorar a resolução longitudinal dos dados e o modo SARin (modo SAR interferométrico), que além do efeito doppler utiliza um segundo canal de recepção para cálculo do ângulo de chegada do eco que retorna para o satélite. Além da operação em modo SAR outro diferencial do Cryosat é sua densa cobertura espacial propiciada pela inclinação de 92° com um ciclo “quase” repetitivo de 369 dias e subciclos de cerca de 30 dias (Aviso, 2019; Parrinello, 2018). A cada subciclo a órbita deriva 30 km para Oeste até ser reiniciado um novo ciclo de 369 dias quando então os subciclos serão repetidos e, conseqüentemente os traços (variando numa faixa de 500 m a 2 km de um ciclo para outro, sendo tipicamente de 1 km para a área de estudo).

Na Figura 2 é possível visualizar os traços do Cryosat que interceptam o rio São Francisco para os três primeiros subciclos, pois a imagem ficaria ilegível acrescentando todos os 13 subciclos. Apesar do elevado tempo de revisita (369 dias), as configurações de ciclo e subciclos do Cryosat propiciam uma densa cobertura espacial, gerando um volume significativo de dados de nível do curso d'água em diferentes pontos e datas. Apesar de os dados serem obtidos em dias diferentes, a informação gerada tem grande valor, sobretudo em cursos d'água cuja alteração de nível tem amplitude limitada.

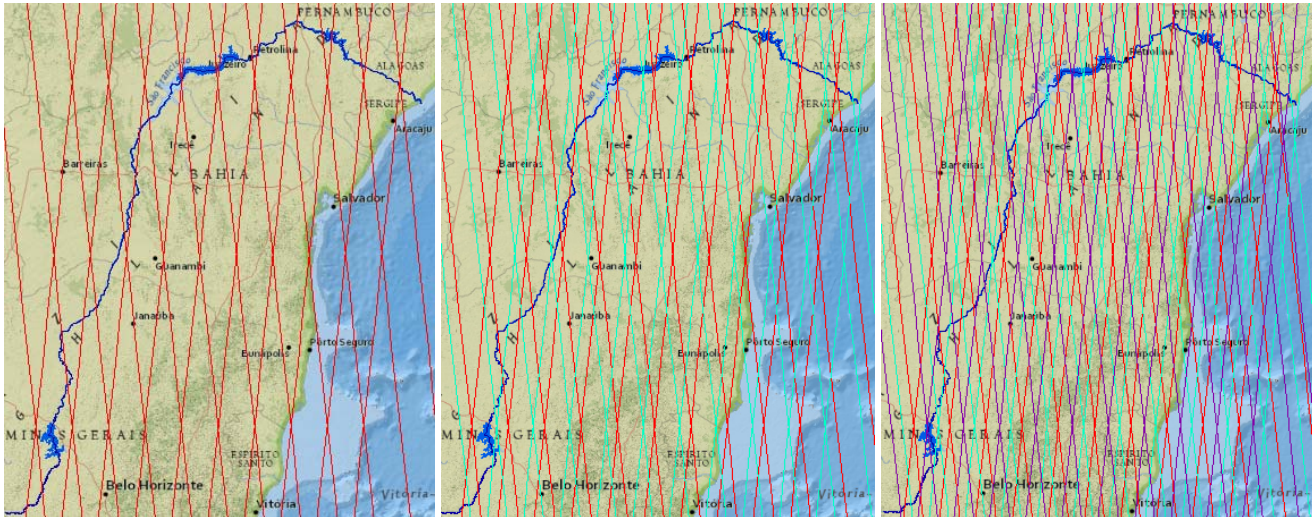


Figura 2 – Traços do Cryosat para os ciclos 1 (vermelho), 2 (verde) e 3 (roxo)

METODOLOGIA

Os dados do Cryosat foram obtidos do banco de dados da Agência Espacial Européia (ESA) e foram processados no software SWG – Satellite Water Gauging para obtenção dos níveis do rio São Francisco nos pontos de cruzamento dos trackers. O período de dados compreendeu o período de out/2010 a fev/2017 e o trecho do rio São Francisco que vai do Reservatório de Três Marias a sua foz, totalizando cerca de 2000 km de extensão. Para cada ciclo completo do Cryosat há cerca de 340 cruzamentos potenciais de traços nominais com rio São Francisco, sendo que após o processamento foram encontrados 250 traços que geraram informação válida. Comparativamente menciona-se o satélite Sentinel 3-A, que opera desde 2016, possui tempo de revisita de 27 dias e apenas 30 pontos de cruzamento com o Rio São Francisco.

O SWG é uma ferramenta de código aberto com três opções de metodologia de processamento de dados de altimetria por satélite para obtenção do nível de água, permitindo a criação de estações hidrológicas virtuais (VHS), baseado nos trackers dos satélites e polígonos de cursos d'água, ambos inseridos como shapefiles (Maillard, 2017). Devido a grande quantidade de dados o processamento foi feito utilizando a opção 'Create multiple VHS', conforme Figura 3.

Para uma comparação inicial toda a série de dados do Cryosat gerada foi plotada junto com o perfil do rio obtido a partir dos dados da missão SRTM e processado através da opção 'Process river profile with SRTM' do SWG.

Posteriormente, os dados gerados foram separados em período seco (Abril a Setembro) e chuvoso (Outubro a Março) e plotados com os dados das estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas), operadas pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) situadas na calha do São Francisco. A análise se limitou as estações que constam na Tabela 1, para as quais

há nivelamento altimétrico, possibilitando assim a comparação dos níveis monitorados com os níveis do satélite referenciados no elipsoide (WGS84).

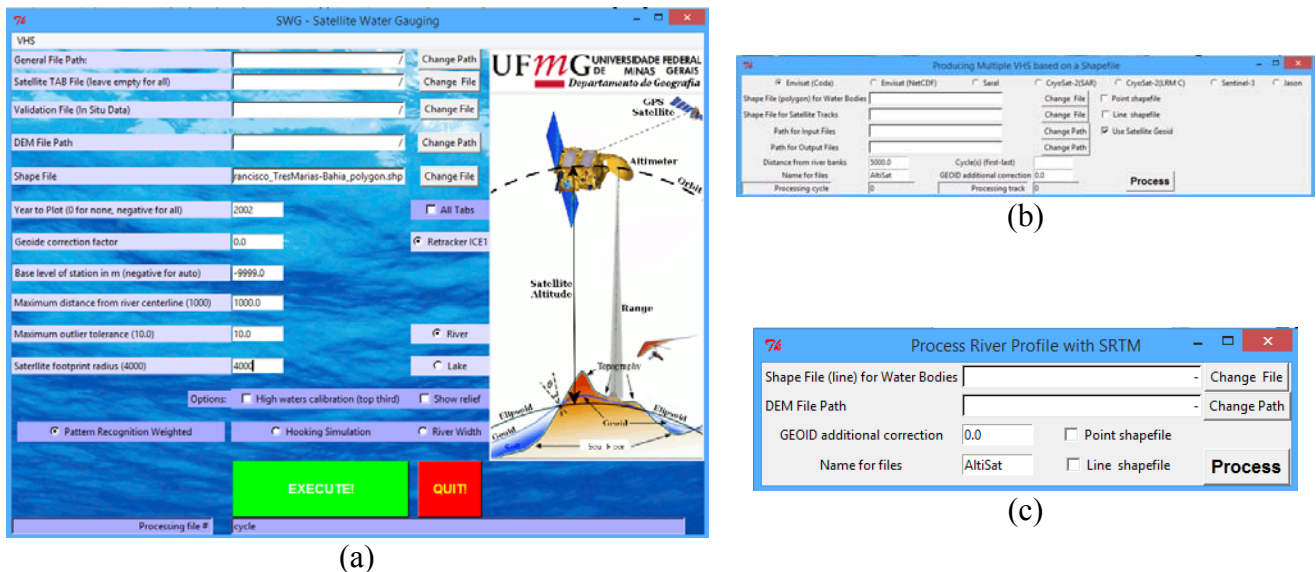


Figura 3 – (a) Interface do SWG e telas de (b) criação de múltiplas estações e (c) perfil do rio com SRTM

Tabela 1 – Níveis médios das estações fluviométricas utilizadas na comparação com dados Cryosat, período de out/2010 a fev/2017

Dados da estação		Níveis médios no período (m)		Diferença entre período seco e chuvoso (m)
Nome estação	Código	Período seco	Período chuvoso	
Pirapora	41135000	471,14	471,29	0,15
Cachoeira da Manteiga	42200000	449,50	450,54	1,04
São Romão	43200000	446,25	447,15	0,90
São Francisco	44200000	440,44	441,53	1,09
Pedra Maria Cruz	44290002	433,74	434,93	1,19
Manga	44500000	422,43	423,55	1,12

RESULTADOS

A série obtida com os dados do Cryosat se estendeu do dia 24/10/2010 a 28/02/2017, totalizando 2843 dados de nível em diferentes pontos de cruzamento no rio São Francisco. A Figura 4(a) apresenta a análise quantitativa de dados que apresentaram erro nas informações de coordenadas e/ou altitude, bem como outliers extremos (diferença maior que 100m do SRTM) identificados visualmente no gráfico na região do reservatório de Três Marias. Foram obtidas altitudes negativas de até 9.8m para pontos na região da foz, onde há interferência dos ventos (provocando ondas que modificam a resposta especular da água calma) e marés que podem comprometer o eco recebido pelo altímetro. De maneira semelhante acredita-se que os outliers no reservatório de Três Marias possam ser em decorrência dos ventos no espelho d'água do

reservatório. Já os erros nas coordenadas podem ser decorrentes de informações faltantes do arquivo de dados do satélite, o que compromete o processamento pelo SWG.

Os dados com os erros acima descritos foram removidos resultando numa série de 2661 dados consistidos, ou seja, 93,6% de aproveitamento dos dados. Procedeu-se também a uma análise da disponibilidade temporal dos dados do Cryosat, sendo o resultado resumido na Figura 4(b). Nota-se que para o período de aproximadamente 76 meses, em 53% dos dias o Cryosat cruzou o São Francisco. Analisando as sequências de dias sem dados, observa-se que ocorreu com maior frequência a passagem do Cryosat a cada dois dias, em pelo menos um ponto do rio São Francisco. Percebe-se que de maneira cíclica há uma sequência de 24 a 28 dias de falha nos dados, que coincide com o final dos ciclos de 369 dias do Cryosat, geralmente no mês de janeiro.

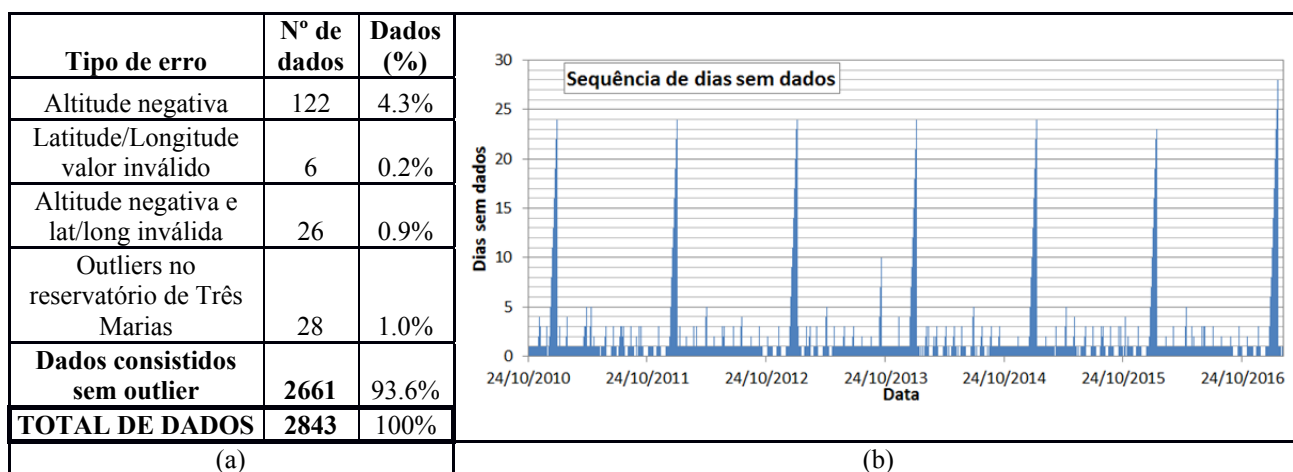


Figura 4 – Análise dos dados do Cryosat: (a) tipos de erros identificados e (b) sequência de dias sem dados

A Figura 5 apresenta o perfil longitudinal obtido considerando toda a série de dados consistidos do Cryosat e os dados da missão SRTM. De maneira geral, tanto com os dados do SRTM quanto do Cryosat é possível identificar a localização dos reservatórios ao longo do rio São Francisco, sobretudo o de Três Marias e Itaparica (conhecido como Luiz Gonzaga). Na maior parte do perfil os dados do Cryosat estão abaixo dos obtidos pelo SRTM, contudo a partir da região do reservatório de Itaparica e Complexo Paulo Afonso até a foz, os dados do Cryosat estão acima do SRTM. Tal alteração pode ser em decorrência da topografia e cobertura vegetal das margens neste trecho do rio São Francisco, sobretudo considerando que no Brasil (exceto Pantanal e Amazônia) o Cryosat opera no modo de baixa resolução. Conforme descrito por Maillard *et al* (2015), fatores ambientais como sinuosidade do curso d'água, classe de cobertura do solo e topografia nas margens, podem comprometer a obtenção dos dados pelo altímetro sendo por vezes mais limitantes que a largura do rio.

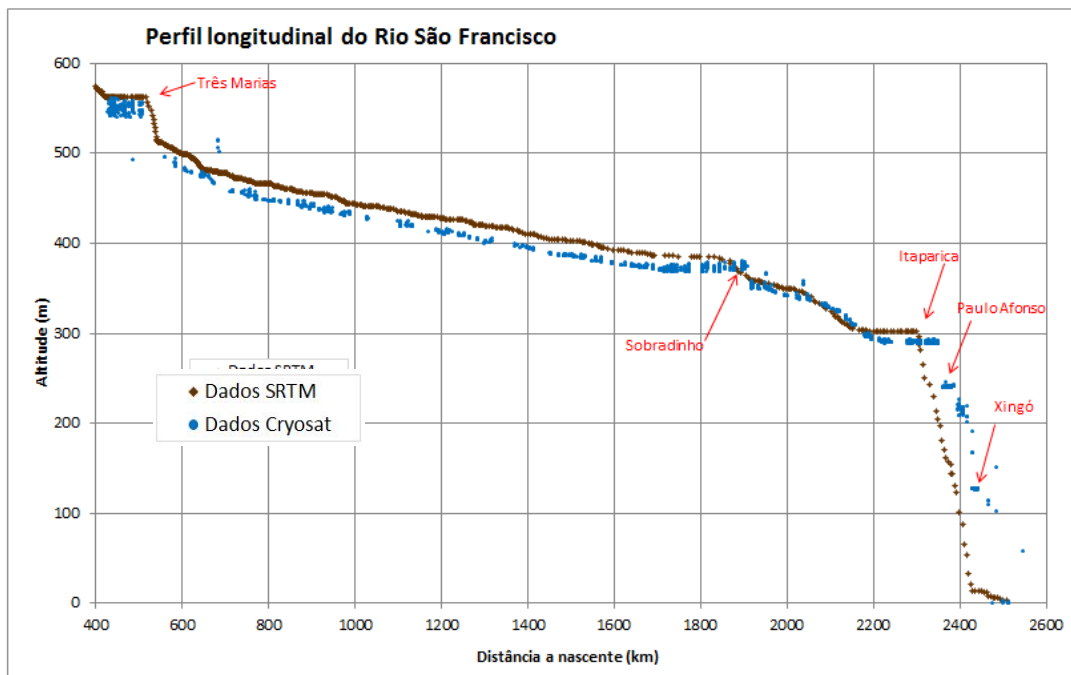


Figura 5 – Perfil longitudinal do rio São Francisco com dados do Cryosat e do SRTM

A Figura 6 apresenta a comparação dos dados do Cryosat com os dados obtidos para as estações *in situ* no período da cheia e a Figura 7 da seca. Em ambas as figuras os dados do Cryosat se aproximaram dos valores médios dos níveis nas estações, não havendo uma distinção significativa entre o período seco e chuvoso. Em decorrência da regularização promovida pelo reservatório de Três Marias a diferença dos níveis médios nas estações a jusante para seca e cheia não é significativa, conforme Tabela 1 acima. Conforme dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA, o reservatório de Três Marias apresentou nível médio de 561,3m, mínimo de 550,3m e máximo de 572,3m no período analisado. Os dados do Cryosat oscilaram de 540,2m a 562,8m na região do reservatório (desconsiderando alguns outliers) demonstrando uma tendência de subestimar o nível do mesmo. Observando os dados do Cryosat nas proximidades das estações fluviométricas foi encontrada a mesma tendência de subestimar os dados em relação às estações fluviométricas. Para obtenção da raiz do erro médio quadrático - REMQ (ou RMSE em inglês) foram adotados como referência para uma dada estação os dados do Cryosat de até 30 km a montante e 30km a jusante das estações fluviométricas, exceto para aquelas estações em que numa distância menor havia uma alteração significativa da seção transversal, como em Pirapora, onde cerca de 5 km a jusante da estação há um trecho de quedas e corredeiras. O REMQ inicial foi de 9,82m e após remoção do viés da série Cryosat de cada estação o REMQ passou para 1,55m.

Ressalta-se que o REMQ encontrado em relação às estações *in situ* não necessariamente reflete um erro no dado do satélite, já que a passagem do satélite não acontece na mesma seção transversal que as réguas limimétricas. Para satélites que possuem tempo de revisita curtos num

mesmo local o ideal é realizar o nivelamento da seção do rio em que o satélite passa (conhecida como estação virtual) visando comparação direta e adequada aos dados das estações da ANA. Mas no caso do Cryosat, o tempo de revisita de 369 dias e o elevado número de cruzamentos inviabiliza este trabalho, mas por outro lado a grande quantidade de dados permite cálculo de declividades que poderão ser comparadas a levantamentos de linha d'água realizados no rio São Francisco.

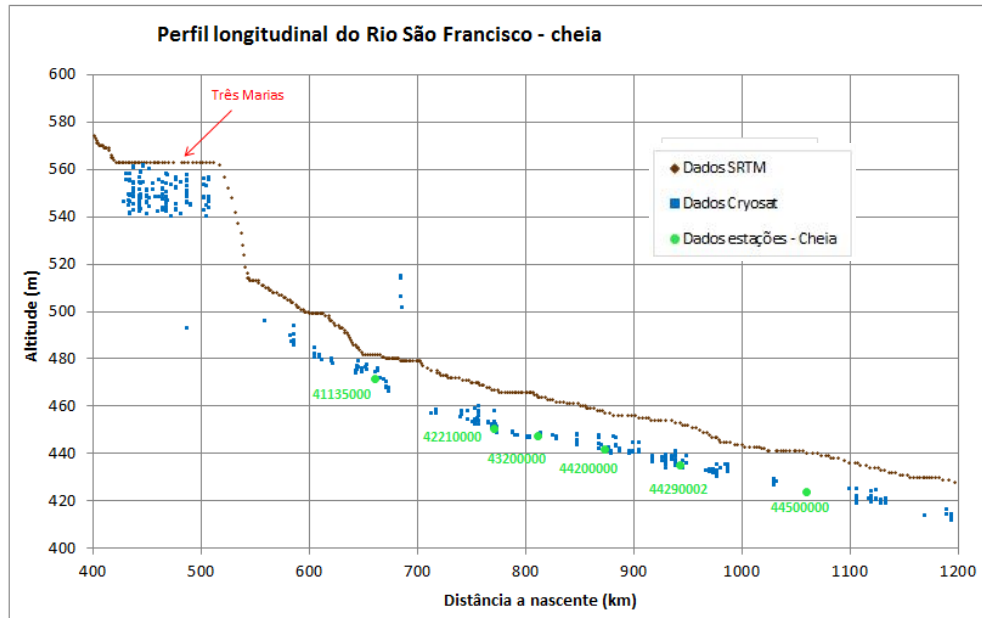


Figura 6 – Dados do Cryosat, SRTM e das estações in situ para o período de cheia

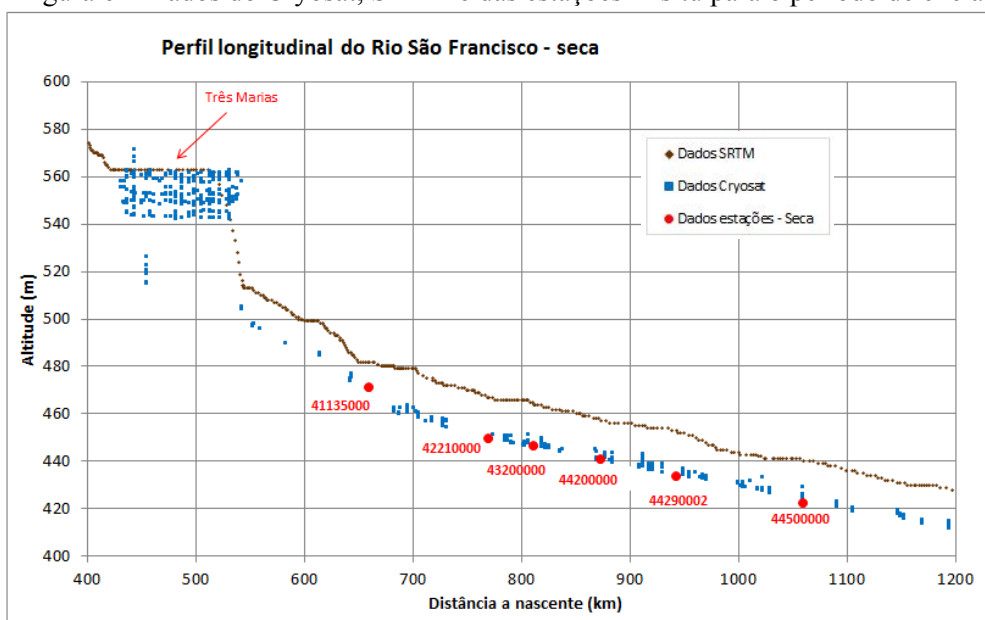


Figura 7 – Dados do Cryosat, SRTM e das estações in situ para o período de seca

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há inúmeras possibilidades de uso dos dados de satélite na Hidrologia. Conforme descrito por Calmant e Seyler (2006), ainda que as missões espaciais não tenham sido lançadas com objetivo principal em Hidrologia, a altimetria de satélite forneceu ao longo das últimas décadas uma série de dados que podem ser utilizados para geração de produtos hidrológicos. Contudo, grande parte dos esforços tem sido direcionada a estudos dos grandes sistemas hídricos, majoritariamente a Bacia Amazônica. Assim, permanece o desafio de utilização de dados de altimetria espacial em cursos d'água de porte médio como o Rio São Francisco.

O satélite Cryosat possui ciclo de 369 dias, mas os subciclos de 30 dias permitem aplicação dos dados de altimetria na estimativa de variáveis hidrológicas ao longo dos cursos d'água, demandando interpolação espacial e temporal. A declividade da linha d'água é uma das variáveis hidrológicas essenciais para modelagem hidrológica e hidráulica e de difícil obtenção, demandando extensos levantamentos em campo haja vista que os dados disponibilizados pelas instituições que realizam monitoramento não permitem uma estimativa, por terem referência local.

Os erros e desvios aqui identificados, tal como a tendência a subestimar os níveis do reservatório de Três Marias, devem ser mais profundamente analisados, pois caso se trate de um erro sistemático, por exemplo, o dado pode ser ajustado e mais amplamente utilizado. Ademais, melhores estimativas do erro do satélite poderão ser fornecidas em trabalhos futuros de cálculo de declividade a partir dos dados do Cryosat, por trechos do rio São Francisco, e comparando-os a levantamentos de linha d'água realizados em campo para um mesmo período.

REFERÊNCIAS

- ANA- Hydroweb – Séries históricas. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>> Acesso em: abr. 2019.
- AVISO - Archiving, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques. (2016). Missions. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions.html>> Acesso em: mai. 2019
- CALMANT, S. and SEYLER, F. (2006). Continental surface water from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences* 338(14-15):1113-1122, 2006.
- CBH São Francisco. A bacia. Disponível em< <http://cbhsaofrancisco.org.br>>. Acesso em abr. 2019
- GETIRANA, A. C. V.. Contribuições da Altimetria Espacial à Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias na Amazônia. 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- JIANG L.; NIELSEN K.; ANDERSEN O. B.; BAUER-GOTTWEINA P.. CryoSat-2 radar altimetry for monitoring freshwater resources of China. *Remote Sensing of Environment* 200, p. 125–139, 2017.
- LEON, J. G., CALMANT, S., SEYLER, F., BONNET, M. P., CAUHOPÉ, M., FRAPPART, F., FILIZOLA, N., FRAIZY, P. (2006). Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and model discharges. *J. Hydrol.*, 328 (3-4), 481-496.
- 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*. 156 p. 226-241. 2015
- MAILLARD, P.; PEREIRA, E. O. Uma ferramenta para processar dados de altimetria por satélites para aplicações em Hidrologia. 2017. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC.
- PARRINELO, T.; SHEPHERD, J.; BOUFFARD, S.B.; CASAL, T.; DAVIDSON, M.; FORNARI, M.; MAESTRONI, E.; SCAGLIOLA, M.. CryoSat:ESA's ice mission.Eight years in space. *Advances in Space Research*. 62 p.1178–1190, 2018.
- SICHANGI, A. W.; WANG L.;HU Z. Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: an initial study over the Yangtze river. *Remote Sens*. 10, p. 1385-1406, 2018.
- TARPANELLI, A.;SILVA,B.;BROCCA, L.; MORAMARCO, T.. River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling. *Remote Sens*. 5, p.4145-4162, 2013.