

ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL SENTINEL 1 DE INUNDAÇÕES NA AMAZÔNIA CENTRAL

<https://doi.org/10.4215/rm2022.e21019>

Ivo Augusto Lopes Magalhães ^{a*} - Osmar Abílio de Carvalho Junior ^b - Renato Fontes Guimarães ^c
Roberto Arnaldo Trancoso Gomes ^d

(a) Doutorado em Geografia. Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1634-4778>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/5590614227713686>.

(b) Doutorado em Geologia. Professor da Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1497-1022>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/9001313758906930>.

(c) Doutorado em Geologia. Professor da Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-0795>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/5457008433124989>.

(d) Doutorado em Geografia. Professor da Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7358-6696>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/5289849728704414>.

Article history:

Received 24 November, 2021

Accepted 08 July, 2022

Published 15 October, 2022

(*) CORRESPONDING AUTHOR

Address: UnB. Departamento de Geografia, GEa, ICC Norte 900, Brasília (DF), Brasil.

Tel: (+55 38) 98831-3917.

E-mail: ivosmagalhaes@gmail.com

Resumo

Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica das áreas alagadas da série temporal Sentinel-1 SAR em um trecho da Amazônia Central no período entre 26 de setembro de 2016 e 8 de fevereiro de 2020. O total de imagens foi de 59 para cada polarização. Além disso, a pesquisa calculou a linha de inundação ordinária média (LMEO) a partir das alturas das réguas fluviométricas entre os anos de 1967 a 2020 e a comparou com os valores presentes na série temporal do radar. O pré-processamento da série temporal Sentinel-1 nas polarizações VV e VH utilizou a seguinte sequência metodológica: correção de órbita, correção radiométrica (σ_0), correção do terreno, filtragem do ruído, e conversão dos dados para decibéis (dB). A análise prévia dos filtros adaptativos mostrou resultados diferentes para as duas polarizações, obtendo o melhor resultado para a polarização VV utilizando o filtro Frost com 3x3 e para a polarização VH o filtro Lee 3x3. A extração de corpos d'água e áreas úmidas utilizou um valor limite fazendo máscaras para todo o período. A maior extensão da área inundável foi medida em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km², representando 16,42% da cena SAR na polarização VH e 6.443,19 km², representando 16,10% da cena SAR na polarização VV. A relação entre as áreas úmidas VH e VV em relação à altura da régua foi satisfatória, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,79 na polarização VH e de 0,64 na polarização VV e p-valor menor que 0,05.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Radar; Mapeamento de Corpos Hídricos.

Abstract / Resumen

SENTINEL-1 TIME SERIES ANALYSIS ON CENTRAL AMAZON FLOODS

This study aimed to analyze the dynamics of the flooded areas of the Sentinel 1-SAR time series in a section of the Central Amazon between September 26, 2016, and February 8, 2020. The total of images was 59 for each polarization. In addition, the study calculated the average ordinary flood line (ALOF) from the heights of the fluviometric rulers between the years 1967 to 2020 and compared it with the values present in the radar time series. The pre-processing of the Sentinel-1 time series in the VV and VH polarizations used the following methodological sequence: Apply Orbit File, Radiometric Calibration (σ_0), Range-Doppler Terrain Correction, Speckle Filter, and conversion to decibels (dB). The previous analysis of the adaptive filters showed different results for the two polarizations, obtaining the best result for the VV polarization using the Frost filter with 3x3 and the VH polarization with the Lee filter 3x3. The extraction of water bodies and wetlands used a threshold value, making masks for the entire period. The most considerable extent of the floodable area occurred on June 17, 2019, with 6,611.86 km², representing 16.42% of the SAR scene in the VH polarization and 6,443.19 km², representing 16.10% of the SAR scene in the VV polarization. The relationship between the VH and VV wetlands to the ruler's height was satisfactory, with coefficients of determination (R^2) of 0.79 in the VH polarization and of 0.64 in the VV polarization and a p-value less than 0.05.

Keywords: Remote sensing; Radar; Mapping of Water Bodies.

ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO SENTINEL 1 SOBRE INUNDACIONES EN LA AMAZONIA CENTRAL

Este estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica de las áreas inundadas de la serie temporal Sentinel-1 SAR en una sección de la Amazonía Central en el periodo comprendido entre el 26 de septiembre de 2016 y el 8 de febrero de 2020. El total de imágenes fue de 59 para cada polarización. Además, la investigación calculó la línea de inundación ordinaria promedio (LMEO) a partir de las alturas de las reglas fluviométricas entre los años 1967 a 2020 y la comparó con los valores presentes en la serie temporal del radar. El preprocesamiento de la serie temporal Sentinel-1 en las polarizaciones VV y VH utilizó la siguiente secuencia metodológica: corrección de órbita, calibración radiométrica (σ_0), corrección del terreno, filtrado de ruido y conversión a decibelios (dB). El análisis previo de los filtros adaptativos mostró resultados diferentes para las dos polarizaciones, obteniendo el mejor resultado para la polarización VV utilizando el filtro Frost con 3x3 y para la polarización VH el filtro Lee 3x3, realizando máscaras para todo el periodo. La mayor extensión de la zona inundable se midió el 17 de junio de 2019, con 6.611,86 km², que representa el 16,42 % de la escena SAR en polarización VH y 6.443,19 km², que representa el 16,10 % de la escena SAR en polarización VV. La relación entre los humedales VH y VV en relación con la altura de la regla fue satisfactoria, con coeficientes de determinación (R^2) de 0.79 en la polarización VH y de 0.64 en la polarización VV y p-valor menor a 0.05.

Palabras-clave: Detección remota; Radar; Mapeo de cuerpos de agua.

INTRODUÇÃO

As extensões mais significativas de áreas inundáveis no Brasil estão nos biomas Pantanal e Amazônia. O rio Amazonas é responsável por aproximadamente 12% da área úmida total da bacia amazônica, possuindo uma grande variedade de fitofisionomias herbáceas, arbustivas e arbóreas, tanto terrestres quanto aquáticas (MELACK e HESS, 2010).

No território nacional, as áreas úmidas adjacentes aos rios federais são de propriedade da União. A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 20, define que a União administra as seguintes áreas: terrenos baldios, lagos, rios e eventuais cursos d'água em terras sob seu domínio; ilhas fluviais e lacustres em áreas de fronteira com outros países; as praias do mar; ilhas oceânicas e costeiras; o mar territorial; as terras da marinha; recursos minerais; sítios arqueológicos e pré-históricos; terras indígenas; entre outros (BRASIL, 1988).

O Decreto-Lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946, define Terras Marginais como áreas banhadas por águas navegáveis, fora do alcance das marés, com quinze metros medidos horizontalmente em direção a terra contados a partir da Linha Média de Inundações Ordinárias (LMEO). A definição de Terras Marginais considera a compreensão da dinâmica do pulso de inundação dos rios federais.

O cálculo da LMEO utiliza dados de séries históricas de estações fluviométricas considerando a média anual máxima da cota de inundação por pelo menos 20 anos. Outro dado crítico é o marco geodésico mais próximo do trecho de demarcação para realizar a etapa de nivelamento topográfico com transposição de cota altimétrica entre o marco geodésico e a estação fluviométrica, obtendo assim a altura topográfica da LMEO (SPU, 2001).

Os extensos rios e áreas desabitadas do bioma Amazônia tornam a aquisição de informações in situ bastante custosa devido à demanda de planejamento, equipamentos, transporte e recursos humanos. Assim, técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são alternativas viáveis para obtenção e coleta de informações sobre corpos d'água.

As imagens ópticas de satélite na região amazônica apresentam limitações devido à intensa interferência da cobertura de nuvens ao longo do ano (FORKUOR et al., 2014). Portanto, os sistemas de radar são os mais indicados para monitorar essa região por atravessar as nuvens e nebulosidade. Um sistema SAR usa processamento de sinal sofisticado para sintetizar uma antena mais extensa do que seu tamanho físico real. O satélite Sentinel-1 SAR pertencente à missão da Agência Espacial Europeia (ESA) foi lançado em 2014, com um sensor de micro-ondas operando na banda C em polarização simples (HH ou VV) ou dupla (HH/HV ou VV/VH). modos e alta resolução espacial e temporal.

No entanto, o principal fator de interferência associado à interpretação das imagens RADAR é a presença de ruído speckle (TELLO, LOPEZ-MARTINEZ e MALLORQUI, 2006; CHANG et al., 2007; SANTOSO et al., 2016). O ruído speckle gera uma aparência granular na imagem, composta por mudanças bruscas no nível de cinza em pixels espacialmente próximos (FURTADO et al., 2016). Portanto, esse ruído degrada a qualidade das imagens, interferindo em todas as etapas de detecção de alvos escuros, exigindo o uso de processamento em múltiplas visualizações (multi-look) ou a aplicação de filtros para sua suavização (DONG, MILNE e FORSTER, 2001 e FURTADO et al., 2016).

A presente pesquisa visa mensurar as áreas inundáveis e o ALOF através de dados fluviométricos (1967-2020) e séries temporais de imagens Sentinel-1 SAR (2016-2020) em dupla polarização VH e VV em um trecho altamente inundável da Amazônia.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre os municípios de Urucará e Parintins a leste de Manaus no estado do Amazonas, compreendendo o rio Amazonas no quadrante com as coordenadas geográficas 2° 32' 11"S 57° 45' 38"W e 2° 37' 42"S 56° 44' 11"W (Figura 1). O clima é "Am" na classificação de Köppen, com precipitação anual de 1.355 a 2.839 mm. O período de cheia começa em maio e se estende até meados de julho, seguido pelo período seco entre setembro e novembro (RAMALHO et al., 2009).

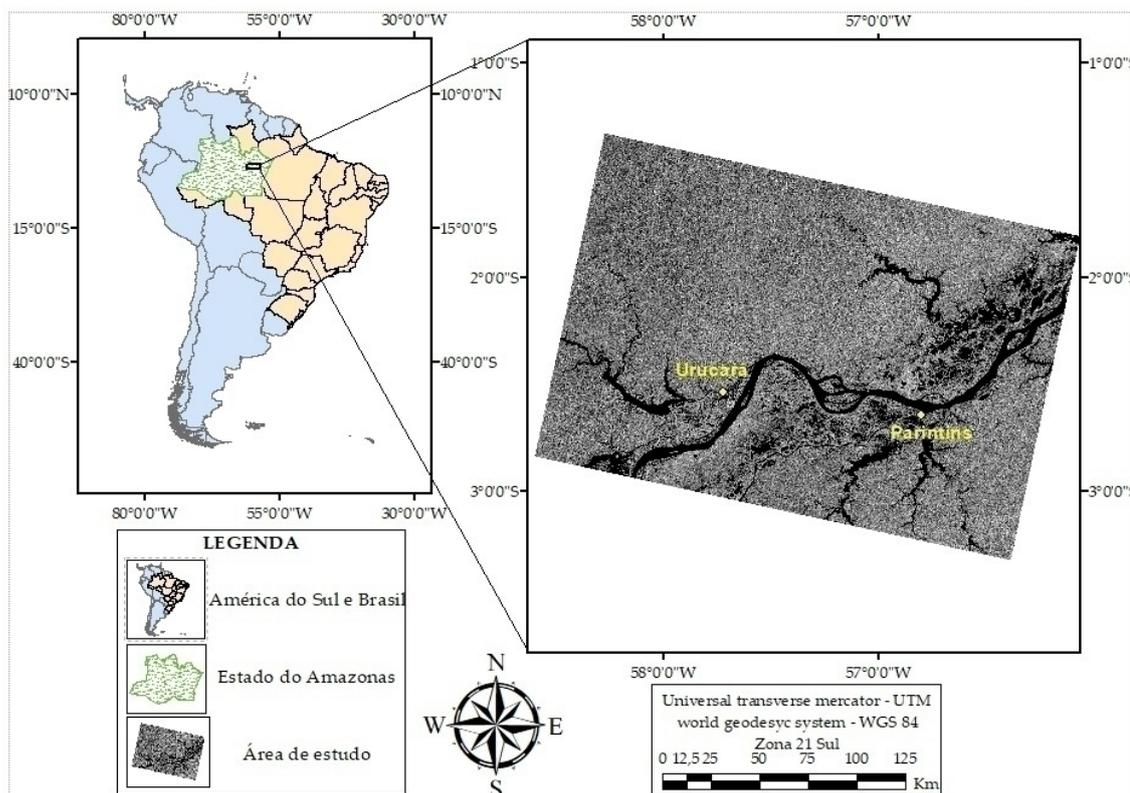


Figura 1 - Localização geográfica da área em estudo na Amazônia Central.

IMAGENS SENTINEL-1 E PRÉ-PROCESSAMENTO

As imagens Sentinel-1 (SAR) são disponibilizadas gratuitamente no endereço eletrônico (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) da European Space Agency (ESA), possuindo características distintas (Tabela 1). O presente estudo adquiriu 59 imagens do satélite Sentinel-1 na polarização VH e VV na região da Amazônia Central no período anual entre os dias 26 de setembro de 2016 e 08 de fevereiro de 2020. As imagens correspondem ao modo Interferometric Wide Swath (IWS), descendente, e com nível 1 Ground Range Detected (GRD). O pré-processamento utilizou o programa SNAP considerando a seguinte sequência metodológica: Apply Orbit File, Radiometric Calibrate (σ_0), Correction Geometric (Range-Doppler Terrain Correction), Speckle Filter e conversão dos dados de linear para decibéis (dB).

Os programas empregados nas fases de geoprocessamento e validação dos dados foram Envi 5.5 e ArcGIS 10.6. A extração temporal das áreas inundáveis utilizou a técnica de máscara no cubo temporal de imagens SAR a partir da definição de um valor limite dos corpos hídricos, usando o programa Envi 5.5. Subsequentemente, as máscaras dos corpos d'água foram convertidos para vetores para mensuração das áreas inundadas e a definição da LMEO para a região em estudo.

FILTRAGEM DOS DADOS

O ruído speck causado pela interferência aditiva ou destrutiva do sinal de retorno do radar para cada célula prejudica a interpretação visual das imagens (Lee e Pottier, 2009). A seleção do melhor filtro para cada polarização considerou 7 métodos de filtragem (Frost; Gamma Map; Lee Enhanced; Lee; IDAM 1, 2 e 3; mediana; e Boxcar) em três dimensões de janelas (3x3, 7x7 e 11x11). A análise utilizou 40 amostras distribuídas uniformemente por toda a imagem de referência com tamanho de 5.000 km². As métricas analisadas foram: Erro Quadrático Médio (MSE), Erro Absoluto Médio (MAE), Relação Sinal Ruído (SNR), Pico de Relação Sinal Ruído (PSNR), Índice de Preservação de Borda (EPI), Distorção de Contraste (DCON) e Número Equivalente de Looks (NEL).

CUBO TEMPORAL DE IMAGENS

A montagem do cubo temporal considerou as 59 imagens Sentinel-1 nas polarizações VH e VV para o período de 26/09/2016 a 08/02/2020. O cubo temporal apresenta nos eixos “x (linhas)” e “y (colunas)” as coordenadas geográficas e no eixo “z” a trajetória temporal com a sequência dos dias em ordem crescente (CARVALHO JUNIOR et al., 2008). O atributo z do cubo temporal descreve a presença das áreas inundáveis nas duas polarizações VH e VV.

OS CAMPOS DE VENTO

A velocidade do vento influencia nos valores de retroespalhamento no rio Amazonas, Lago Grande e Lago Moratinga, nas polarizações VH e VV. Os dados de velocidade do vento (metros por segundo) utilizados são provenientes do sistema do Banco de Dados Meteorológicos de Ensino e Pesquisa (BDMEP) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Tabela 2). A pesquisa utilizou 14 postos pluviométricos inseridos na Amazônia Central e 3 postos inseridos no estado do Pará, com o objetivo de eliminar o efeito de borda no processo de interpolação (GARDIMAN JUNIOR et al., 2012). A interpolação da velocidade do vento utilizou as médias das 17 dezessete estações, compreendendo os mesmos dias das imagens SAR entre 01/09/2016 e 08/02/2020 (Figura 2). De acordo com Gardiman Junior et al., (2012) a técnica de interpolação spline regularizada mantém o mesmo valor do dado amostral na estação, além de ser um método determinístico, exato e não convexo.

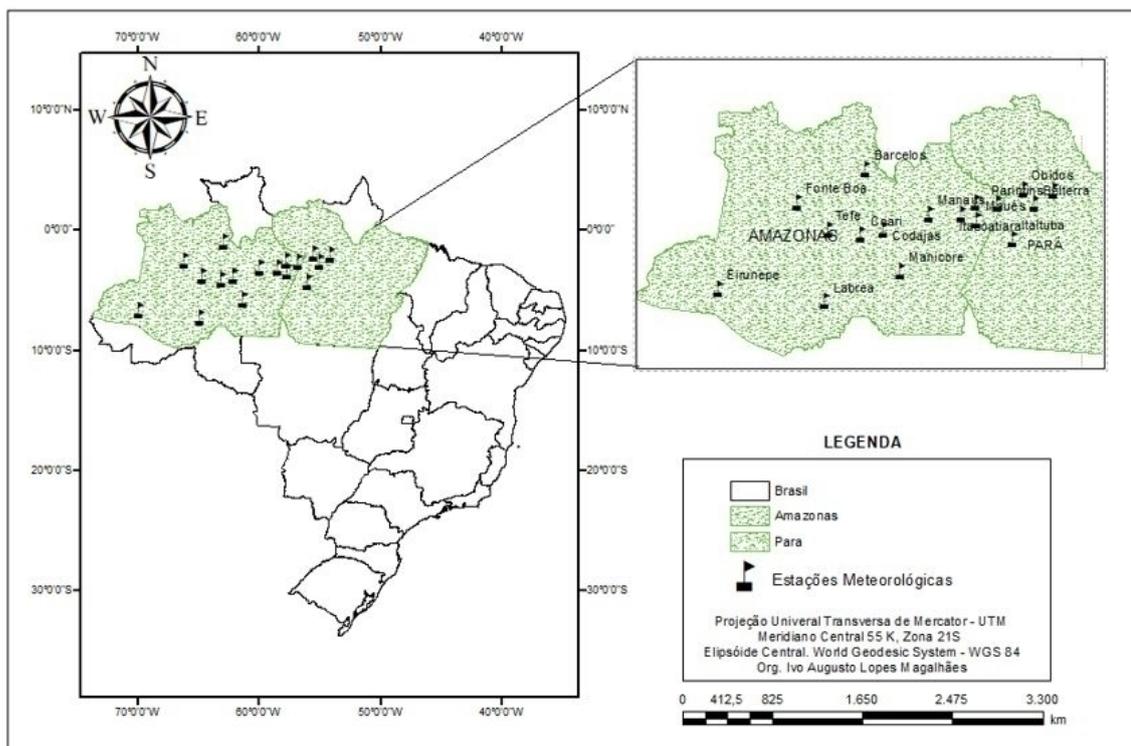


Figura 2 - Mapa das estações meteorológicas utilizadas para interpolação dos campos de vento na Amazônia Central, estado do Pará.

Estação	Município e Estado	Latitude	Longitude	Velocidade média do vento (mps)
82240	Parintins, AM	-2,630	-56,730	1,03
A1222	Maués, AM	-3,399	-57,673	1,14
82317	Tefê, AM	-3,830	-64,700	0,52
82425	Coari, AM	-4,080	-63,130	1,15
82331	Manaus, AM	-3,110	-59,950	0,91
82336	Itacoatiara, AM	-3,130	-58,430	1,13
82113	Barcelos, AM	-0,960	-62,910	0,99
82326	Cadajás, AM	-3,830	-62,080	1,93
82533	Manicoré, AM	-5,8100	-61,300	0,68
82445	Itaituba, PA	-4,2800	-56,000	0,94
82178	Obidos, AM	-1,910	-55,510	1,66
82246	Belterra, PA	-2,630	-54,950	0,94
82181	Monte Alegre, PA	-2,000	-54,080	2,99
82723	Labrea, AM	-7,2500	-64,830	1,9
82212	Fonte Boa, AM	-2,530	-66,160	1,1
82610	Eirunepe, AM	-6,660	-69,860	0,04
A124	Urucará, AM	-2,534	-57,758	1,12

Tabela 2 - Nomenclatura das estações meteorológicas e dados da velocidade do vento. Fonte: INMET, (2020).

CÁLCULO DA LINHA MÉDIA DE ENCHENTE ORDINÁRIA – LMEO

O cálculo da LMEO utilizou os dados fluviométricos da série histórica (1967-2020) do Rio Amazonas no município de Parintins, obtidos por meio do site hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da Agência Nacional de Águas (ANA). Os procedimentos técnicos obedeceram a Orientação Normativa de demarcação de Terrenos Marginais (SPU, 2001). O cálculo da LMEO utilizou uma série histórica de 65 anos, referente a estação de código 16350002 da ANA, considerando um período de retorno de mínimo de 3 anos e máximo de 20 anos. Por meio da média da somatória das maiores leituras mensal da régua do rio, obtendo uma LMEO em centímetros baseado na régua local para o rio Amazonas na região de Parintins, AM. Esse dado deve ser posteriormente calculado a obter sua altitude topográfica. O dia da cota mais próxima a LMEO (em 65 anos) na curta série temporal SAR (4 anos) corresponde a maior área inundada.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS TEMPORAIS

A análise de regressão linear e a correlação de Pearson comparou os seguintes dados: valores mensurados entre as polarizações VH e VV, relação entre a área de inundação obtida pela série temporal SAR com as cotas fluviométricas da régua e a precipitação acumulada para cada mês na estação meteorológica de Parintins, AM. Essa análise permite estimar uma função entre a área inundada e os dados medidos em campo. O fluxograma metodológico sumariza as etapas de desenvolvimento deste estudo (Figura 3).

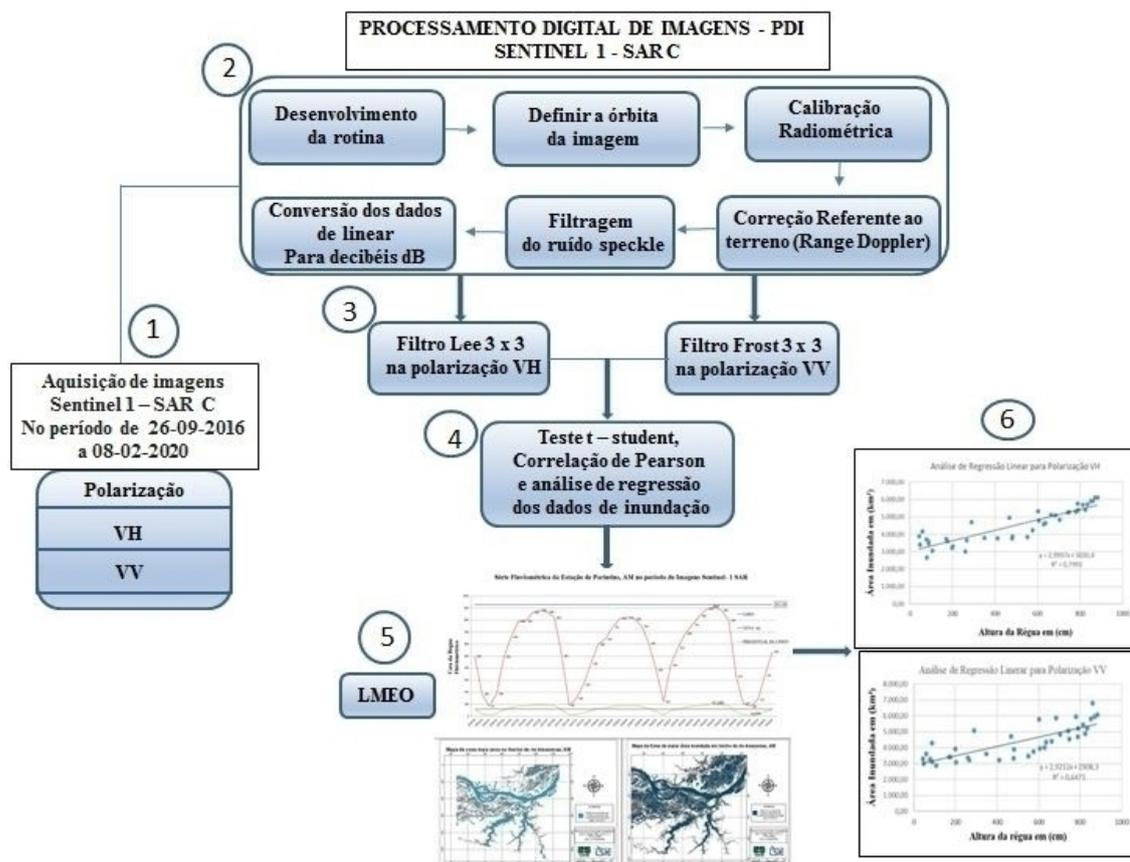


Figura 3 - Fluxograma metodológico das etapas realizadas na análise de inundação no trecho central do rio Amazonas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE DAS TÉCNICAS PARA ATENUAÇÃO DE RUÍDOS NA IMAGEM

O ruído speckle é difundido em toda a cena SAR, com alta interferência em corpos d'água. A análise visual das imagens SAR demonstra que a filtragem espacial minimiza significativamente a fração de ruído, aumentando a nitidez do rio Amazonas, corpos d'água e vegetação nas polarizações. As Tabelas 3 e 4 listam os valores estatísticos das diferentes técnicas de filtragem para imagens SAR nas polarizações VH e VV. Os melhores resultados foram diferentes entre as duas polarizações. Na polarização VH, o filtro Lee 3x3 apresentou os melhores resultados na redução de ruído com os menores MSE (1,88) e MAE (1,638), assim como os maiores valores de PSNR (13,35) e SNR (10,27). A maioria dos filtros apresentou resultados aproximados, mas o filtro Frost 3x3 apresentou a discrepância mais significativa entre as técnicas de filtragem na polarização VH com alto MSE (8,95), MAE (6,28) e distorção de contraste. Na polarização VV, o filtro Frost com 3x3 obteve o melhor desempenho com valores baixos para MSE (1,2), MAE (628) e janela de distorção de contraste.

Filtros VH	MSE	MAE	SNR	PSNR	CoC	DCON	NEL
Frost 3x3	8,95	1,634	4,1377	12,68	0,4702	1,7266	4,641
Frost 7x7	2,88	1,638	8,6336	13,17	0,6994	1,7224	13,443
Frost 11x11	2,68	1,637	8,9233	13,2	0,7222	1,7231	21,345
G M 3x3	3,89	1,641	6,804	13,04	0,6011	1,719	12,664
G M 7x7	2,60	1,636	9,184	13,21	0,7361	1,724	22,513
G M 11x11	3,40	1,636	8,033	13,1	0,6303	1,724	23,899
Lee Enhanced	3,91	1,638	7,6331	13,04	0,644	1,721	7,782
Lee 3x3	1,88	1,633	10,277	13,35	0,824	1,722	8,454
Lee 7x7	2,490	1,636	9,6613	13,23	0,751	1,724	15,130
Lee 11x11	2,713	1,635	9,2503	13,19	0,725	1,725	20,795
IDAM 1	2,73	1,638	8,294	13,19	0,714	1,722	16,784
IDAM 2	2,915	1,640	8,030	13,16	0,696	1,720	18,564
IDAM 3	3,551	1,640	7,1902	13,08	0,614	1,720	17,560
Mediana 3x3	3,46	1,637	8,2216	13,09	0,662	1,723	11,829
Mediana 7x7	3,64	1,637	7,7089	13,07	0,6112	1,723	15,084
Mediana 11x11	3,43	1,6394	7,4250	13,09	0,6212	1,72138	22,818
Boxcar 3x3	3,48	1,638	8,0076	13,09	0,6602	1,72218	1,4121
Boxcar 7x7	2,22	1,637	8,5251	12,28	0,6747	1,72378	1,9142
Boxcar 11x11	2,17	1,636	8,4309	12,29	0,669	1,7242	2,9944

Tabela 3 - Valores dos Índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VH.

Filtros VV	MSE	MAE	SNR	PSNR	CoC	DCON	NEL
Frost 3x3	1,2	6,26	13,54	12,51	0,91	6,59	12,09
Frost 7x7	3,4	6,28	8,97	12,09	0,75	6,59	17,67
Frost 11x11	4,5	6,27	8,11	11,97	0,64	6,59	21,78
G M 3x3	2,1	6,28	11,58	12,29	0,85	6,59	11,65
G M 7x7	3,9	6,27	8,92	12,03	0,7	6,6	18,38
G M 11x11	4,4	6,27	8,06	11,98	0,65	6,59	23,48
Lee Enhanced	4,1	6,29	7,86	12,01	0,7	6,58	14,02
Lee 3x3	3,7	6,27	9,44	12,06	0,74	6,6	11,559
Lee 7x7	4,9	6,27	7,78	11,93	0,61	6,59	18,17
Lee 11x11	5	6,27	7,73	11,92	0,6	6,6	21,23
IDAM 1	3,5	6,28	8,7	12,08	0,75	6,59	19,74
IDAM 2	4	6,28	8,33	12,02	0,7	6,59	20,13
IDAM 3	6,4	6,29	5,77	11,82	0,5	6,58	15,45
Mediana 3x3	2,5	6,29	3,76	11,22	0,22	6,58	10,49
Mediana 7x7	4,7	6,28	7,43	11,95	0,63	6,59	19,81
Mediana 11x11	5	6,28	6,99	11,92	0,6	6,58	25,58
Boxcar 3x3	3	6,28	8,34	11,15	0,68	6,59	18,74
Boxcar 7x7	2,9	6,27	7,14	11,16	0,55	6,59	24,62
Boxcar 11x11	2,9	6,27	7,55	11,15	0,57	6,6	39,78

Tabela 4 - Valores dos Índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VV.

Portanto, a filtragem espacial através de filtros Lee 3x3 na polarização VH e Frost 3x3 na

polarização VV minimizou significativamente a fração de ruído (Figura 4).

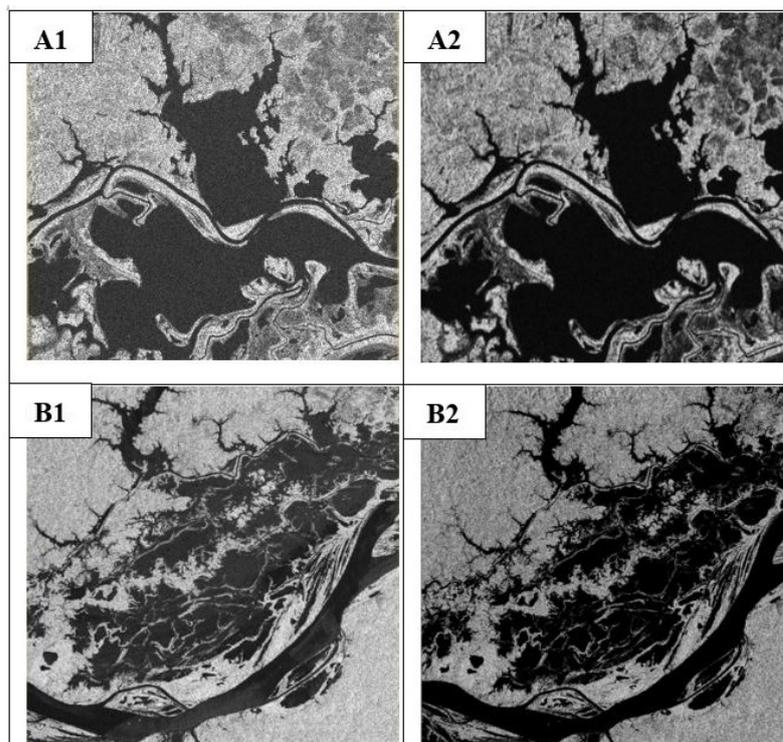


Figura 4 –Imagem Sentinel–1 dos corpos hídricos na polarização VH (A1) e filtrada pelo Lee 3x3 (A2), e na polarização VV (B1) e filtrada pelo Frost 3x3.

CUBO TEMPORAL DE IMAGENS SAR

O cubo temporal possibilitou a análise da dinâmica sazonal das áreas inundadas, apresentando maior volume dos corpos hídricos nos meses de maio, junho e julho e menor volume nos meses de novembro, dezembro e janeiro. A Figura 5 demonstra que as polarizações VV e VH não apresentam uma diferença visual significativa para os corpos hídricos.

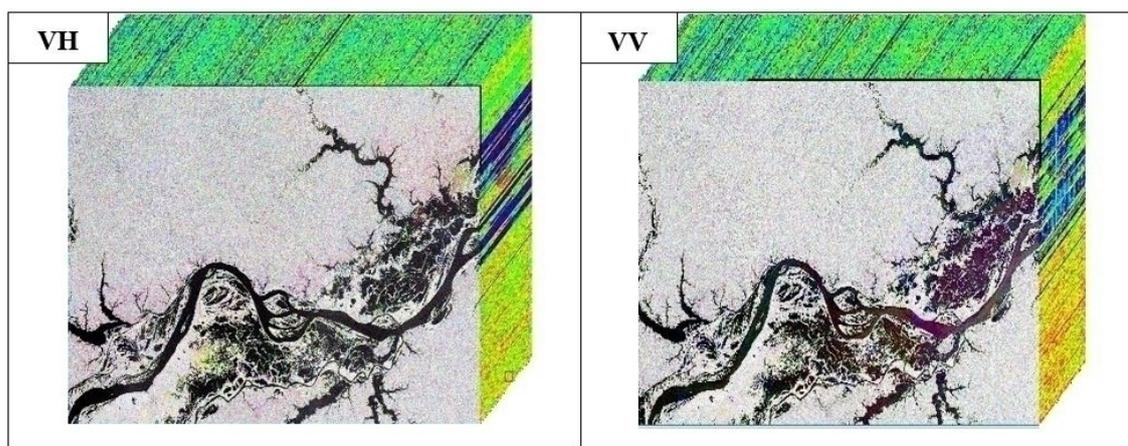


Figura 5 - Cubo temporal composto por 59 imagens Sentinel -1 nas polarizações VH e VV entre 26/09/2016 e 08/02/2020.

No entanto, a incapacidade da banda C de penetrar nas copas das árvores (aproximadamente 5 cm) dificulta a medição confiável de áreas úmidas sobre cobertura florestal. Marques et al. (2019)

analisaram áreas úmidas usando um cubo temporal de imagens PALSAR/ALOS 2 na Ilha do Bananal, trecho médio do Rio Araguaia no estado do Tocantins. Esses autores concluíram que a variação da área de inundação foi de 10% entre as imagens com as menores e as maiores cotas de inundação.

Ferreira (2018) utilizou um cubo temporal de 29 imagens Sentinel-1 com o método de aprendizado de máquina Random Forest e o valor limite em imagens SAR para identificar áreas úmidas no sul do estado de Roraima ao longo de 2017. Os resultados demonstraram o comportamento típico de áreas alagadas às margens dos rios e feições adjacentes ao Rio Branco. Em julho, o pico da cheia cobriu mais de 72.000 ha da área de estudo, e o pico da seca em dezembro cobriu mais de 37.000 ha.

CARACTERIZAÇÃO DO RETROESPALHAMENTO SAR DOS CORPOS HÍDRICOS

A análise temporal dos valores de retroespalhamento SAR possibilitou caracterizar o rio Amazonas, Lago Grande e Lago Moratinga com valores entre -21,49 a -25,78 dB, -22,52 a -28,2 dB e -21,98 a -27,69 dB na polarização VH e -13,34 a -23,27 dB, -18,14 a -24,57 dB e -17,36 a -26,44 dB) para polarização VV (Figura 6).

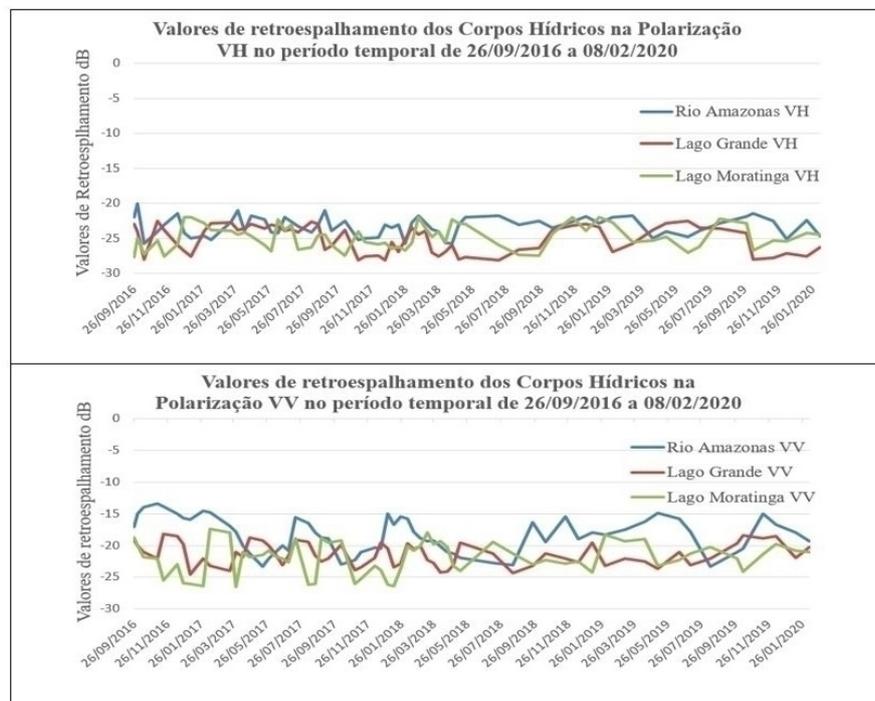


Figura 6 - Gráfico dos valores de retroespalhamento SAR nas polarizações VH e VV no rio Amazonas, Lago Moratinga e Lago Grande na Amazônia Central de 26/09/2016 até 08/02/2020.

Os corpos hídricos da região apresentaram valores de threshold distintos nas duas polarizações, com um valor médio de -19 dB na polarização VH, e -14 dB na polarização VV. Outros estudos de águas abertas obtiveram valores similares (ARNESEN, 2012; FERREIRA, 2018; FROTA, 2019). No entanto, os valores de retroespalhamento do rio Amazonas foram maiores nas duas polarizações do que os Lagos Grande e Moratinga, que obtiveram entre eles valores aproximados nas duas polarizações, VH e VV. A causa dessa variação pode ser devido os seguintes fatores: (a) interferência de campos de vento com velocidade variando entre 1,2 a 1,4 mps sobre o rio Amazonas, superiores que os outros dois Lagos (1 a 1,2 mps), e (b) ação da correnteza da água contendo maior ondulação no rio e inferindo em uma maior resposta do retroespalhamento SAR (Figura 7). Marinho et al., (2012) corroboram com este estudo ao mensurar valores semelhantes de retroespalhamento de corpos hídricos e áreas inundadas no Vale do Itajaí, estado de Santa Catarina em imagens SAR do Sensor ALOS-PALSAR.

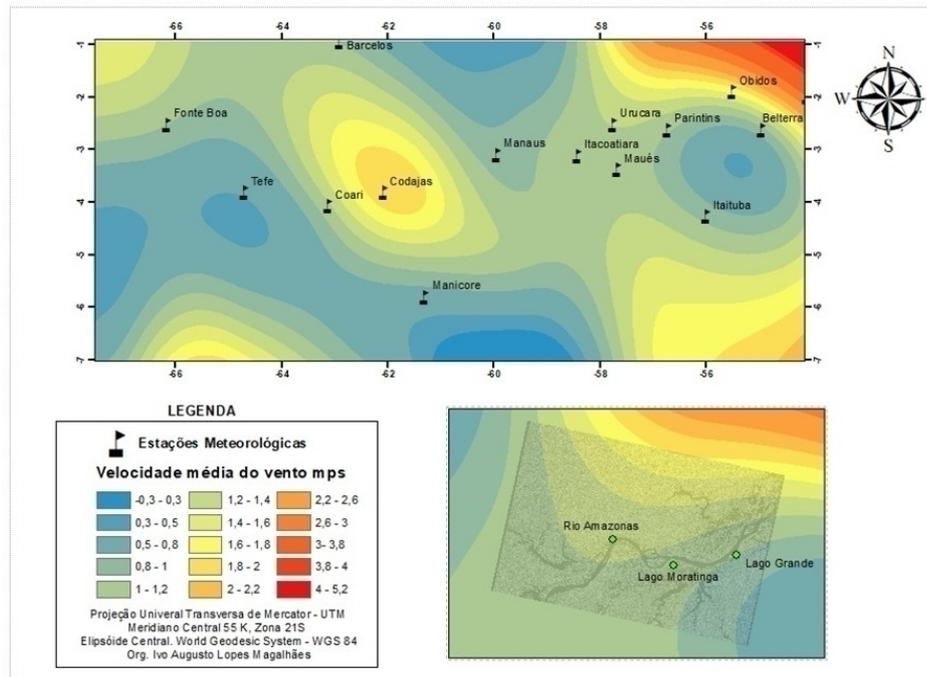


Figura 7 - Mapa da velocidade média do vento de 01/09/2016 até 08/02/2020 para Amazônia Central.

ANÁLISE DA DINÂMICA PLUVIOMÉTRICA E O PULSO DE INUNDAÇÃO

A série temporal pluviométrica entre 2000 a 2020 na área em estudo demonstrou que as maiores médias mensais ocorreram nos meses de fevereiro (313 mm/ano), março (378 mm/ano) e abril (342 mm/ano). Os menores médias pluviométricas mensais ocorreram nos meses de setembro (47 mm/ano), outubro (78 mm/ano) e novembro (89 mm/ano) (Figura 8). Os resultados corroboram com outros estudos (JUNK, 1997; ARNESEN, 2012) que evidenciam um pulso de inundação de comportamento monomodal anual no rio Amazonas e seus afluentes, uma ocorrência previsível ao longo do ano com o período de cheia entre maio e julho e período de seca entre outubro e dezembro.

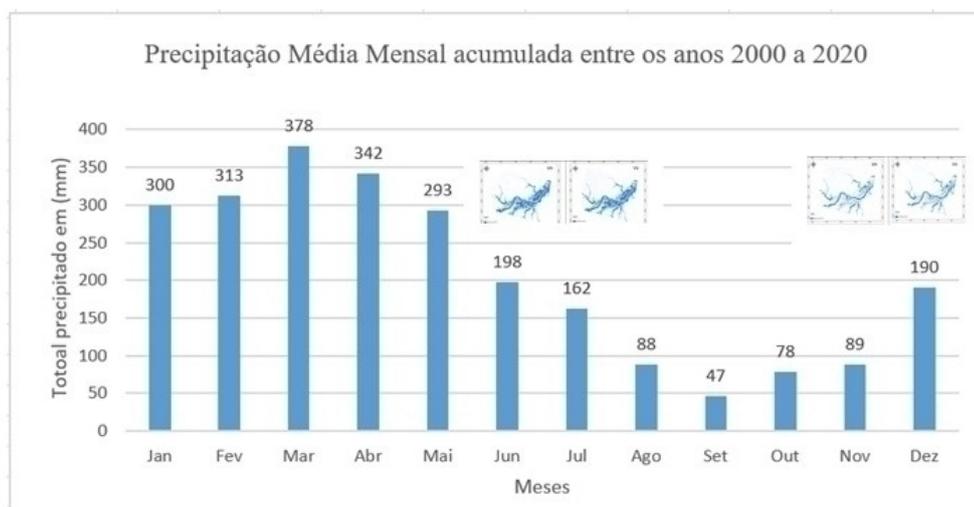


Figura 8 - Valores pluviométrico na estação de Parintins (AM), salientando a maior e menor área inundada dentro da série temporal Sentinel – 1 para anos de 2000 a 2020.

A maior área inundável ocorreu em 17 de junho de 2019, com 6.611,86 km² representando 16,42% da cena VH e 6.443,19 km² representando 16,10% da cena VV. A menor área inundada ocorreu em 25 de dezembro de 2016, com 3.059,75 km², representando 7,64% da cena SAR na polarização VH e 2.868,59 km² de corpos d'água, 7,17% da cena SAR na polarização VV. As imagens SAR nas duas polarizações (VH e VV) mostram uma semelhança entre as áreas alagadas nos períodos de chuva e seca sendo as diferenças praticamente imperceptíveis (Figura 9).

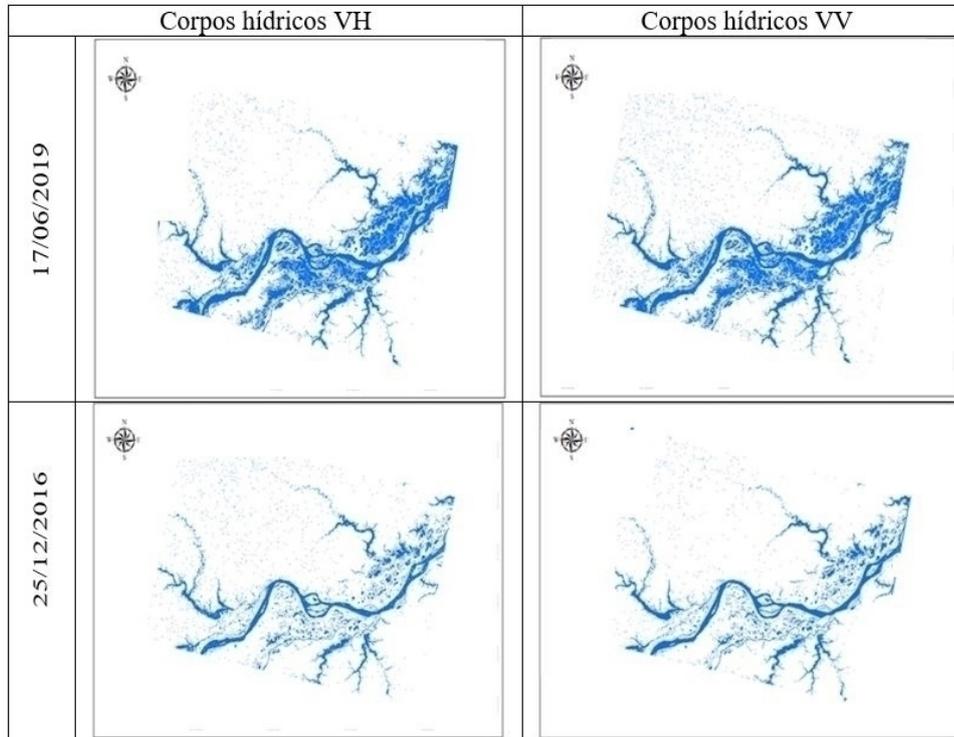


Figura 9 - Mapa dos corpos d'água da Amazônia Central nos períodos de menor e maior área inundada para os anos de 2016 a 2020 nas polarizações VH e VV do Sentinel-1.

O pulso de inundação no trecho da Amazônia Central ocorre com período de atraso entre 3 a 4 meses após o maior índice de precipitação no mês de março. Conforme Papa et al., (2010), o pulso de inundação no Baixo Rio Amazonas ocorre com um tempo de retardo de quatro a seis semanas em relação ao pico de precipitação na bacia devido a sua grande dimensão e complexidade hidráulica. Segundo Arnesen (2012), o pulso de inundação se origina da precipitação nas nascentes do rio Amazonas, quando as massas de ar encontram a Cordilheira dos Andes e ganham magnitude a jusante da bacia hidrográfica, gerando chuvas tropicais.

A Figura 10 representa a sazonalidade hídrica do Rio Amazonas, lagos e seus afluentes entre os anos de 2016 e 2017 através de imagens SAR nas polarizações VH e VV. A primeira imagem temporal do mês de janeiro apresenta o menor volume de corpos d'água, mostrando a perenidade do rio Amazonas e lagos em períodos de estiagem. A segunda imagem de abril representa um período de transição, após 4 meses há uma mudança significativa no volume dos corpos d'água, onde áreas de menor altitude, várzeas e afluentes inundam. Na terceira imagem, mês de junho, ocorre o pulso máximo de inundação, transbordando os corpos d'água pela planície. As maiores planícies inundadas permanecem com praticamente o mesmo volume hídrico por um período de 3 meses (junho, julho e agosto). A área inundada permanece até meados do mês de setembro quando começa a diminuir o volume de água até atingir a menor área inundada no início do mês de dezembro, conforme a quarta imagem.

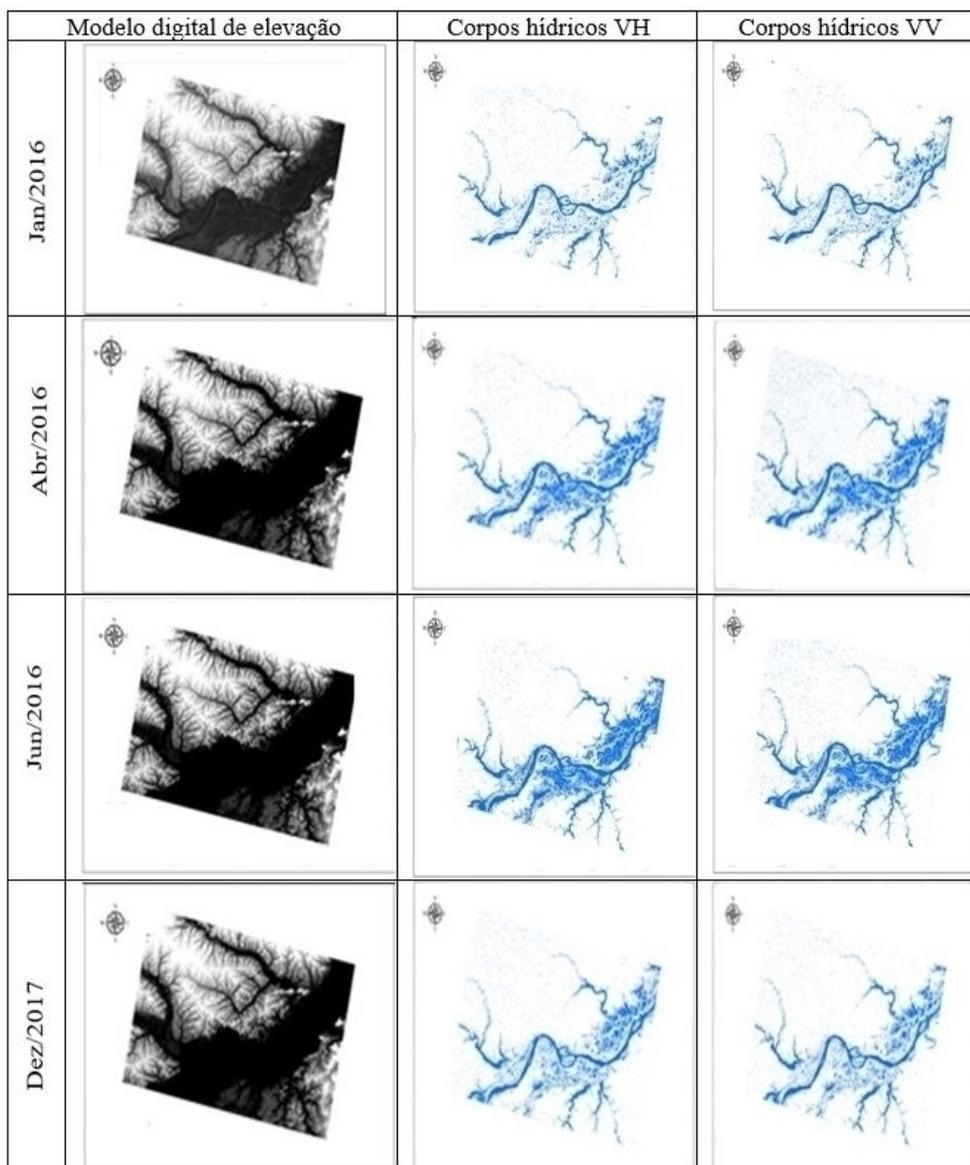


Figura 10 - Mapa sazonal do pulso de inundação no rio Amazonas e afluentes, em Janeiro do ano de 2016, Abril, Junho e Dezembro de 2017.

A elevação mínima na régua fluviométrica foi de 43 cm referente à imagem de 02/11/2017, e a altura máxima foi de 902 cm na imagem de 17/06/2019. No entanto, a média geral foi de 551 cm, comprovando a perpetuidade regional e volume considerável de água (Tabela 5). O menor valor de elevação registrado na régua não representou a menor área inundada na imagem SAR; em contraste, o maior valor de elevação correspondeu à maior área de inundação.

Data da Imagem	Cota na Estação (cm)	Área inundada km ² (VH)	Área inundada km ² (VV)	Diferença km ² (VH - VV)
26/09/2016	199	3.212,59	3.910,69	698,10
02/10/2016	170	4.129,09	3.422,44	306,56
14/10/2016	87	3.592,33	3.112,97	479,36
07/11/2016	78	3.701,88	3.266,90	434,98
19/11/2016	79	2.664,99	3.235,6	570,61
13/12/2016	47	3.401,88	3.000,81	401,07
25/12/2016	106	3.059,75	2.868,59	191,16
06/01/2017	260	3.197,43	3.359,09	361,69
30/01/2017	480	3.775,88	3.342,51	433,37
11/02/2017	576	4.225,88	3.759,72	466,16
19/03/2017	748	5.268,08	4.543,67	724,41
31/03/2017	788	5.066,78	4.678,20	388,58
12/04/2017	824	5.401,88	4.874,62	527,26
24/04/2017	850	5.896,42	5.824,30	72,12
18/05/2017	882	5.705,13	5.823,14	35,71
30/05/2017	869	6.103,67	5.861,76	251,91
11/06/2017	859	5.614,82	5.791,11	176,29
23/06/2017	833	6.106,08	6.070,37	118,01
05/07/2017	813	5.683,88	5.433,12	250,76
17/07/2017	780	5.307,53	5.960,31	652,78
10/08/2017	683	5.087,18	5.866,05	778,87
22/08/2017	602	5.311,51	5.791,85	480,34
03/09/2017	467	4.952,00	4.701,58	250,42
15/09/2017	290	4.692,09	5.077,95	385,86
09/10/2017	58	4.168,87	3.599,52	569,35
02/11/2017	43	3.891,61	3.300,61	591
14/11/2017	88	3.463,89	4.276,77	812,88
08/12/2017	175	3.601,09	3.425,46	175,63
20/12/2017	202	3.310,32	3.069,68	240,64

Tabela 5.1 - Área inundada mensurada em km² por meio da série temporal das imagens Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

Data da Imagem	Cota na Estação (cm)	Área inundada km ² (VH)	Área inundada km ² (VV)	Diferença km ² (VH - VV)
01/01/2018	267	3.655,50	3.220,09	435,41
13/01/2018	349	3.794,80	3.618,55	176,25
25/01/2018	411	3.773,86	3.221,76	552,1
06/02/2018	481	3.861,34	3.881,44	20,1
18/02/2018	551	3.837,37	3.481,74	355,63
02/03/2018	605	4.792,88	3.943,44	849,44
14/03/2018	629	4.588,23	4.001,19	587,04
26/03/2018	636	4.649,36	4.359,04	290,32
07/04/2018	663	5.104,47	4.414,60	689,87
19/04/2018	703	4.836,75	4.815,49	21,26
01/05/2018	743	5.246,10	5.051,08	195,02
13/05/2018	790	5.387,74	5.216,44	171,3
12/07/2018	862	5.193,88	5.291,67	97,79
17/08/2018	738	5.095,88	5.010,89	84,99
22/09/2018	379	4.601,88	4.801,89	200,01
16/10/2018	105	4.201,88	4.078,88	123
21/11/2018	82	3.801,64	3.548,88	252,76
15/12/2018	154	3.401,54	3.779,66	378,12
08/01/2019	353	3.849,88	3.755,65	56
01/02/2019	536	3.543,13	3.771,54	228,41
09/03/2019	693	4.721,21	4.603,88	118
14/04/2019	760	5.201,78	5.287,76	85,98
08/05/2019	894	6.553,21	6.414,89	138,31
17/06/2019	902	6.611,86	6.443,19	158,67
07/07/2019	818	5.801,46	5.956,53	155,07
12/08/2019	674	5.331,24	5.655,79	324,55
29/09/2019	333	4.507,06	4.235,17	271,89
11/10/2019	105	4.203,9	4.101,9	102
16/11/2019	83	3.375,55	3.575,45	199,9
10/12/2019	137	3.424,12	3.260,83	163,29
15/01/2020	341	3.526,74	3.762,71	235,97
08/02/2020	536	3.902,81	3.813,67	89,14

Tabela 5.2 - Área inundada mensurada em km² por meio da série temporal das imagens Sentinel 1-SAR nas polarizações VH e VV.

Alguns meses apresentaram aumento ou diminuição repentina no valor da cota da régua, mas pouca mudança ocorreu na área inundada, inferindo que a extensão das enchentes não está relacionada apenas ao rio Amazonas, mas também aos seus afluentes. Os valores medidos da área inundada através das polarizações VH e VV mostraram padrões temporais aproximados da água, e as menores diferenças aconteceram durante os períodos de inundação.

Na série histórica, as imagens de polarização VH obtiveram as maiores áreas inundadas no período de cheia. Clement et al., (2018) ao analisar 13 cenas Sentinel-1 na região de Yorkshire, Reino Unido, também obtiveram maiores áreas inundáveis com a polarização VH. Conforme Frota (2019), área inundada do rio Negro usando imagens Sentinel-1 na polarização VH (2016 a 2017) obteve valores superestimados.

Em geral, as duas polarizações apresentaram resultados compatíveis com o padrão hídrico, sendo um potencial para a definição de áreas inundadas. Da mesma forma, Hess et al. (2015) analisaram a dinâmica de inundação e obtiveram bons resultados na distinção de áreas úmidas através de imagens

temporais de SAR.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS ÁREAS INUNDADAS

A correlação entre as áreas úmidas obtidas pelas imagens SAR nas polarizações VH e VV para o período estudado obteve um R de 0,89 (figura 11). No período seco, áreas com água variando de 2 a 3 km², apresentaram maior divergência entre as duas polarizações. As áreas úmidas acima de 6 km² apresentam maior similaridade, posicionados próximos a uma linha reta. O teste t de Student indicou normalidade entre amostras independentes, confirmando a hipótese de similaridade estatística com valor t de 0,70 e t crítico bicaudal de 1,99.

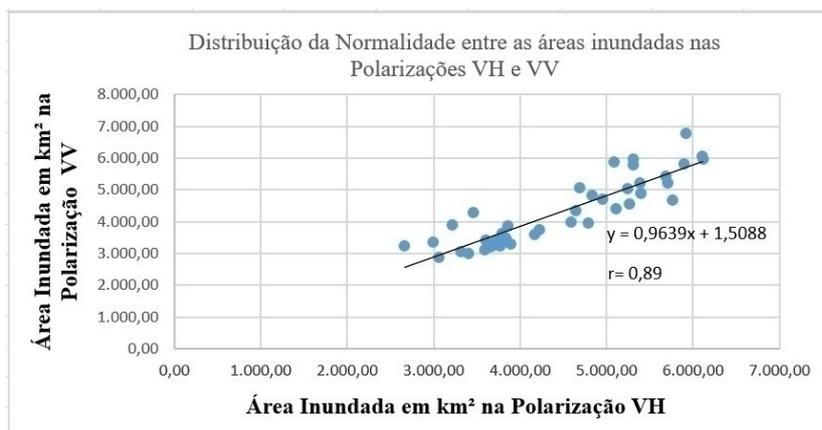


Figura 11 - Regressão linear entre as áreas inundadas entre as polarizações VH e VV.

A Figura 12 apresenta as regressões entre o nível d'água na régua de Parintins (AM) e as áreas inundadas obtidas pelas imagens das duas polarizações. As retas de regressão de ambos os modelos são similares, obtendo para a imagem VH um R² de 0,79 e para a imagem VV, um R² de 0,64. Barbosa et al. (2006) utilizaram modelos de regressão para estimar as áreas inundadas por meio da altura da régua fluviométrica, batimetria e imagens Landsat TM na várzea do Lago de Grande Curai (AM), obtendo um R² de 0,99, valor superior que o obtido neste estudo provavelmente devido ao maior número de variáveis usadas no modelo.

A regressão entre os valores relativos da régua fluviométrica e as áreas alagadas apresentou as seguintes características: (a) as maiores diferenças absolutas ocorreram com alturas da régua entre 400 cm e 600 cm; (b) as áreas de inundação na polarização VV se ajustaram melhor entre as alturas de régua de 0 a 200 cm; e (c) as áreas de inundação na polarização VH melhor ajusta entre alturas de régua de 600 até 1000 cm.

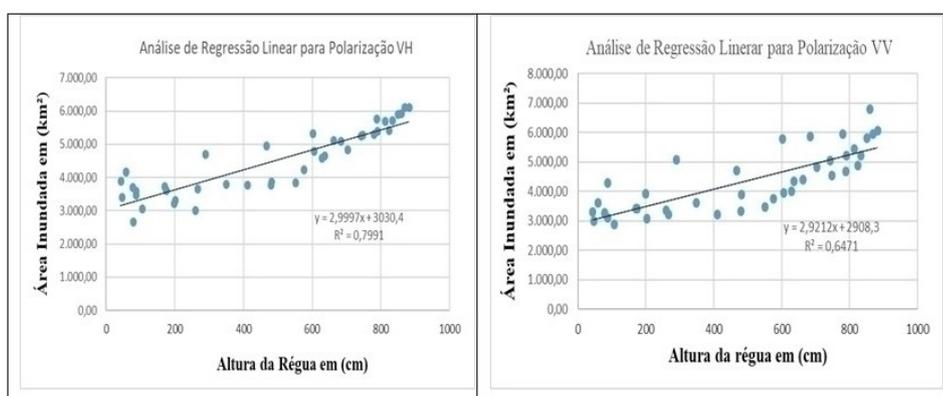
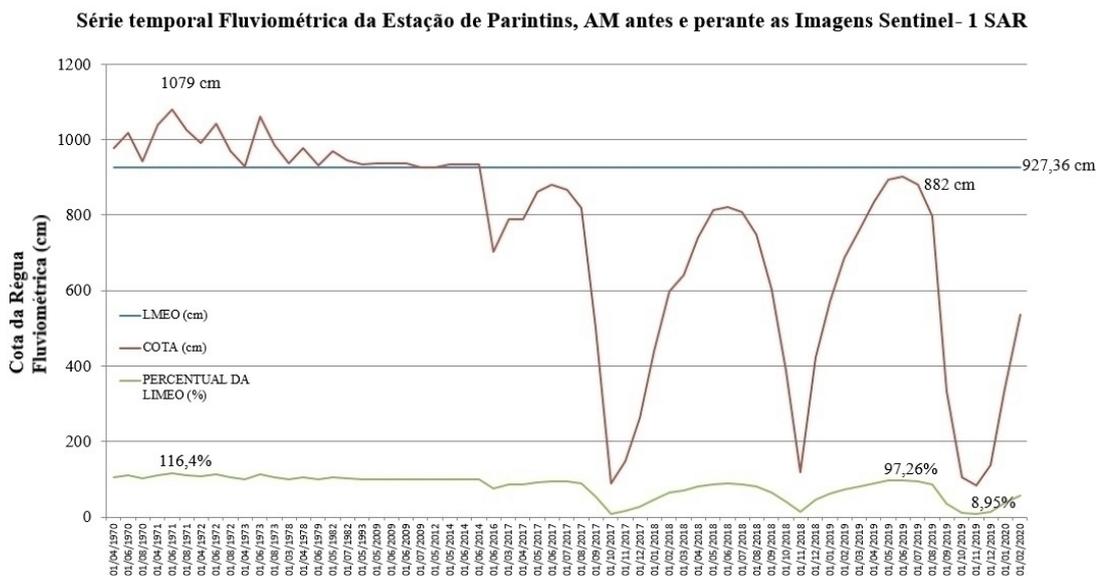


Figura 12 - Modelo de regressão linear relacionado a área inundada nas polarizações VH e VV com a cota altimétrica da régua em Parintins, AM.

ANÁLISE DA LINHA MÉDIA DE ENCHENTE ORDINÁRIA – LMEO

O valor relativo da LMEO observado na régua fluviométrica foi de 927,36 cm. Os eventos de chuvas fortes e inundações predominaram entre 1970 e 1988, com vários eventos com valores superiores a 927,36 cm. O maior valor medido foi de 1.079 cm em 1º de junho de 1971. Entre julho de 2014 e julho de 2020 (6 anos), as alturas relativas apresentaram os menores valores, consistentemente abaixo de 927,36 cm e com queda brusca em junho de 2016 (Figura 13).



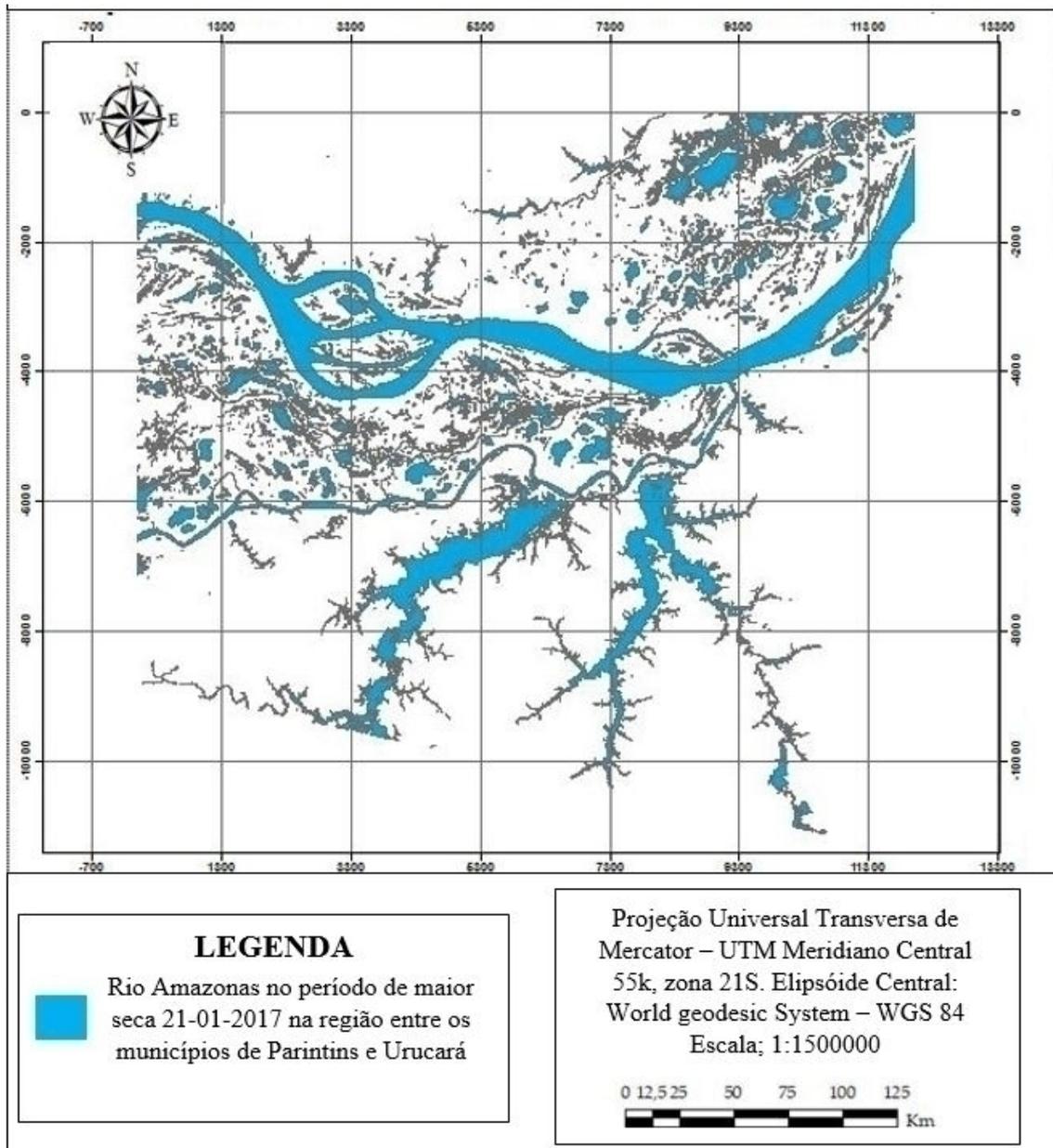


Figura 14 – Mapa das áreas inundadas em trecho do rio Amazonas entre os municípios de Urucara e Parintins na Amazônia central no período de maior seca registrado por meio da série temporal das imagens Sentinel – 1 SAR.

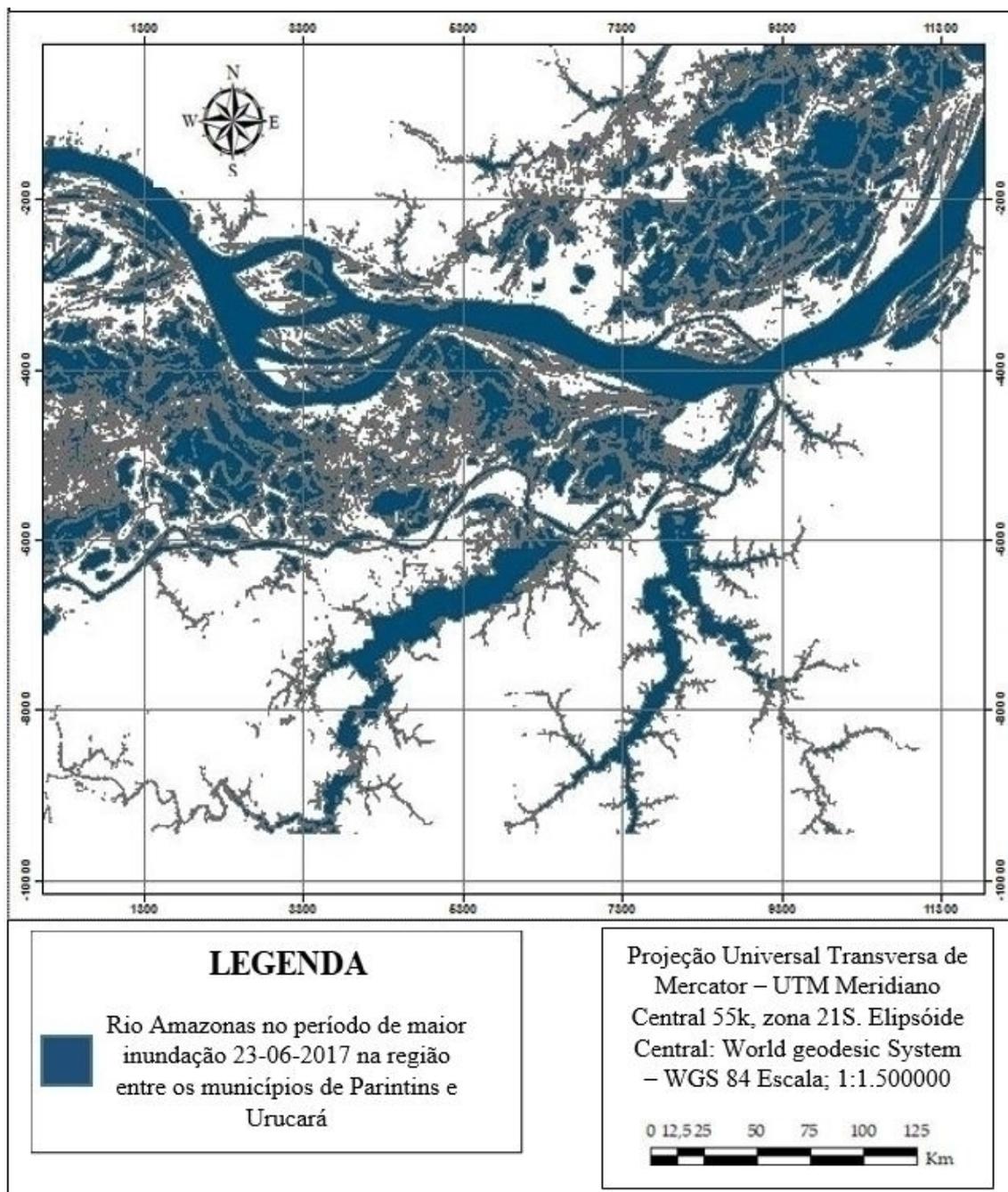


Figura 15 - Mapa das áreas inundadas em trecho do rio Amazonas entre os municípios de Urucara e Parintins na Amazônia central no período de maior inundação registrado por meio da série temporal das imagen Sentinel – 1 SAR.

CONCLUSÃO

Esse estudo inova ao apresentar uma abordagem metodológica para o mapeamento de áreas inundáveis correlacionados a dados de estações meteorológicas, pois comprovou-se ser eficaz no mapeamento de áreas inundáveis provenientes de técnicas de sensoriamento remoto em série temporal de imagens Sentinel -1 SAR. A inexistência de imagens Sentinel-1 SAR anterior ao ano de 2016, quando os eventos de inundação foram superiores a LMEO (927,36 cm) impossibilitou a delimitação da área de inundação da LMEO por meio dos dados SAR. Os modelos de regressão lineares obtidos por meio das polarizações VH e VV apresentaram resultados satisfatórios. Entretanto, as áreas inundáveis

obtidas pelas imagens de polarização VH tiveram maior correlação com a cota fluviométrica (79%) do que pelas imagens de polarização VV (64%). As áreas de inundações mensuradas nas polarizações VH e VV apresentaram uma boa correlação e não significância estatística entre as amostras, presumindo que se pode utilizar tanto as duas polarizações para obtenção de volume hídrico, dinâmica e delimitação de áreas inundáveis na região.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. C. Simulação de Resposta de Estruturas Simplificadas de Vegetação ao Radar de Abertura Sintética Interferométrico. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2008.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MELACK, J. M.; FREITAS, R. M.; FILHO, W. P. Metodologia de análise da dinâmica de área e volume inundável: o exemplo da Várzea do Lago Grande de Curuai. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, p. 03-24, 2006.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 1998.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SAMPAIO, C. S.; SILVA, N. C.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Classificação de Padrões de Savana usando assinaturas temporais NDVI do Sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 4, p. 505-507, 2008.
- CHANG, J.; HANSEN, M. C.; PITTMAN, K.; CARROLL, M.; DIMICELI, C. Corn and soybean mapping in the united states using MODN time-series data sets. *Agronomy Journal*, v. 99, n. 6, p. 1654-1664. 2007.
- CLEMENT, M. A.; KILSBY, C. G.; MOORE, P. Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, v. 11, p. 152-168, 2018.
- DALLEMAND, J. F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R. K.; SCHUMANN, R. Radar Imagery. Theory and Interpretation (Lecture Notes). Roma: FAO, 118 p. 1993.
- DONG, Y. M.; MILNE, A. K.; FORSTER, B.; C. Segmentation and Classification of Vegetated Areas Using Polarimetric SAR Image Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 2, p. 321-329, 2001.
- EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. Disponível em:
< <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>>. Acesso em: 07 de Jan. 2019.
- FERREIRA, G. H. S. Identificação de áreas inundáveis na porção sul de Roraima com auxílio de imagens de Radar. Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2018.
- FORKUOR, G.; CORAND, C.; THIEL, M.; ULMANN, T.; ZOUNGRANA, E. Integration of Optical and Synthetic Aperture Radar Imagery for Improving Crop Mapping in Northwestern Benin, West Africa. *Remote Sensing*, v. 6, n. 7, p. 6472-6499, 2014.
- FROTA, S. M. N. Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A). Dissertação (Mestrado). Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2019.
- FURTADO, L. F. A.; SILVA, T. S. F.; NOVO, E. M. L. M. Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands. *Remote Sensing of Environment*, v. 174, p. 212-222, 2016.
- GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da fusão pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência*, v. 8, n.1, p. 61-71, 2012.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; AFFONSO, A. G.; BARBOSA, C.; GASTIL-BUHL, M.; NOVO, E. M. L. M. Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. *Wetlands*, v. 35, p. 745-756, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 25 abr. 2020.

JUNK, W. J. *The Central Amazon Floodplain - Ecology of a Pulsing System*. New York: Springer, 1997. 525p.

LEE, J. S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 2, n. 2, p. 165-168, 1980.

LEE, J. S.; POTTIER, E. *Polarimetric SAR Radar Imaging: From Basic to Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 422p.

MANSOURPOUR, M.; RAJABI, M. A.; BLAIS, J. A. R. Effects and performance of speckle noise reduction filters on active radar and SAR images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 1, p. 1-9 2006.

MARINHO, R. R.; PARADELLA, W. R.; RENNO, C. D.; OLIVEIRA, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: Mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 64, p. 317-330, 2012.

MARQUES, J. B. *Uso de Série temporal de imagens PALSAR-2/ALOS 2 para classificação de uso e cobertura do solo e detecção de áreas úmidas na região da Ilha do Bananal, trecho médio do Rio Araguaia. Dissertação (Mestrado)*. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2017.

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote Sensing of the Distribution and Extent of Wetlands in the Amazon Basin. *Amazonian Floodplain Forests. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Dordrecht Springer, v. 210, p. 43-59, 2010.

PAPA, F.; PRIGENT, C.; AIRES, F.; JIMENEZ, C.; ROSSOW, W. B.; MATTHEWS, E. Interannual variability of surface water extent at global scale. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, n. 112, p. 1-17, 2010.

SANTOSO, A. W.; BAYUAJI, L.; TIEN SZE. L.; LATEH, H.; ZAI, J. M. Comparison of Various Speckle Noise Reduction Filters on Synthetic Aperture Radar Image. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 11, p. 8760-8767, 2016.

RAMALHO, E. E.; MACEDO, J.; VIEIRA, T. M.; VALSECCHI, J.; CALVIMONTES, J.; MARMONTEL, M.; QUEIROZ, H. L. Ciclo hidrológico nos ambientes de várzea da reserva de desenvolvimento sustentável Mamirauá – Médio rio Solimões, período de 1990 A 2008. *UAKARI*, v. 5, n.1, p. 61-87, 2009.

SECRETARIA DO PATRIMÔNIO DA UNIÃO - SPU. *Orientação Normativa que disciplina a demarcação de terrenos marginais e seus acréscidos (ON-GEADE-03)*. Relatório, 2001. Disponível em: . Acesso em: jun. 2018.

TELLO, M.; LOPEZ-MARTINEZ, C.; MALLORQUI, J. J. Automatic vessel monitoring with single and multidimensional SAR images in the wavelet domain. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 61, p. 260-278, 2006.