

## EXTRAÇÃO DE EXTENSÕES DE CORPOS D'ÁGUA INTERIORES AMAZÔNICOS ENTRE OS ANOS 2017 E 2022

*Fellipe Lousada Pegolo*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), [fellipe.pegolo@inpe.br](mailto:fellipe.pegolo@inpe.br)

### RESUMO

Geralmente as imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) não são fortemente impactadas por condições atmosféricas, como nuvens, névoa, aerossóis e fumaça. Portanto, aumentam o imageamento efetivo de regiões com alta ocorrência de nuvens, como os sistemas aquáticos da Amazônia. Este artigo descreve um protótipo do algoritmo Sentinel-1 Amazon Water Mask (SIWMA) baseado em processamento em nuvem que mapeia a extensão de águas abertas dos sistemas aquáticos da Amazônia e quantifica a sua superfície a cada 12 dias ao longo da série temporal de imagens S1 de 2017 a 2021. O protótipo foi desenvolvido para o Lago Grande de Curuai (LGC), localizado no Baixo Amazonas (Pará), para fornecer informações relevantes para i) hidrologia, ii) biogeoquímica, iii) geomorfologia, iv) biodiversidade e v) segurança hídrica local. O SIWMA cria máscaras de água de alta resolução espacial (10 metros/pixel), que são derivadas dos coeficientes de retroespalhamento nas polarizações VV e VH do satélite SAR Sentinel-1 (S1).

**Palavras-chave** — SAR, Sentinel-1, Amazônia, recursos hídricos.

### ABSTRACT

*Synthetic Aperture Radar (SAR) images are generally not heavily impacted by atmospheric conditions such as clouds, mists, aerosols and smoke. Therefore, they increase the effective imaging of regions with a high occurrence of clouds, such as the aquatic systems of the Amazon. This paper describes a prototype of the Sentinel-1 Amazon Water Mask (SIWMA) algorithm based on cloud processing that maps the open water extent of Amazonian aquatic systems and quantifies its surface every 12 days over the time series of S1 images. from 2017 to 2021. The prototype was developed for Lago Grande de Curuai (LGC), located in Low Amazonas (Pará), to provide information relevant to i) hydrology, ii) biogeochemistry, iii) geomorphology, iv) biodiversity and v) safety local water supply. SIWMA creates high spatial resolution water masks (10 meters/pixel), which are derived from the backscatter coefficients in the VV and VH polarizations of the SAR Sentinel-1 (S1) satellite.*

**Key words** — SAR, Sentinel-1, Amazon, water resources.

### 1. INTRODUÇÃO

As sazonalidade hidrológica das planícies de inundações amazônicas modulam a dinâmica de seu uso e ocupação e consequentemente a interação entre os ecossistemas e as atividades sócio-econômicas. Torna-se cada vez mais necessário e urgente ampliar o conhecimento sobre a hidrodinâmica das várzeas em tempos de eventos climáticos extremos de secas e de inundações, [1]. A coleta de dados hidrológicos em campo relacionados à extensão de corpos d'água aberta exigiria a implantação e a manutenção de equipamentos, tais como pluviômetros, ecossondas, equipes de campo, amplo trabalho de modelagem, e ainda assim, seria uma missão impossível em bacias extensas como a Amazônica e sujeitas a grande variabilidade inter e intra-anual das superfícies de água. Este cenário faz com que a obtenção destes dados seja onerosa, tanto do ponto de vista logístico quanto econômico [2], o que resulta na pequena disponibilidade de informações espaciais com alta frequência temporal; o que pode converter-se, em maiores incertezas em modelos de previsões de áreas inundadas e em cálculos de balanço hídrico da bacia amazônica [3, 4].

O sensoriamento remoto SAR orbital permite preencher parcialmente tal lacuna de informações ao fornecer dados sobre a superfície ocupada por águas abertas ao longo dos anos [5], as quais podem ser usadas para se obter outros parâmetros hidráulicos e geométricos, tais como a altura da lâmina d'água e o volume de corpos hídricos. As extensões das massas d'água obtidas por imagens SAR geralmente apresentam alto nível de detalhamento espaço-temporal, servindo como dados complementares àqueles obtidos por métodos batimétricos, ópticos (bandas e índices espectrais), e altimétricos (DEM).

Atualmente, a banda-C é a mais utilizada devido à disponibilidade gratuita de dados da missão Sentinel-1 [6]. De modo geral na banda C, a interação das micro-ondas com superfícies “lisas”, (águas calmas, florações de algas, derramamento de óleo, dentre outras [7]), resultam em espalhamento do tipo especular, que direciona o pulso incidente para fora do campo de detecção do sensor (áreas de baixo retroespalhamento “áreas escuras” (Figuras 1c e 1d) [8]. Alvos “rugosos” em relação à banda C (águas agitadas, solo exposto, vegetação herbácea e arbórea) provocam espalhamentos superficial, volumétrico e de reflexão de canto (double bounce), dispostos respectivamente, em ordem crescente de intensidade de coeficiente de retroespalhamento (áreas de médio à alto retroespalhamento) “área claras” (Figuras 1c e 1d) de maior intensidade de sinal [9].

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo é o Lago Grande de Curuai (LGC), localizado ao sul do município de Óbidos (Figura 1a). Situada no estado do Pará, Brasil, na planície de inundação do Baixo Rio Amazonas, formada por grandes lagos rasos de água rica em sedimento, a chamada “água branca” [10], cujo nível médio oscila entre 5 e 7 metros ao longo do ano [11]. Essa região é caracterizada por fortes ventos, intensas correntes fluviais, e pela formação de extensos bancos de macrófitas emergentes na seca, outubro/dezembro (Figura 1c); e pela ocorrência em menor proporção de macrófitas flutuantes na cheia maio/junho (Figura 1b) [11].

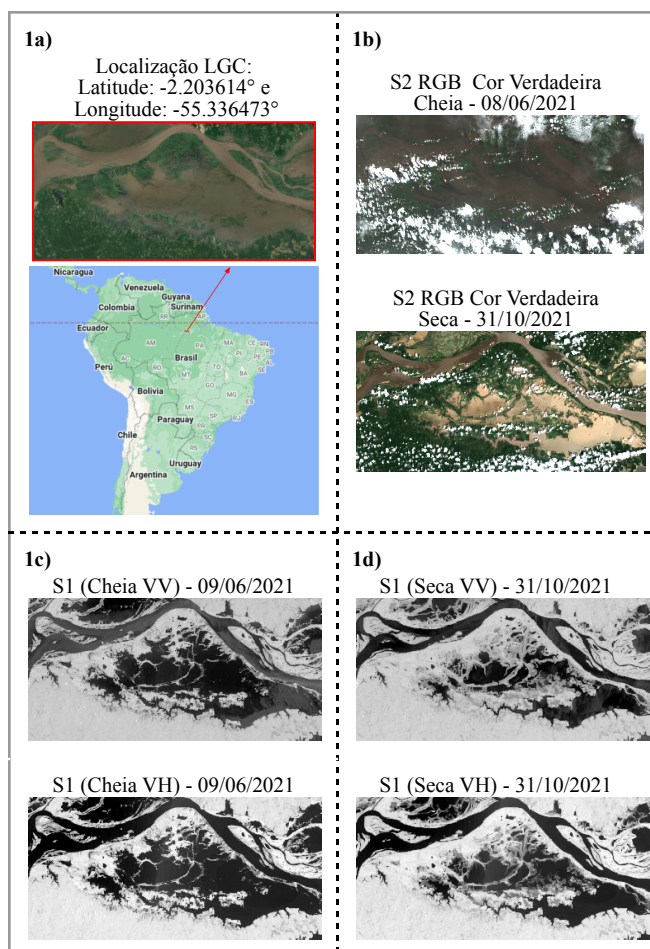


Figura 1. Localização e Imagens S1 e S2 do LGC

Dentre as principais técnicas de extração de corpos d'água de planícies com dados SAR, estão: Critérios automáticos e manuais de limiarização de coeficientes de retroespalhamento em diferentes polarizações [12]; e Uso de modelos baseados em Inteligência Artificial (Machine Learning, Deep Learning e Redes Neurais) [13, 14].

Na ferramenta S1AWM foi empregada a técnica de limiarização, a qual foi implementada no Google Earth Engine (GEE), que é um meio computacional de

processamento em nuvem. O GEE permite a análise de grandes volumes de dados geospaciais, detecção de mudanças e mapeamento de tendências e tem sido amplamente utilizado pela comunidade científica [15].

Foram utilizadas imagens SAR Sentinel-1 (S1) de coeficientes de retroespalhamento (sigma zero) nas polarizações VV e VH; e as ópticas (bandas: vermelho, verde e azul) do Sentinel-2 (S2) presentes no catálogo GEE. As imagens S1 VV e VH de coeficientes de retroespalhamento (intensidade) estão na escala decibel (dB), e são radiometricamente calibradas, ortocorrigidas, e isentas de ruídos dos tipos borda e termal; permanecendo apenas o ruído *speckle* (inerente ao imageamento SAR), que é removido pelo algoritmo S1AWM, por meio do filtro *Kernel* circular de 50 metros [16]. Os dados ópticos S2 são disponibilizados em reflectância de superfície. Todas as imagens S1 e S2 possuem resolução espacial de 10 metros.

Após a remoção de ruído, as imagens SAR S1 foram submetidas a testes para a definição empírica de limiares de intensidade de retroespalhamento de discriminação entre superfície de água aberta e alvos classificados como “não água aberta” a partir da análise dos histogramas das imagens VV e VH. Para definir os limiares SAR ótimos foram utilizadas imagens coloridas (Cor Verdadeira) S2, defasadas em até 1 dia, com o intuito de identificar visualmente os limiares que melhor reproduzem os limites entre água aberta e não-água aberta. Essa análise foi realizada para imagens VV e VH de cheia e seca respectivamente dos anos de: 2017 (25/05 e 28/10), 2018 (13/06 e 23/10), 2019 (20/06 e 11/11), 2020 (14/06 e 11/12) e 2021 (09/06 e 31/10). A hipótese deste trabalho é de que a ferramenta S1AWM permite o mapeamento de corpos d'água aberta preciso com alta frequência temporal (12 dias). Depois de definidos esses limiares e validada sua adequação às diferentes datas, eles foram aplicados à todas as imagens SAR S1 (VV e VH) disponíveis (172) entre os anos de 2017 e 2022: 2017 (26), 2018 (34), 2019 (30), 2020 (29), 2021 (30) e 2022 (23).

## 3. RESULTADOS

Os limiares **-15 (VV)** e **-25 (VH) dB** mostraram-se adequados para gerar máscaras d'água S1 dos anos: 2017 (25/05 e 28/10), 2018 (13/06 e 23/10), 2019 (20/06 e 11/11), 2020 14/06 e 11/12) e 2021 (09/06 e 31/10), uma vez que apresentam correspondência espacial com as imagens S2 (Cor Verdadeira), defasadas em até 1 dia.

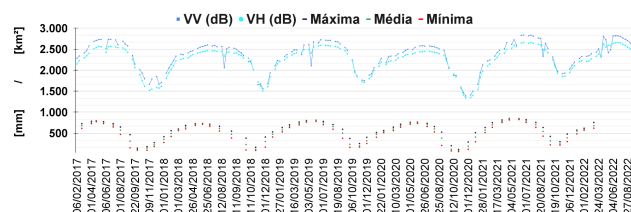


Figura 2. Extensão de águas superficiais do LGC (km<sup>2</sup>) S1 VV e VH e dados fluviométricos (ANA) entre os anos 2017 e 2022.

A partir das limiarizações foi possível i) gerar as máscaras de água aberta do LGC, ii) computar suas áreas (Figura 2), e iii) constatar que os maiores valores de extensões são registrados pela polarização VV, o que possivelmente pode estar relacionado à maior sensibilidade desta polarização em distinguir entre áreas de águas abertas e “não água aberta” (solo exposto e estruturas vegetais), em relação à VH.

Por meio da visualização das imagens SAR foi possível constatar que a polarização VV sofreu maior interferência das nuvens carregadas do LGC no período da cheia, o que fez com que houvesse a “diminuição” momentânea da extensão de águas superficiais, indicadas pelos vales locais. As nuvens densas e/ou eventos de precipitação atenuam o sinal emitido pelo sensor SAR S1, já que a água não permite a penetração da energia eletromagnética na faixa das microondas [17], fazendo com grande parte do sinal retorne ao sensor, “áreas claras” (alto valor de coeficiente de retroespalhamento), localizadas predominantemente sobre as águas abertas (Figuras 3a e 3b).

Na Tabela 1 são dispostas as máximas e mínimas extensões hídricas (km<sup>2</sup>) anuais e históricas (destacadas em negrito). Analisando as superfícies de água máximas e mínimas registradas por ambas as polarizações, percebe-se que na VV geralmente foram registrados os maiores valores, apenas em 14/10/2022, houve um comportamento inverso, Δ(VV-VH) positivo (0,29 %).

ANO	Períodos de Máxima Mínima	DATA Dia/Mês	VV (km <sup>2</sup> )	VH (km <sup>2</sup> )	Δ(VV-VH) (%)
2017	Cheia 2017 Seca 2017	18/06	2.735	2.564	-6,70
		09/11	1.663	1.518	-9,56
2018	Cheia 2018 Seca 2018	25/06	2.726	2.590	-5,43
		28/11	1.560	1.506	-3,57
2019	Cheia 2019 Seca 2019	20/06	2.598	2.465	-5,27
		23/11	1.750	1.707	-2,51
2020	Cheia 2020 Seca 2020	14/06	2.582	2.441	-5,77
		29/11	<b>1.384</b>	<b>1.338</b>	-3,50
2021	Cheia 2021 Seca 2020/Cheia 2021	21/06	<b>2.838</b>	<b>2.660</b>	-6,67
		04/01	1.662	1.538	-8,08
2022	Cheia 2022 Seca 2022	28/06	2817	2.657	-6,03
		14/10	2.069	2.075	0,29

Tabela 1. Extensões hídricas máximas e mínimas registradas.

Já quanto às médias (± desvio padrão), o ano de 2022 apresentou a maior média de extensões hídricas (km<sup>2</sup>):

- 2022 (VV) 2.506 ± 223; (VH) 2.512 ± 185, seguida em ordem decrescente pelos anos:
- 2017 (VV) 2.463 ± 388; (VH) 2.342 ± 392
- 2019 (VV) 2.437 ± 285; (VH) 2.396 ± 316
- 2021 (VV) 2.419 ± 336; (VH) 2.388 ± 312
- 2018 (VV) 2.407 ± 307; (VH) 2.333 ± 282
- 2020 (VV) 2.367 ± 394; (VH) 2.264 ± 365

#### 4. DISCUSSÃO

A tendência de variação hidrológica (pulso de inundação) entre os anos 2017 e 2022 (Figura 4) assemelhou-se àquela indicada em: dados de fluviométricos de Óbidos-PA (próximo ao Curuai-PA) da Agência Nacional de Águas (ANA), e dados SAR ALOS (100 metros/pixel) banda-L: 2007 (7 cenas), 2009 (3) e 2010 (2) [18]. Desta forma, tem-se que o algoritmo S1AWM do GEE pode contribuir no detalhamento espaço-temporal das extensões de águas abertas, tendo em vista que as cenas S1 (10 metros/pixel) são capazes de cobrir grandes áreas a cada 12 dias.

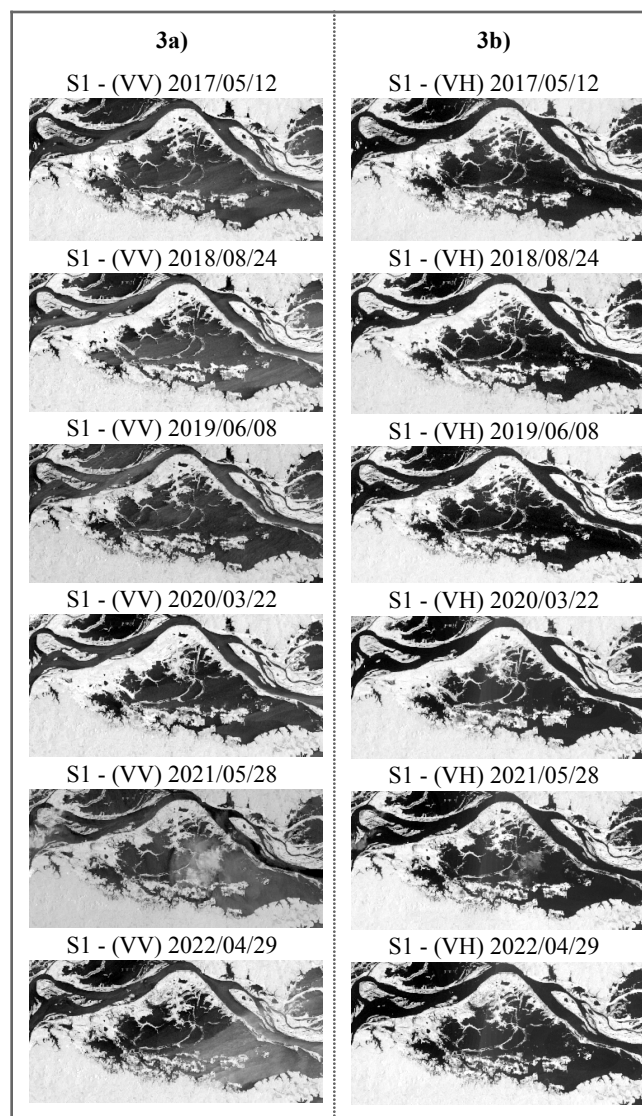


Figura 3. Nuvens densas e/ou eventos de precipitação.

De acordo com a efetividade da metodologia utilizada para o Lago Grande de Curuai, teoricamente, seria possível replicá-la em maior escala no contexto territorial amazônico, ou até quem sabe estendê-la para todo o bioma.

## 5. CONCLUSÕES

O coeficiente de retroespalhamento na polarização VH é o mais efetivo para o mapeamento e quantificação da extensão de águas abertas do LGC. A polarização VV, contudo, é altamente susceptível à presença de nuvens, não sendo recomendável para a construção de séries temporais de água aberta. Os resultados indicam a possibilidade do algoritmo ser aplicado para se estimar a área de água aberta da bacia amazônica e criar séries históricas que poderão ser relacionadas a dados de nível de água ao longo do tempo e/ou validadas com dados ópticos (bandas e índices espectrais) livre de nuvens. Além disso, pode ser utilizada como base para o desenvolvimento e aprimoramento das principais metodologias nacionais (*Brazil Data Cube* e *MapBiomass*) e internacionais (*Global Surface Water Explorer*, *Worsica* e *Dynamic World*) de mapeamento de extensos corpos hídricos que não consideram o ciclo sazonal hidrológico das regiões amazônicas e/ou não fazem uso de sistemas imageadores orbitais SAR. Além disso, o S1WAM pode ser utilizado pelos setores público e privado ampliando a compreensão, e facilitando o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos amazônicos, assim como fornecendo subsídios para ações que visem a mitigação de eventos extremos de inundações e enchentes.

Este trabalho pode auxiliar também na avaliação da variabilidade interanual das precipitações e na compreensão da resposta hidrológica às mudanças climáticas, de modo a avaliar as curvas de duração. Como sugestões futuras, tem-se por exemplo a réplica desta metodologia para dados SAR S1 no período compreendido entre os anos de 2014 e 2022, e utilizar dados ópticos Landsat (7, 8 e 9) em caso da ausência de imagens S2, defasadas em até 1 dia das S1.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] C. E. A. De Souza Costa, C. J. C. Blanco, J. F. De Oliveira-Júnior. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. *Climatic Change* v.166, pp.1573-148, 2021.
- [2] Z. N. Musa, I. Popescu, A. Mynett, A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.19, pp.3755-3769, 2015.
- [3] J. Tomasella, M. G. Hodnett, L. A. Cuartas; A. D. Nobre, M. J. Waterloo, S. M. Oliveira. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behavior. *Hydrological Processes*, [S.L.], v. 22, n. 13, p. 2133-2147, 2008.
- [4] A. S. Fleischmann, F. Papa, A. Fassoni-Andrade, J. M. Melack, S. Wongchuig, R. C. D. Paiva, S. K. Hamilton, E. Fluet-Chouinard. How much inundation occurs in the Amazon River basin?, *Remote Sensing of Environment*, v. 278, 2022.
- [5] L. Kšeňak, K. Pukanská, K. Bartoš, P. Blišťan. Assessment of the Usability of SAR and Optical Satellite Data for Monitoring

Spatio-Temporal Changes in Surface Water: Bodrog River Case Study. *Water*, v.14, pp.299, 2022.

- [6] K. P. Papathanasiou, S. R. Cloude, M. Pardini, M. J. Quinones, D. Hoekman, L. Ferro-Famil, et al. Forest Applications. In I. Hajnsek, & Y-L. Desnos (Eds.), *Remote Sensing and Digital Image Processing: Polarimetric Synthetic Aperture Radar* v.25, pp. 59-117, 2021.
- [7] L. Wu, L. Wang, L. Min, W. Hou, Z. Guo, J. Zhao, N. Li. Discrimination of Algal-Bloom Using Spaceborne SAR Observations of Great Lakes in China. *Remote Sensing*. v.10, pp.767, 2018.
- [8] F. T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Vol. 2. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Ch. 12, Artech House Publishers, Norwood, pp.962-966, 1986
- [9] R. W. Paradella, J. C. Mura, F. F. Gama. *Monitoramento DInSAR para Mineração de Geotecnia – São Paulo: Oficina de Texto*, 2021.
- [10] H. Sioli, H. Klinge. Solos, tipos de vegetação e águas na Amazônia. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi*. n.1, pp.1-18, 1962.
- [11] C. C. F. Barbosa. Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/ Rio Amazonas. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, pp. 287, 2005.
- [12] M. Silveira, S. Heleno. Separation Between Water and Land in SAR Images Using Region-Based Level Sets, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v.6, n.3, pp.471-475, 2009.
- [13] Z. Guo, L. Wu, Y. Huang, Z. Guo, J. Zhao, N. Li, Water-Body Segmentation for SAR Images: Past, Current, and Future. *Remote Sens*. 14, 1752, 2022.
- [14] L. L. Hess, J. M. Melack, S. Filoso, Y. Wang. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.33, n.4, pp.896-904, 1995.
- [15] M. Amani et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v.13, pp. 5326-5350, 2020.
- [16] L. Terres de Lima, S. Fernández-Fernández, JF Gonçalves, L. Magalhães Filho, C. Bernardes. Development of Tools for Coastal Management in Google Earth Engine: Uncertainty Bathtub Model and Bruun Rule. *Remote Sensing*. 2021; v. 13, n.8 pp.1424, 2021.
- [17] F. M. Henderson, A. J. Lewis. Principles and applications of imaging radar, manual of remote sensing. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, pp.866, 1998.
- [18] A. Arnesen, T. S. F. Silva, L. L. Hess, E. M. L. M. Novo, C. M. Rudorff, B. D. Chapman, K. C. McDonald. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images, 2013.