

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

Instituto de Ciências Humanas - IH

Departamento de Geografia - GEA

**USO DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR SENTINEL-1 SAR NA ANÁLISE DE
ÁREAS INUNDÁVEIS NOS RIOS MADEIRA E CANUMÃ NO ESTADO DO
AMAZONAS, BRASIL**

Daniel da Silva Cardoso

Brasília-DF

2023

Daniel da Silva Cardoso

**USO DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR SENTINEL-1 SAR NA ANÁLISE DE
ÁREAS INUNDÁVEIS NOS RIOS MADEIRA E CANUMÃ NO ESTADO DO
AMAZONAS, BRASIL**

Monografia apresentada ao Departamento de
Geografia da Universidade de Brasília - UnB,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Brasília-DF
2023

Daniel da Silva Cardoso

**USO DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR SENTINEL-1 SAR NA ANÁLISE DE
ÁREAS INUNDÁVEIS NOS RIOS MADEIRA E CANUMÃ NO ESTADO DO
AMAZONAS, BRASIL**

Monografia apresentada ao Departamento de
Geografia da Universidade de Brasília - UnB,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior (Orientador)

Dr. Ivo Augusto Lopes Magalhães (externo da UnB)

Dr. Anesmar Olino de Albuquerque (Pós-doutorando da UnB)

Brasília- DF

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- ao meu orientador, o prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior, por sua dedicada orientação e vasto conhecimento transmitido durante o desenvolvimento deste trabalho acadêmico;
- ao Anesmar, por sua valiosa contribuição/instrução durante todo o processo de processamento de dados.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. ÁREA DE ESTUDO	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Aquisição de dados	13
3.2. Pré Processamento de Imagens	13
3.3. Elaboração da Máscara da Cobertura de água	17
3.4. Cálculo da Frequência Relativa de Inundação	18
4. RESULTADOS	19
4.1 Comportamento da Frequência de Inundação para a Área de Estudo	19
4.2. Comportamento dos Dados Fluviométricos e das Áreas Inundadas de Máxima e Mínima	20
4.3. Padrões de Inundações Específicos ao longo do Rios Madeira e Canumã	22
5. DISCUSSÃO	26
6. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica das áreas inundadas utilizando a série temporal Sentinel-1 SAR em um trecho da Amazônia que engloba o rio Madeira e seu afluente, o rio Canumã, no período entre 06 de janeiro de 2018 e 28 de dezembro de 2021. O pré-processamento da série temporal Sentinel-1 SAR nas polarizações VV e VH considerou as seguintes etapas: aplicação dos dados orbitais; remoção de ruído térmico; remoção de ruído de borda; calibração; filtragem de manchas (ruído Speckle utilizando o filtro Lee 3x3); correção de terreno alcance-Doppler a partir do modelo digital de terreno SRTM; e conversão linear para decibéis (dB). A frequência de inundação utilizados na análise deste trabalho final foram: 10 a 30%; 30 a 50%; 50 a 70%; 70 a 90%; 90 a 100%. A utilização destes intervalos foi importante para identificar os níveis de inundação mais frequentes em cada zona, bem como para comparar as mudanças na frequência de inundação ao longo do tempo. Utilizou-se dados das estações Fluviométricas e Pluviométricas do município de Borba para que pudesse ser feito a comparação com os períodos de cheia e de seca. Foi observado que a polarização VV consegue distinguir melhor as áreas de 50% a 70% e de 70% a 90%. Enquanto a polarização VH consegue fazer uma distinção melhor nas áreas de 10 a 30%. Porém, os resultados da medição de áreas inundadas com as polarizações VV e VH mostraram uma variação de apenas 1 a 2% nas áreas mapeadas.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto; Radar; Mapeamento de Corpos Hídricos; Rio Madeira; Rio Canumã.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the dynamics of flooded areas using the Sentinel-1 SAR time series in a section of the Amazon that includes the Madeira River and its tributary, the Canumã River, between January 6, 2018 and December 28, 2021. The preprocessing of the Sentinel-1 SAR time series in VV and VH polarizations included the following steps: application of orbital data; removal of thermal noise; removal of edge noise; calibration; speckle filtering (using the Lee 3x3 filter); range-Doppler terrain correction using the SRTM digital terrain model; and linear conversion to decibels (dB). The flood frequency used in this work were: 10 to 30%; 30 to 50%; 50 to 70%; 70 to 90%; 90 to 100%. The use of these intervals was important to identify the most frequent flood levels in each zone, as well as to compare changes in flood frequency over time. Data from the Fluviometric and Pluviometric stations of the Borba municipality were used to compare flood and dry periods. It was observed that the VV polarization can better distinguish areas from 50% to 70% and from 70% to 90%. While the VH polarization can better distinguish areas from 10% to 30%. However, the results of the measurement of flooded areas with VV and VH polarizations showed a variation of only 1 to 2% in the mapped areas.

Keywords: Remote sensing; Radar; Mapping of Water Bodies; Madeira River; Canumã River.

1. INTRODUÇÃO

A compreensão da distribuição espacial dos corpos d'água é um fator crítico para o inventário de áreas inundadas (REBELO *et al.*, 2009; MAHDAVI *et al.*, 2017; AMANI *et al.*, 2021), por ajudar na formulação de modelos hidráulicos (MUSA *et al.*, 2015; YAN *et al.*, 2015); na previsão de enchentes (GRIMALDI *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2016; MUNAWAR *et al.*, 2022); e no monitoramento e avaliação de risco de desastres (KABENGE *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2019; WANG & XIE, 2018). Além disso, os ambientes de inundação promovem uma variedade de serviços ecológicos, tais como: ciclagem de nitrogênio e carbono, redução de gases de efeito estufa, renovação da água e redução da poluição (EVANS *et al.*, 2010). Com o aumento da população e a exploração insustentável dos recursos naturais, aumentam os processos de degradação dos ambientes de inundação, devido a alteração da dinâmica hídrica, reciclagem de nutrientes e qualidade da água (ALL & NELSON, 2008).

A identificação das áreas inundadas a partir de trabalhos de campo e estações hidrológicas requer alto custo de tempo e recursos financeiros, principalmente na Amazônia devido à dificuldade de acesso. Neste contexto, o mapeamento a partir de sensoriamento remoto se torna vantajoso por permitir a aquisição de dados sistemáticos e periódicos ao longo tempo com baixo custo, permitindo a compreensão da dinâmica fluvial a partir de uma visão sinóptica da superfície terrestre (PALMER *et al.*, 2015; MORADI *et al.*, 2017; CARVALHO JÚNIOR, 2018). A alta disponibilidade dos sensores orbitais permite uma grande quantidade de dados para o mapeamento das áreas inundáveis considerando dados de radar e óptico (JONES *et al.*, 2009).

Dentre os sensores ópticos, as imagens do tipo LANDSAT têm sido bastante utilizadas no mapeamento de áreas inundáveis devido às suas propriedades espectrais e extensão histórica (GUO *et al.*, 2017). Entre os processamentos digitais de imagens ópticas, os índices espectrais são umas das principais técnicas para a detecção de água (DENG *et al.*, 2017), e por utilizarem a variação do infravermelho, em que a água apresenta uma alta absorção, se diferenciando entre os alvos terrestres como solo e vegetação que possuem uma alta refletância (HUANG *et al.*, 2014). Alguns dos índices espectrais utilizados são: Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) (XU *et al.*, 2006); Normalized Difference Water Index (NDWI) (MCFEETERS, 1996); Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

(GAO, 1996); Land Surface Water Index (LSWI) (XIAO *et al.*, 2004); e Water Ratio Index (WRI) (SHEN *et al.*, 2010).

No entanto, o uso de imagens ópticas apresenta limitações devido a interferências atmosféricas e cobertura de nuvens, que se torna crônica na região amazônica, havendo períodos no ano que não é possível obter dados (MARTINIS & RIEKE, 2015). Por exemplo, na região do município de Capixaba, Estado do Acre, uma série temporal de imagens MODIS no período de um ano (2014-2015) apresentou aproximadamente 80% das imagens com cobertura de nuvens acima de 90% (SALGADO *et al.*, 2019). Portanto, as observações anuais principalmente na parte norte da bacia Amazônica tornam-se improváveis a partir das imagens ópticas, sendo enfatizado a necessidade de utilizar imagens de sensores radar (ASNER, 2001) Além disso, a qualidade das imagens também fica comprometida pela alta concentração de aerossóis provenientes da queima da biomassa (YAMASOE *et al.*, 2000; BEVAN *et al.*, 2009, REDDINGTON *et al.*, 2019; YUAN *et al.*, 2022). Portanto, a utilização de imagens de radar torna-se a principal ferramenta para o monitoramento no ambiente amazônico, pois a radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas é capaz de atravessar micropartículas de gases na atmosfera, permitindo a obtenção de dados da superfície mesmo em condições de nebulosidade (WHITE *et al.*, 2015). Isso ocorre devido ao comprimento de onda da radiação, que permite a penetração dessas partículas (LEE *et al.*, 1994).

As imagens de radar são amplamente utilizadas no mapeamento dos corpos d'água e áreas inundadas, havendo diversas revisões sobre o tema (HESS *et al.*, 1990; KASISCHKE *et al.*, 1997; SCHMULLIUS & EVANS, 1997; RAMSEY, 1998; DI BALDASSARRE *et al.*, 2011; SCHUMANN & MOLLER, 2015, CARVALHO JÚNIOR, 2018). No caso específico do emprego de imagens de sensoriamento remoto para a região Amazônia, algumas importantes revisões foram feitas (MELACK & HESS, 2010, HALL *et al.*, 2011).

O presente estudo possui como objetivo avaliar os padrões espaciotemporais das áreas inundáveis em um trecho dos Rios Madeira e Canumã através de séries temporais de imagens Sentinel-1 SAR de quatro anos (2018-2021) na polarização VV e VH.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada perto do município de Borba (**Figura 1**), no interior do estado do Amazonas, Região Norte do país. Localizado ao sul de Manaus, limitado pelas coordenadas (lado superior direito: lat -03.2242° long -58.5767° e lado inferior esquerdo: lat 05.231° long -61.1096°). Devido a estar próxima à linha do Equador, o clima da floresta amazônica segundo a classificação climática de Köppen-Geiger é tropical equatorial chuvoso (AF) com suas estações pouco definidas, possuindo um elevado índice de precipitação anual (acima de 2.000mm). A área de estudos possui dois rios principais, o Rio Madeira e seu afluente, o Rio Canumã (**Figura 1**).

O Rio Madeira é o principal tributário do Rio Amazonas em termos de área, vazão e transporte de sedimentos ([LATRUBESSE et al., 2005](#)). O Rio Madeira possui aproximadamente 3.250 quilômetros de extensão e uma área de drenagem de mais de 1,4 milhão de quilômetros quadrados ou 20% da Bacia do Amazonas ([BARTHEM et al., 2014](#)). A vazão do rio varia sazonalmente, com sua maior vazão ocorrendo durante a estação chuvosa (dezembro a maio). Ele é caracterizado por uma extensão transnacional que perpassa o Brasil e a Bolívia e no decorrer do seu curso recebe diversos afluentes, tais como: Abunã, Machado, Marmelos, Manicoré, Aripuanã, Canumã e Acará. Geograficamente, 25% de sua bacia está nos Andes, 27% no escudo amazônico e 48% na planície amazônica ([MAURICE-BOURGOIN et al., 2020](#)).

O rio Madeira é conhecido por sua fauna diversificada de peixes, possuindo 814 espécies de peixes registradas na parte da Amazônia Boliviana ([CARVAJAL-VALLEJOS et al., 2014](#)) e 1.008 espécies registradas na região brasileira ([OHARA et al., 2015](#)). No entanto, muitos estudos constataam a concentração anômala de selênio e mercúrio nos peixes ([BOISCHIO & HENSHEL, 2000](#); [BASTOS et al., 2008, 2015](#)). Um agravante é que o peixe provoca a contaminação de humanos por ser a principal fonte de proteínas e nutrientes essenciais para as populações ribeirinhas/tradicionais ([HACON et al., 2014](#); [MENDES et al., 2021](#)).

O rio também desempenha um papel importante no transporte de mercadorias, com grandes embarcações navegando em suas águas para transportar commodities como soja e minerais ([SUEDEL et al., 2022](#)). No entanto, a construção de barragens hidrelétricas e outros projetos de infraestrutura na região geraram preocupações sobre os impactos potenciais na

ecologia do rio e nos meios de subsistência das comunidades locais (FEARNSIDE 2014a, 2014b, CELLA-RIBEIRO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018). Apesar desses desafios, o rio Madeira continua sendo um ecossistema importante e merecendo esforços para a sua conservação.

O rio Canumã nasce na confluência dos rios Acari e Sucunduri e desagua brevemente no rio Paraná Urariá e assim desemboca no rio Madeira. A coloração do rio Canumã é preta, como os rios Aripuanã e Sucunduri, diferindo do rio Madeira classificado como de águas brancas (cor amarelada e barrenta) (LAGES, 2010). Esse rio é cercado pela floresta amazônica e a sua várzea abriga uma rica e diversificada flora e fauna e possui grande importância socioeconômica para as comunidades locais, fornecendo transporte, alimentos e plantas medicinais. Ao longo do rio Canumã existem diferentes aldeias indígenas (ZANATTA, 2012).

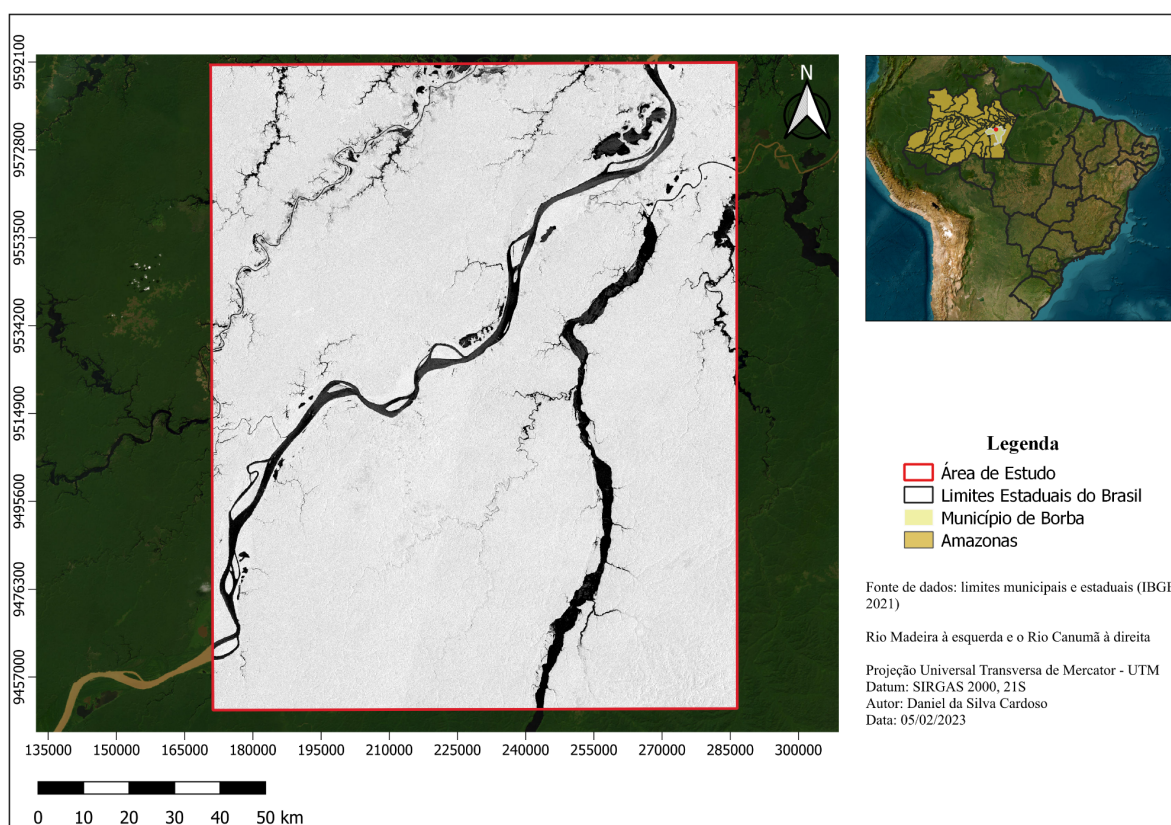


Figura 1. Área de estudo incluindo o Rio Madeira à esquerda e o Rio Canumã à direita.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa possui as seguintes etapas: (a) Aquisição de dados; (b) Pré processamento de imagens; (c) Elaboração da máscara da cobertura de água; e (d) Cálculo da frequência relativa de inundação (**Figura 2**).

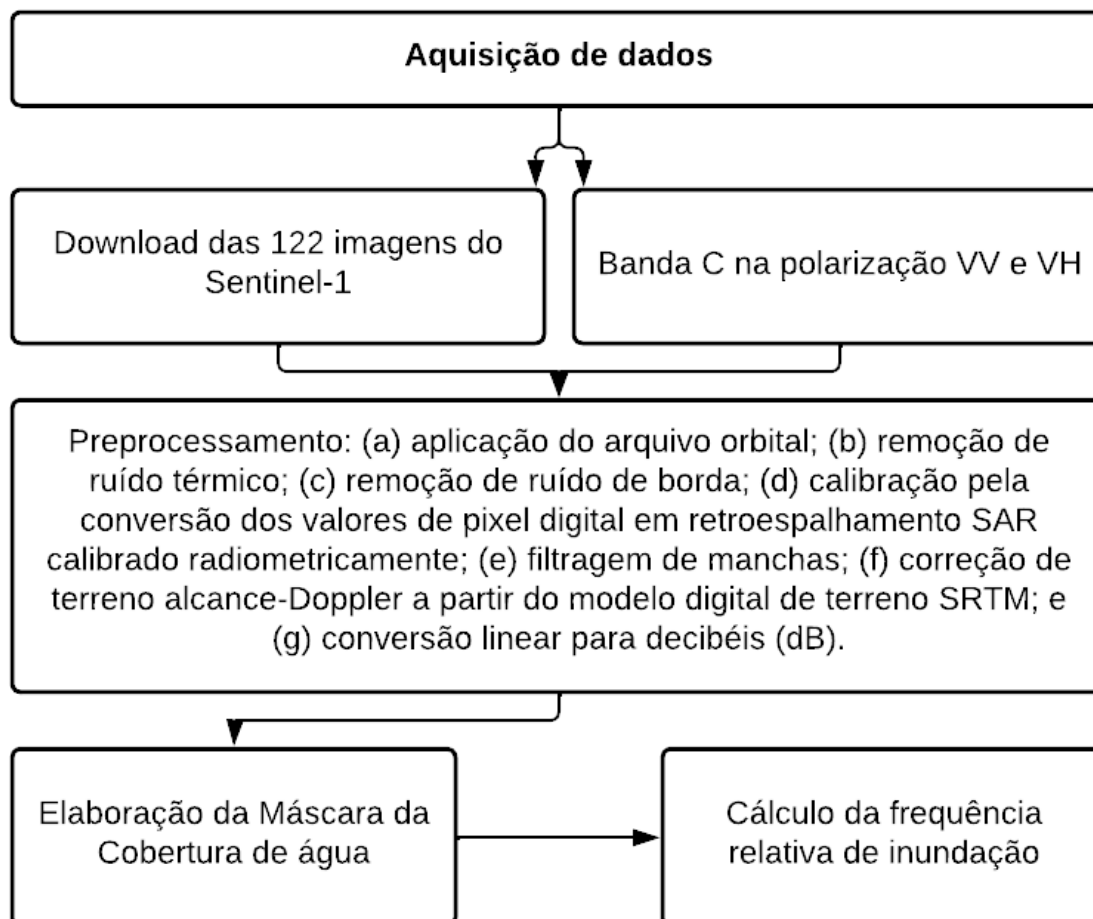


Figura 2: Fluxograma do passo-a-passo metodológico.

Neste trabalho, os resultados foram divididos nas seguintes etapas: (a) comportamento da frequência de inundação para a área de estudo; (b) comportamento dos dados fluviométricos e das áreas inundadas de máxima e mínima; e (c) padrões de inundações específicos ao longo do Rios Madeira e Canumã.

A determinação da porcentagem de área de cada classe de frequência de inundação foi realizada por meio do software ENVI 5.2 (Basic Tools - Statistics - Computer Statistics).

Neste estudo foram utilizados dados das estações fluviométrica (15900000) e pluviométrica (459000) em BORBA (AM) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

3.1. Aquisição de dados

A missão Sentinel-1 (S-1) foi desenvolvida pela cooperação entre o programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) e a *European Space Agency* (ESA) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). O produto utilizado foi o *Ground Range Detected* (GRD) no modo *Interferometric Wide Swath* (IWS), com resolução de 10 m, largura de cena de 250 km, e um ciclo de revisita de 12 dias (TORRES *et al.*, 2012). As imagens S-1 correspondem a banda C (5,4 GHz) nas polarizações VV e VH. O período analisado engloba uma série temporal de quatro anos entre 2018 e 2021 que corresponde a 122 imagens temporais para cada polarização, com um período de revisita de doze dias. O amplo intervalo temporal permite visualizar o comportamento hídrico e as áreas de inundação ao longo do rio.

3.2. Pré Processamento de Imagens

A etapa de pré-processamento utilizou o programa gratuito e de código aberto *Sentinel Application Platform* (SNAP) desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) com vários recursos para o processamento de imagens de satélite, principalmente da constelação de sensores do Sentinel, com portabilidade para diversas plataformas, como Windows, Linux e Mac. O SNAP possui uma interface amigável, permitindo aos usuários criar fluxos de trabalho (workflows) personalizados e suporta o processamento de grandes conjuntos de dados de satélite. O pré-processamento da série temporal consistiu das seguintes etapas (FILIPPONI, 2019): (a) aplicação do arquivo orbital (*Apply Orbit File* - AOF); (b) remoção de ruído térmico (RRT); (c) remoção de ruído de borda; (d) calibração; (e) filtragem do ruído *Speckle*; (f) correção de terreno alcance-Doppler (*Range Doppler Terrain Correction* - RDTC); e (g) conversão linear para decibéis (dB). (Figura 3)

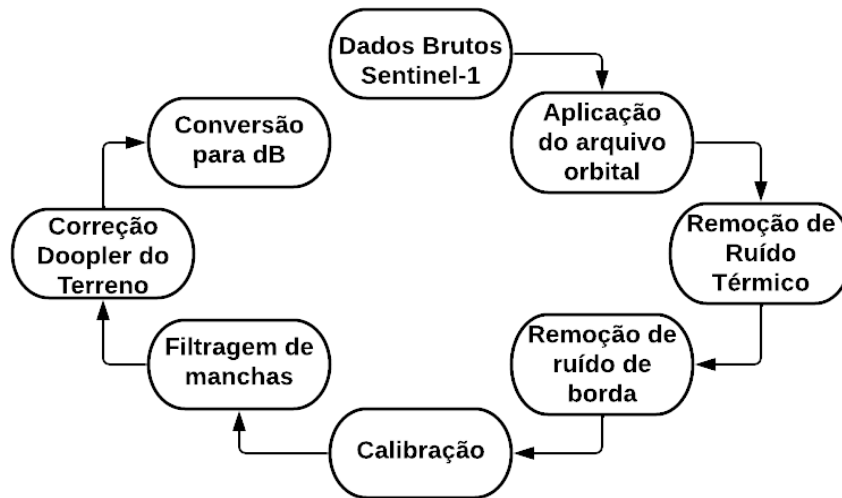


Figura 3. Fluxograma das etapas no SNAP.

O AOF é a primeira etapa do pré-processamento dos dados Sentinel-1 SAR, que realiza a correção dos efeitos de movimento e posição do satélite durante o processo de aquisição de dados a partir de informações precisas da órbita derivadas dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) e outros sistemas de rastreamento. Portanto, o método calcula a posição e velocidade do satélite com alta precisão (FILIPPONI, 2019). O programa SNAP efetua o processamento dessa etapa por download automático dos vetores de estado de órbita atualizados para cada cena SAR, garantindo a precisão das informações georreferenciadas dos produtos e a confiabilidade das análises espaciais.

O sistema SAR é sensível ao ruído térmico que aparece na imagem como variações de textura entre subfaixas, tornando-as distintas e degradando a qualidade da imagem. O ruído térmico possui duas fontes: (a) padrão da antena com variação na direção do alcance; e (b) *Scalloping Noise* com variação ao longo da direção azimutal (MASCOLO *et al.*, 2021). Esse ruído é mais pronunciado nos canais de polarização cruzada (PARK *et al.*, 2017). Portanto, a etapa RRT é aplicada para mitigar os efeitos desse ruído, normalizando o sinal de retrospalhamento entre as sucessivas subfaixas e gerando uma cena inteira homogeneizada a partir do deslocamento constante e um ganho dependente do alcance, incluindo a constante de calibração absoluta. Esse processamento é realizado separadamente para cada polarização dos dados SAR. A etapa RRT é executada nos dados de saída da etapa AOF, a partir da aplicação

da tabela denominada *noise Look-Up Table* (LUT) (descrita em potência linear) e dos resultantes perfis de ruído calibrados (FILIPPONI, 2019).

Outro ruído presente nos produtos de nível 1 do Sentinel-1 são os ruídos de borda, que consistem em diversos artefatos que aparecem nas bordas das imagens. Esses artefatos são predominantemente gerados durante a compressão do azimute e do alcance e da manipulação do tempo de início da janela de amostragem (Sampling Window Start Time - SWST) (ALI *et al.*, 2018). Esses ruídos aparecem como pixels sem valores ou com valores muito baixos provenientes da reamostragem do SWST. Visando remover os dados inválidos nas bordas da cena, o SNAP disponibiliza o algoritmo específico de remoção de ruído de borda como um operador (FILIPPONI, 2019).

A etapa de calibração é realizada para converter os valores de pixel digitais em retroespalhamento SAR radiometricamente calibrado. O produto *Ground Range Detected* (GRD) do Sentinel-1 inclui informações necessárias para aplicar a equação de calibração, permitindo a conversão de valores de intensidade de imagem em valores de ruído de sigma (FILIPPONI, 2019; BENZOUAGH *et al.*, 2021).

Uma importante etapa no processamento dos dados é a filtragem do ruído speckle, que é um tipo de ruído que aparece nas imagens SAR causada pelas interferências construtivas e destrutivas de ondas eletromagnéticas refletidas da superfície terrestre. O ruído speckle aparece como pequenos pontos claros e escuros e pode afetar significativamente a qualidade visual da imagem e prejudicar a interpretação visual das imagens (LEE *et al.*, 1999). O emprego de filtros (Speckle Filtering) visa melhorar a qualidade da imagem a fim de obter uma melhor identificação dos alvos pretendidos (LEE *et al.*, 1994). No SNAP é disponibilizado diferentes métodos para a filtragem do ruído speckle, tais como: Média, Mediana, Frost (FROST, 1982), Gamma Map (LOPEZ-MARTINEZ & MALLORQUI, 2005), Lee (LEE, 1980), Lee Sigma (LEE, 1983), Refined Lee (LEE *et al.*, 2005), e Intensity-Driven Adaptive-Neighborhood (IDAN) (VASILE *et al.*, 2006). O filtro utilizado no pré-processamento do presente trabalho foi o Lee 3x3, para que pudesse ser obtido um melhor resultado na redução do ruído nas polarizações VV e VH (MAGALHÃES *et al.*, 2022).

As variações na altura do terreno podem causar distorções geométricas na imagem SAR provenientes da aquisição de dados com visada lateral com ângulo variável maior do que 0 graus, que são corrigidas na etapa de processamento Range Doppler Terrain Correction (também denominada de correção geométrica do terreno ou *Geocoding*). A etapa de

processamento RDTC envolve várias subetapas, incluindo a estimativa da altura topográfica, a projeção dos dados SAR em um modelo de terreno e a reamostragem dos dados em uma grade regular. O modelo de terreno usado nessa etapa é normalmente derivado de Modelos Digitais de Elevação (MDTs) ou outras fontes de informações topográficas. Na presente pesquisa, utilizou-se os dados da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (WERNER, 2001). Portanto, a etapa RDTC melhora a precisão geométrica das imagens e permite a comparação de dados SAR com outros tipos de informações geoespaciais (MARKERT *et al.*, 2020). O método de ortorretificação Range Doppler para geocodificar cenas SAR do programa SNAP utiliza os seguintes dados: informações do vetor de estado de órbita nos metadados, anotações de temporização do radar e parâmetros de conversão de alcance inclinado para alcance terrestre, juntamente com dados de modelo digital de elevação de referência. O método permite selecionar o sistema de referência de coordenadas (*Coordinate Reference System* - CRS) alvo e ajustá-lo opcionalmente para corresponder à zona UTM dos grânulos sobrepostos do Sentinel-2.

A última etapa do pré-processamento é a Conversão linear para decibéis (dB), onde o coeficiente de retroespalhamento sem unidade é convertido em dB usando uma transformação logarítmica. A conversão dos dados para uma escala logarítmica expressa em dB compacta a faixa de dados e facilita a distinção das feições presentes na imagem e o processo de detecção de mudanças, que seriam difíceis de discernir em uma escala linear.

Por fim, as imagens pré-processadas foram empilhadas formando um cubo temporal (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2006), que foi utilizado na detecção dos corpos d'água. O desenvolvimento do cubo temporal tem sido amplamente utilizado em diferentes trabalhos de séries temporais usando imagens ópticas (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2008, 2015; COUTO JUNIOR *et al.*, 2011) e de radar (BARBOSA *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.*, 2022). As coordenadas geográficas do cubo temporal estão nos eixos “x” (linhas) e “y” (colunas) e o eixo “z” representa a assinatura temporal do retroespalhamento considerando uma sequência crescente dos dias do ano da primeira imagem de 2018 até a última imagem de 2021 (**Figura 4**).

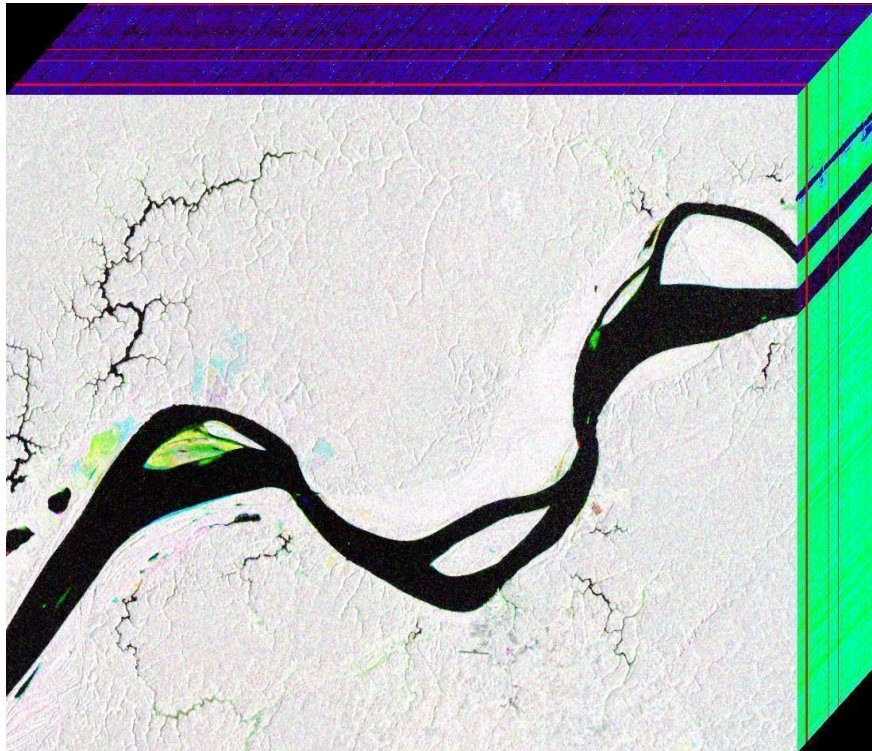


Figura 4. Cubo Temporal constituída pela série temporal de imagens Sentinel-1SAR para o período 2018 a 2021.

3.3. Elaboração da Máscara da Cobertura de água

Os corpos d'água abertos caracterizam por valores baixos de retroespalhamento durante todo o período devido à reflexão especular. Portanto, a adoção de máscaras usando valores limites permitem uma precisa detecção desses alvos. Estudos prévios realizados com o conjunto de dados VH obtiveram maior precisão na detecção de água do que com o conjunto de dados VV na presença de ondas ou água corrente (CLEMENT *et al.*, 2018; TWELE *et al.*, 2016). No entanto, o desempenho da polarização VV pode alcançar melhores desempenhos no mapeamento de corpos d'água em condições de baixo vento e na detecção de derramamento de óleo (MOURA *et al.*, 2022. FINGAS; BROWN, 2014). Na presente pesquisa, o valor limite utilizado foi de -16dB para a polarização VV, e de -20dB para a polarização VH. O programa utilizado para a elaboração da máscara da cobertura de água foi o *Abilius*.

3.4. Cálculo da Frequência Relativa de Inundação

A frequência relativa de inundação foi calculada a partir da média do cubo temporal das máscaras das áreas alagadas, considerando todo o período analisado (2018-2021). Assim, o somatório das imagens das máscaras de água é dividido pelo número total de imagens temporais, tornando o intervalo de valores entre 0 (sem presença de inundação) até 1 (área permanentemente inundada). Para converter os dados em porcentagem, os valores foram multiplicados por 100. Por fim, a imagem de frequência de inundação foi fatiada em cinco intervalos: (a) 10-30%; (b) 30-50%; (c) 50-70%; (d) 70-90%; e (e) 90-100%, objetivando facilitar a análise e comparação das mudanças na frequência de inundação ao longo do tempo. A imagem das classes de fatiamento foi vetorizada para polígonos (conversão *raster* para polígono), facilitando a integração dos resultados com outras informações geoespaciais. Diversos trabalhos utilizam a frequência de inundação a partir de diferentes tipos de imagens, tais como: LANDSAT (THOMAS *et al.*, 2011; PARK *et al.*, 2020), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (HUANG *et al.*, 2014) e imagens SAR Sentinel-1 (UDDIN *et al.*, 2019).

4. RESULTADOS

4.1 Comportamento da Frequência de Inundação para a Área de Estudo

A **Figura 5** apresenta a imagem de frequência de inundação para toda a área de estudo considerando as cinco classes definidas pelos intervalos: 10%-30%, 30%-50%, 50%-70%, 70%- 90% e 90%-100%. O **Quadro 1** demonstra uma pequena variação entre as polarizações VV e VH, na ordem de 1 a 2%, em alguns casos.

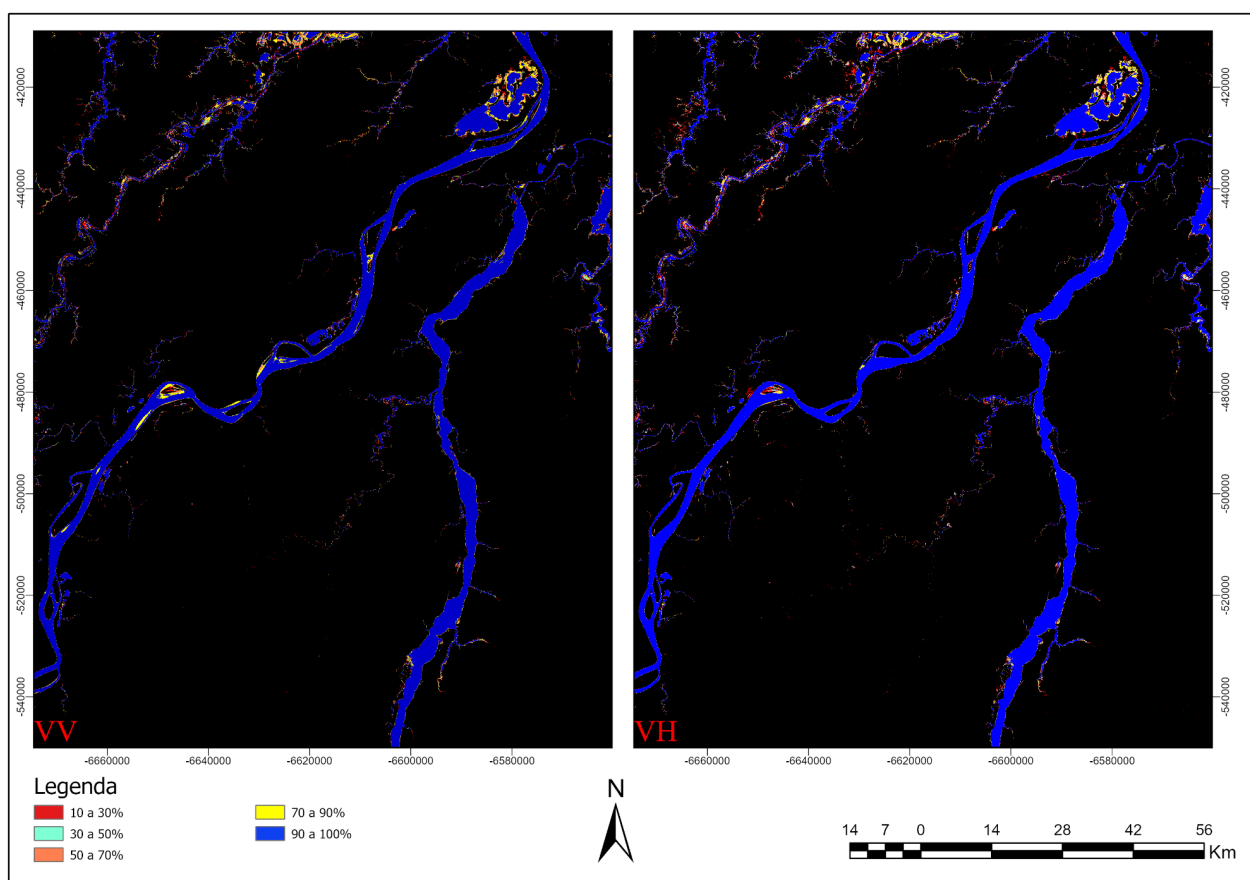


Figura 5. Frequência de inundação para a área total.

Quadro 1. Área das frequências relativas de inundação na área de estudo.

Polarização VH				Polarização VV			
Intervalos das frequências de inundação	Área total	Área inundada em porcentagem	Porcentagem acumulada	Intervalos das frequências de inundação	Área total	Área inundada em porcentagem	Porcentagem acumulada
10 a 30%	99800,9	7.9534%	7.9534%	10 a 30%	72524,4	6.1513%	6.1513%
30 a 50%	52248,7	4.1638%	12.1172%	30 a 50%	46043,3	3.9052%	10.0565%
50 a 70%	50906,5	4.0569%	16.1741%	50 a 70%	49427,2	4.1922%	14.2487%
70 a 90%	64069,5	5.1059%	21.2800%	70 a 90%	78354,6	6.6458%	20.8945%
90 a 100%	987795,5	78.7200%	100.0000%	90 a 100%	932667,2	79.1055%	100.0000%

4.2. Comportamento dos Dados Fluviométricos e das Áreas Inundadas de Máxima e Mínima

A **Figura 6** apresenta os gráficos referentes aos dados da estação fluviométrica (15900000) e estação pluviométrica (459000) em BORBA (AM), utilizando o programa Hidro 1.4 (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/download>) disponível no site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>). A análise no período de 2018 a 2021 demonstrou que o período de maior cheia na área de estudo ocorreu no mês de 02/05/2021, enquanto que o período de maior seca ocorreu no mês de 03/11/2020. Sendo possível observar que na série histórica, após o dia 08/12/2018 ocorreu uma chuva intensa e em função da máxima de precipitação após quatro meses ocorreu o pico máximo de cota.

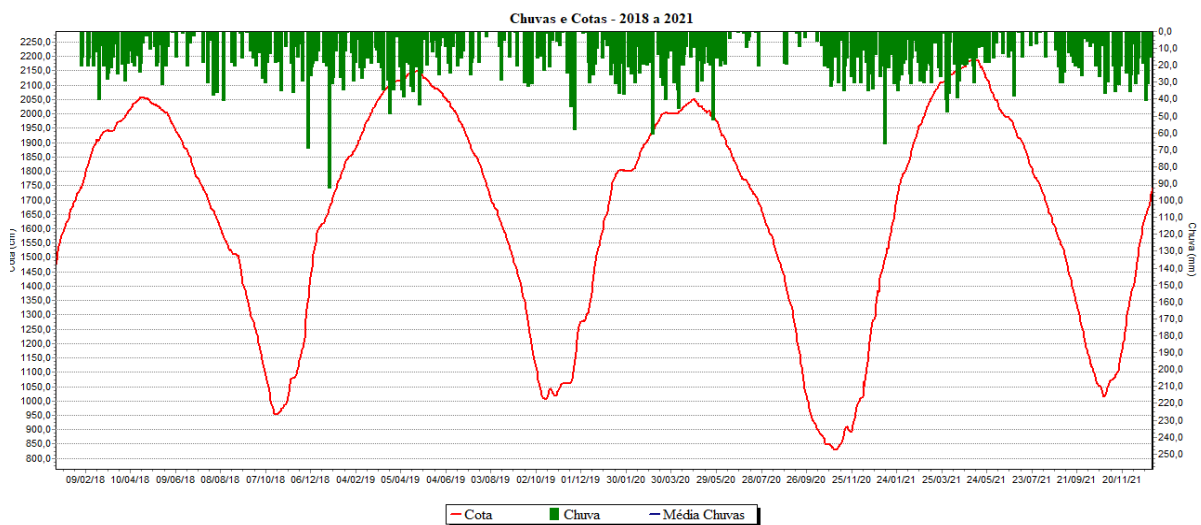


Figura 6: Chuva e Cota do dia 09/02/2018 a 20/11/2021.

Após a análise do gráfico de Chuva e Cota (**Figura 6**), foi possível observar uma paridade entre os dados obtidos das estações fluviométricas e pluviométricas com os períodos de máxima e mínima (**Figura 7**).

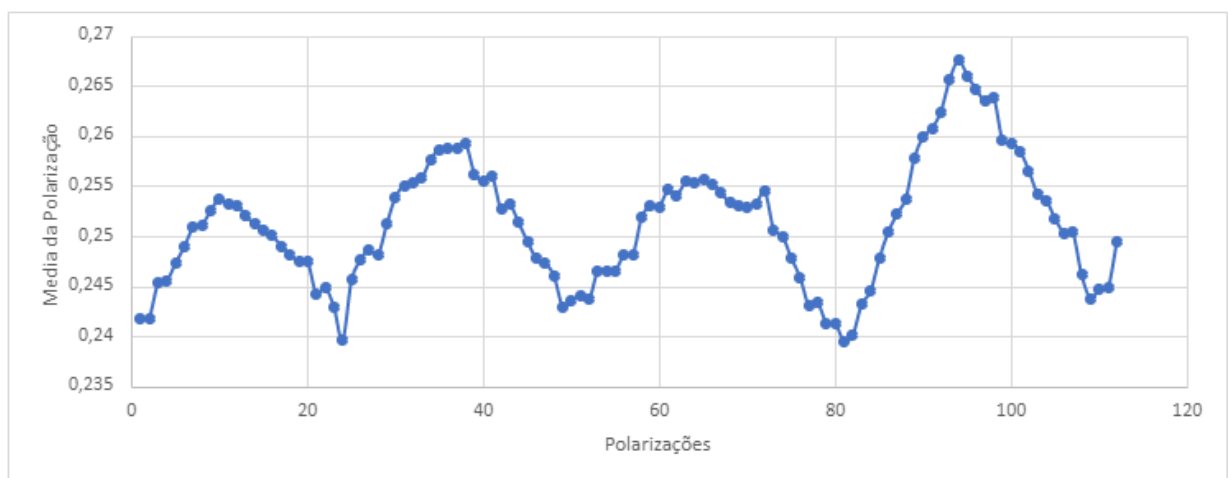


Figura 7: Gráfico referente ao número de bandas do período de 2018 a 2021.

Na **figura 8** observa-se que há uma maior diferença nos canais de segunda ordem e nos trechos do canal principal. Como é possível ver, a diferença do período de seca para o período de cheia se torna bastante visível também ao olharmos a parte superior da figura.

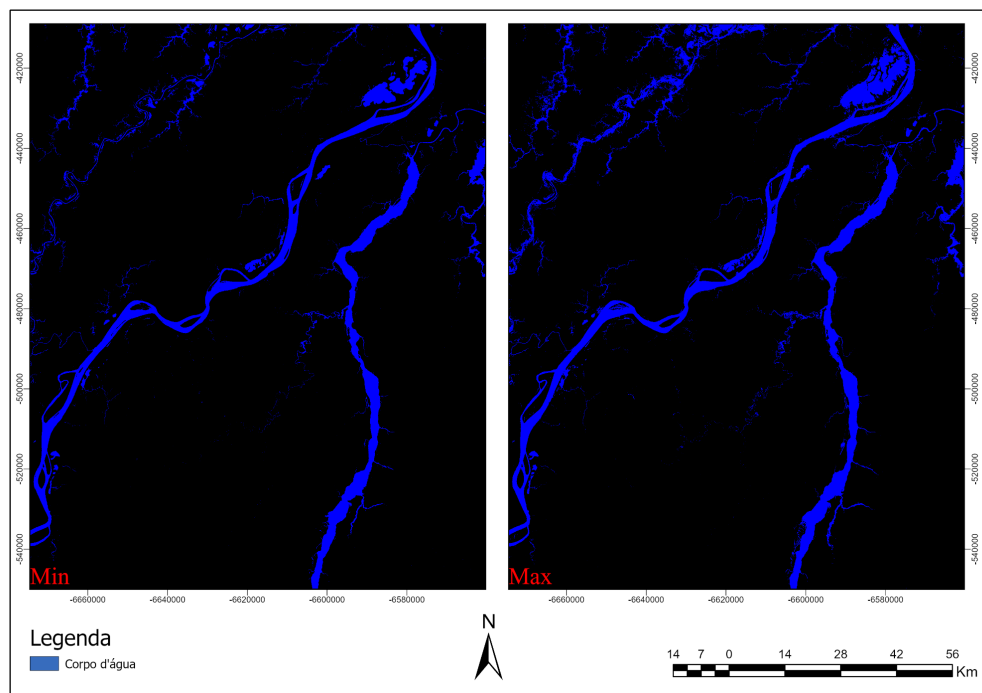


Figura 8: Período de seca e período de cheia da área de estudo.

4.3. Padrões de Inundações Específicos ao longo do Rios Madeira e Canumã

Observa-se que não houve alterações significativas na área linear de ambos os rios. Entretanto, é perceptível que a polarização VV apresentou uma maior capacidade de discriminação das áreas de 50 a 70% e 70 a 90%. Tais mudanças ocorreram em áreas particulares no Rio Madeira, como nas áreas de praia e nos bancos de areia (**Figuras 9, 10 e 11**), que são comuns em ilhas fluviais e que geralmente são mais suscetíveis a inundação.

No que se refere ao Rio Canumã, pode-se observar que as mesmas conclusões se aplicam, uma vez que não foram verificadas grandes variações ao longo do curso do rio, exceto nos bancos de areia e nas áreas de praia, assim, pode-se inferir que a margem esquerda

dos rios comprovou uma maior presença de inundação, talvez por serem áreas de menor altitude (Figuras 12, 13 e 14).

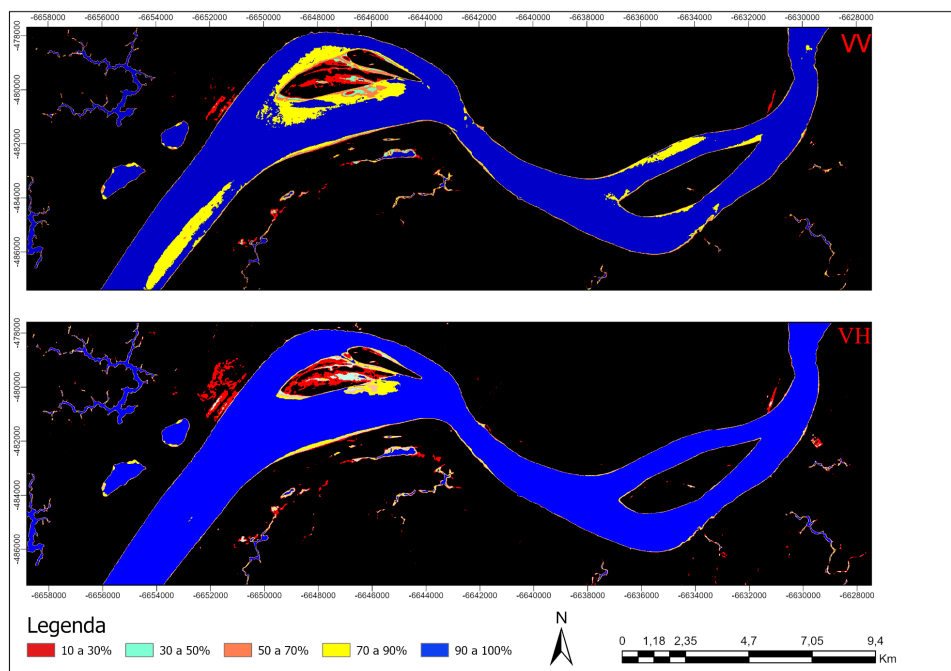


Figura 9: Trecho específico do Rio Madeira.

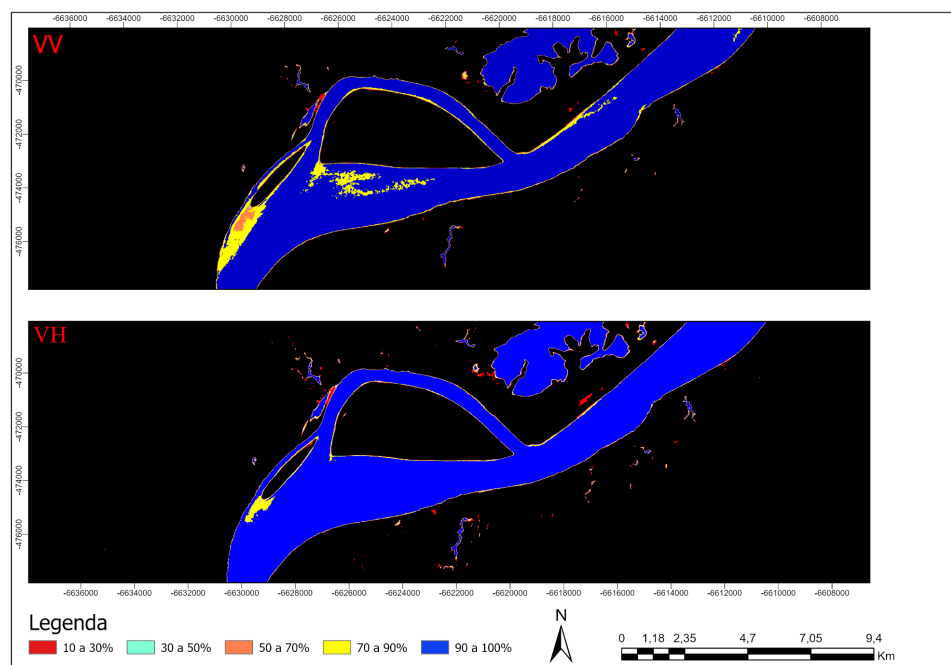


Figura 10: Trecho específico do Rio Madeira.

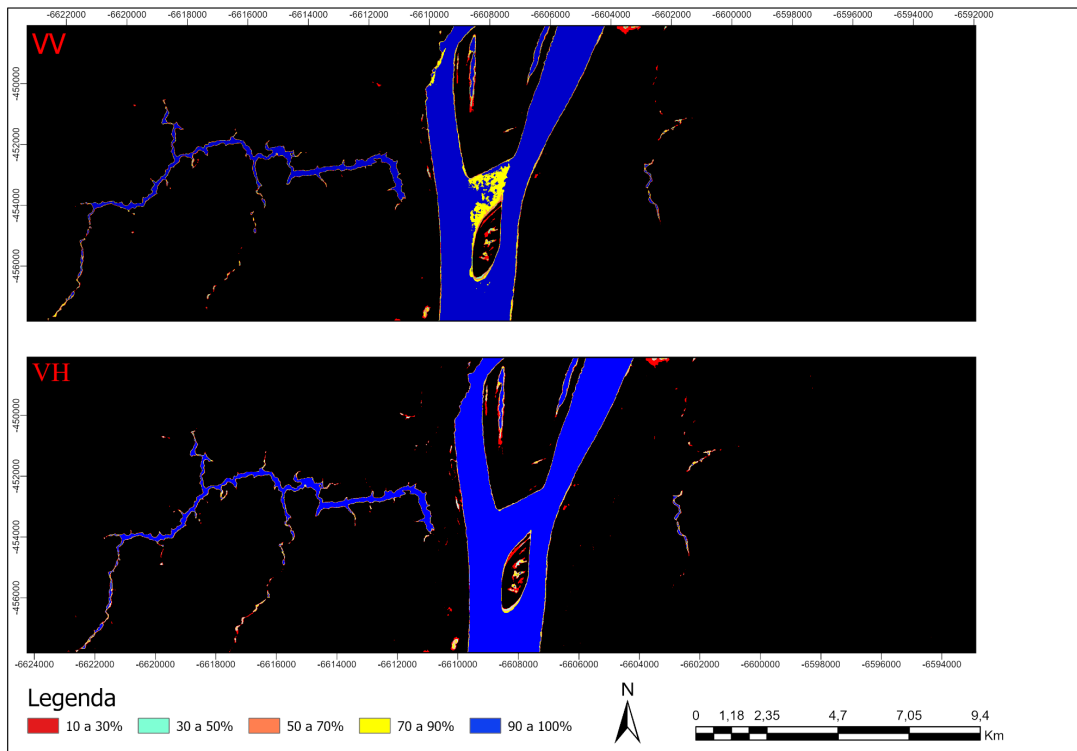


Figura 11: Trecho específico do Rio Madeira.

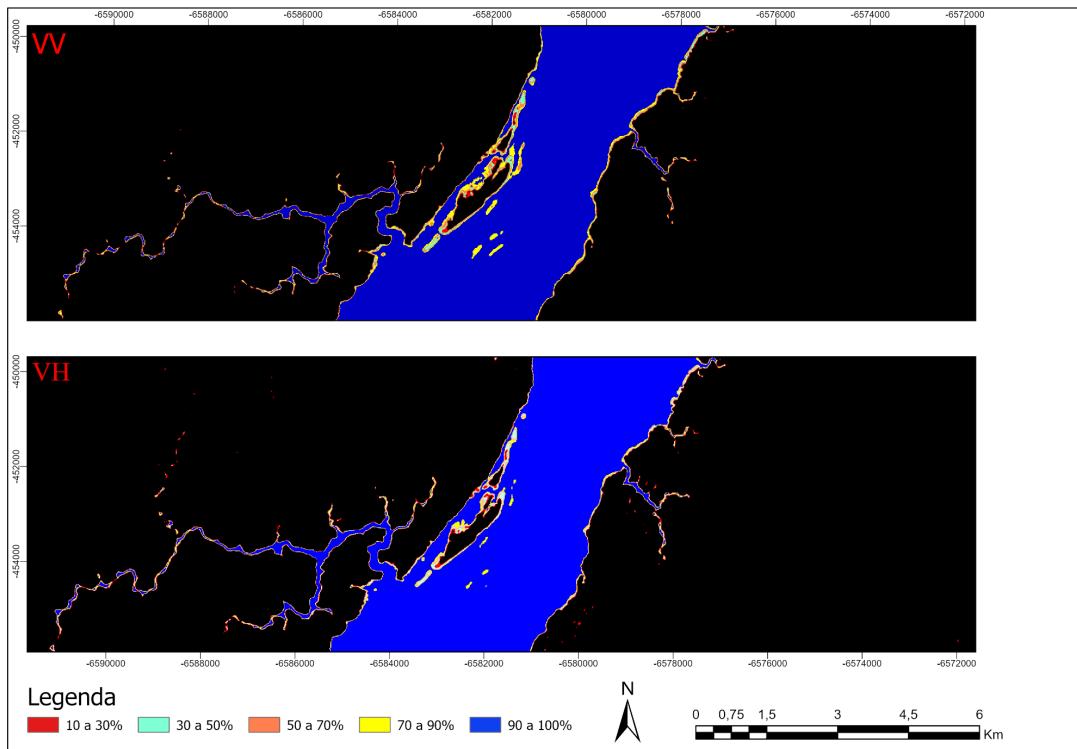


Figura 12: Trecho específico do Rio Canumã.

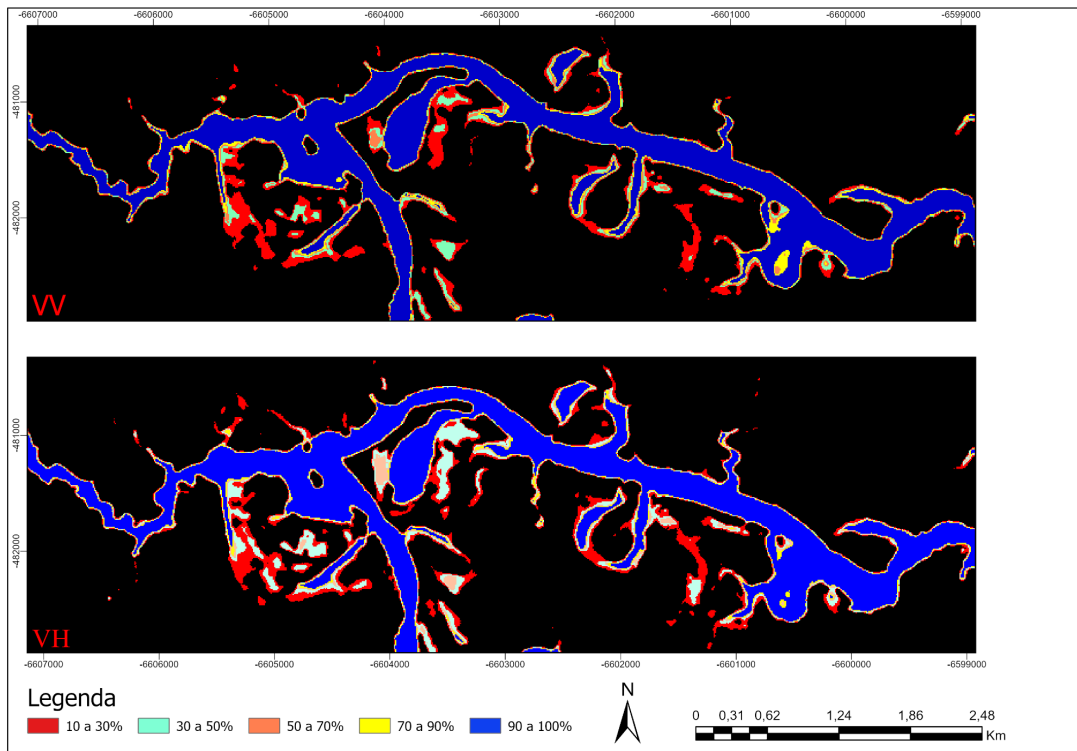


Figura 13: Trecho específico do Rio Canumã.

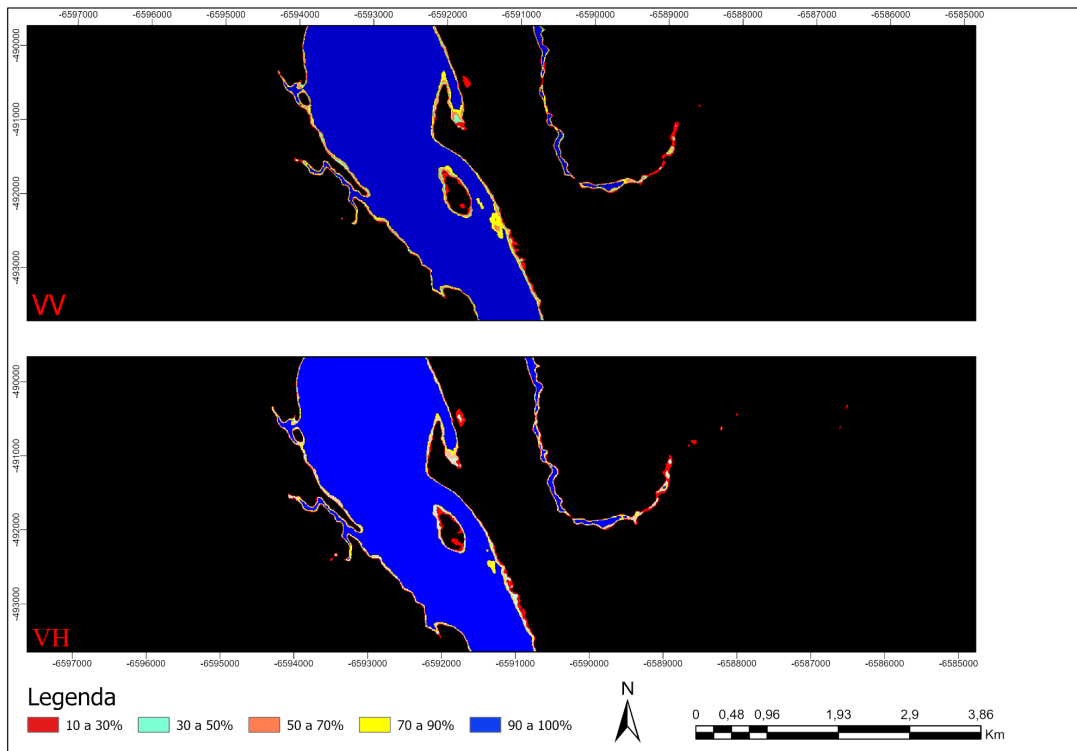


Figura 14: Trecho específico do Rio Canumã.

5. DISCUSSÃO

O Rio Madeira é uma importante fonte de recursos naturais e socioeconômicos na região amazônica. A análise dos dados obtidos no presente estudo demonstrou que as mudanças nas áreas inundadas ocorreram preferencialmente nos bancos de areia e nas áreas de praia presentes no Rio Madeira, e no seu afluente, o Rio Canumã. Os resultados obtidos permitiram observar que a variação na área inundada foi pouco expressiva entre as polarizações VH e VV, situando-se na ordem de 1 a 2%, em alguns casos. A fim de melhor compreender a dinâmica da área de estudo, foi realizada uma análise das estações fluviométricas e pluviométricas da região de Borba (AM) no período de 2018 a 2021, sendo identificado que o período de cheia na área ocorreu nos meses de abril de 2019 e maio de 2021, enquanto o período de seca foi registrado nos meses de abril e outubro de 2018. Verificou-se que as mudanças na área inundada ocorreram em áreas específicas, como os bancos de areia e as áreas de praia presentes no Rio Madeira e no seu afluente, o rio Canumã. Ressalta-se que esses bancos de areia são comuns em ilhas fluviais e, por isso, são mais suscetíveis a inundação devido a apresentarem uma menor cota e menor altitude em relação ao relevo.

Uma limitação do estudo foi o procedimento para determinar o valor de corte (threshold), utilizado o valor de -16 dB para a polarização VV e o de -20 dB para VH, que pode trazer uma imprecisão nos resultados entre os dois tipos de dados. Isso significa que a detecção de áreas inundadas entre as duas polarizações apresenta pequenas diferenças nos resultados. Além disso, o valor de corte pode variar conforme as condições ambientais e os dados do sensor, o que também pode afetar a precisão da análise. Portanto, é importante considerar a imprecisão proveniente do valor de corte ao interpretar os resultados do estudo e ao utilizar as técnicas de processamento de imagens de radar.

6. CONCLUSÃO

A presente pesquisa desenvolveu uma metodologia para o cálculo da frequência relativa de inundação do rio Madeira utilizando séries temporais de imagens de radar Sentinel-1, que garante a presença de dados em intervalos de 12 dias sem perda de informações devido às condições atmosféricas e cobertura de nuvens. Os padrões observados pelas áreas inundadas estão coerentes com os dados das estações fluviométrica e pluviométrica em Borba, Amazonas, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A série temporal com a polarização VV obteve uma maior extensão de áreas nas classes com 50-70% e 70-90% de presença de água, enquanto a polarização VH conseguiu maior extensão de áreas no intervalo de 10-30%. As feições de mudança foram mais visíveis nas margens esquerda dos rios, nos bancos de areia e nas áreas de praia dos rios Madeira e Canumã, onde ocorre a maior incidência de enchentes. As áreas de inundação mensuradas pelas polarizações VV e VH apresentaram uma variação de 1 a 2% entre elas, presumindo-se que a utilização de ambas polarizações são adequadas para a delimitação das dinâmicas de áreas inundáveis na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALL, J.; NELSON, J. Remote sensing quantification of wetland habitat change in South Carolina: Implications for coastal resource policy. **Geographical Bulletin - Gamma Theta Upsilon**, v. 49, n. 2, p. 87–101, 2008.

AMANI, M.; BRISCO, B.; MAHDAVI, S.; GHORBANIAN, A.; MOGHIMI, A.; DELANCEY, E. R.; MERCHANT, M.; JAHNCKE, R.; FEDORCHUK, L.; MUI, A.; FISETTE, T.; KAKOOEI, M.; AHMADI, S. A.; LEBLON, B.; LAROCQUE, A. Evaluation of the landsat-based Canadian wetland inventory map using multiple sources: Challenges of large-scale wetland classification using remote sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 14, p. 32-52, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3036802>

ASNER, G. P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3855–3862, 2001. <https://doi.org/10.1080/01431160010006926>

BARBOSA, F. L. R.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; GOMES, R. A. T. Classificação do uso e cobertura da terra utilizando imagens SAR/Sentinel 1 no Distrito Federal, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, 2021. <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-55954>

BARTHEM, R.; COSTA, M. D.; CASSEMIRO, F.; LEITE, R. G.; SILVA JR, N. Diversity and abundance of fish larvae drifting in the Madeira River, Amazon basin: Sampling methods comparison. **Biodiversity-The Dynamic Balance of the Planet. Croatica: Intech**, p. 137-158, 2014. <http://dx.doi.org/10.5772/57404>

BASTOS, W. R.; DÓREA, J. G.; BERNARDI, J. V. E.; LAUTHARTTE, L. C.; MUSSY, M. H.; LACERDA, L. D.; MALM, O. Mercury in fish of the Madeira River (temporal and spatial assessment), Brazilian Amazon. **Environmental Research**, v. 140, p. 191-197, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.029>

BASTOS, W. R.; REBELO, M. D. F.; FONSECA, M. D. F.; ALMEIDA, R. D.; MALM, O. A. description of mercury in fishes from the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 431-438, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000300006>

BENZOUGAGH, B.; FRISON, P. L.; MESHAM, S. G.; BOUDAD, L.; DRIDRI, A.; SADKAOUI, D.; KHEDHER, K. M. Flood Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Images: A Case Study—Inaouene Watershed from Northeast of Morocco. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00683-y>

BEVAN, S. L.; NORTH, P. R.; GREY, W. M.; LOS, S. O.; PLUMMER, S. E. Impact of atmospheric aerosol from biomass burning on Amazon dry-season drought. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D9, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JD011112>

BOISCHIO, A. A. P.; HENSHEL, D. Fish consumption, fish lore, and mercury pollution—risk communication for the Madeira River people. **Environmental Research**, v. 84, n. 2, p. 108-126, 2000. <https://doi.org/10.1006/enrs.2000.4035>

CARVAJAL-VALLEJOS, F. M.; BIGORNE, R.; ZEBALLOS FERNÁNDEZ, A. J., SARMIENTO, J.; BARRERA, S.; YUNOKI, T.; BARRA, E. L.; JEGÚ, M.; MALDONADO, M.; VAN DAMME, P.; CÉSPEDES, R.; OBERDORFF, T. FISH-AMAZBOL: A database on freshwater fishes of the Bolivian Amazon. **Hydrobiologia**, v. 732, n. 1, p. 19–27, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1841-5>

CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicações E Perspectivas Do Sensoriamento Remoto Para O Mapeamento De Áreas Inundáveis. **Revista de Geografia**, v. 35, n. 4, p. 412, 2018.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; SAMPAIO, C. D. S.; SILVA, N. C. D.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F. D.; 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, p. 505-517, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400010>

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; SILVA, C. R.; GOMES, R. A. T. Standardized time-series and interannual phenological deviation: New techniques for burned-area detection using long-term MODIS-NBR dataset. **Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 6950-6985, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70606950>

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 319-332, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300002>

CELLA-RIBEIRO, A.; DA COSTA DORIA, C. R.; DUTKA-GIANELLI, J.; ALVES, H., TORRENTE-VILARA, G. Temporal fish community responses to two cascade run-of-river dams in the Madeira River, Amazon basin. **Ecohydrology**, v. 10, n. 8, p. e1889, 2017. <https://doi.org/10.1002/eco.1889>

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, n. 2, p. 152–168, 2018. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; MARTINS, E. D. S.; SANTANA, O. A.; SOUZA, V. V. D.; ENCINAS, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, p. 699-705, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000400014>

DENG, Y.; JIANG, W.; TANG, Z.; LI, J.; LV, J.; CHEN, Z.; JIA, K. Spatio-temporal change of lake water extent in Wuhan urban agglomeration based on Landsat images from 1987 to 2015. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 270, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9030270>

DI BALDASSARRE, G.; SCHUMANN, G.; BRANDIMARTE, L.; BATES, P. Timely low resolution SAR imagery to support floodplain modelling: a case study review. **Surveys in Geophysics**, v. 32, n. 3, p. 255-269, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9111-9>

EVANS, T. L.; COSTA, M.; TELMER, K.; SILVA, T.S.F. Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to Map Land Cover and Seasonal Inundation in the Brazilian Pantanal. **IEEE**

Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 3, n. 4, p. 560–575, 2010. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2089042>

FEARNSIDE, P. M. Brazil's Madeira River dams: A setback for environmental policy in Amazonian development. **Water Alternatives**, v. 7, n. 1, 2014.

FEARNSIDE, P. M. Impacts of Brazil's Madeira River dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. **Environmental Science & Policy**, v. 38, p. 164-172, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.004>

FILIPPONI, F. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. **Proceedings** p. 11, 2019. <https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201>

FINGAS, M; BROWN, C. Review of oil spill remote sensing. **Marine Pollution Bulletin**, v. 83, n. 1, p. 9–23, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059>

FROST, V. S. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 4, n. 2, p.157-166, 1982. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1982.4767223>.

GAO, B.C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

GRIMALDI, S.; LI, Y.; PAUWELS, V. R.; WALKER, J. P. Remote sensing-derived water extent and level to constrain hydraulic flood forecasting models: Opportunities and challenges. **Surveys in Geophysics**, v. 37, p. 977-1034, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9378-y>

GUO, M.; LI, J.; SHENG, C.; XU, J.; WU, L. A review of wetland remote sensing. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 4, p. 1–36, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17040777>

HACON, S. S.; DÓREA, J. G.; FONSECA, M. D. F.; OLIVEIRA, B. A.; MOURÃO, D. S.; RUIZ, C. M.; GONÇALVES, R. A.; MARIANI, C. F.; BASTOS, W. R. The influence of changes in lifestyle and mercury exposure in riverine populations of the Madeira River (Amazon Basin) near a hydroelectric project. **International journal of environmental**

research and public health, v. 11, n. 3, p. 2437-2455, 2014.
<https://doi.org/10.3390/ijerph110302437>

HALL, A. C.; SCHUMANN, G. J. P.; BAMBER, J. L.; BATES, P. D. Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 7-8, p. 223-231, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.010>

HESS, L.; MELACK, J.; SIMONETT, D. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 1313–1325, 1990.
<https://doi.org/10.1080/01431169008955095>

HUANG, C.; CHEN, Y.; & WU, J. Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 350-362, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.002>

JONES, K.; LANTHIER, Y.; VAN DER VOET, P.; VAN VALKENGOED, E.; TAYLOR, D.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D. Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 7, p. 2154-2169, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.037>

KABENGE, M.; ELARU, J.; WANG, H.; LI, F. Characterizing flood hazard risk in data-scarce areas, using a remote sensing and GIS-based flood hazard index. **Natural hazards**, v. 89, p. 1369-1387, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3024-y>

KASISCHKE, E.; MELACK, J.; DOBSON, M. The use of radars for ecological applications: a review. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 141–156, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00148-4)

LAGES, A. S. **Geoquímica da água preta de rios do município de Apuí, Amazonas**. 2010. 57 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, 2010.

- LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. **Geomorphology**, v. 70, n. 3-4, p. 187-206, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.005>
- LEE, J. S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. PAMI-2, n. 2, p. 165-168, 1980. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1980.4766994>
- LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; DE GRANDI, G. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, v. 37, n. 5, p. 2363-2373, 1999. <https://doi.org/10.1080/02757259409532206>
- LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; SCHULER, D. L.; POTTIER, E.; FERRO-FAMIL, L. Scattering-model-based speckle filtering of polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 1, p. 176-187, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.859338>
- LEE, J. S.; JURKEVICH, L.; DEWAELE, P.; WAMBACQ, P.; OOSTERLINCK, A. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. **Remote sensing reviews**, v. 8, n. 4, p. 313-340, 1994. <https://doi.org/10.1080/02757259409532206>
- LEE, J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 18, n. 3, p. 259-268, 1983. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(82\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0734-189X(82)90017-9).
- LI, Y.; GRIMALDI, S.; WALKER, J. P.; PAUWELS, V. R. Application of remote sensing data to constrain operational rainfall-driven flood forecasting: A review. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 456, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8060456>
- LOPEZ-MARTINEZ, C.; MALLORQUI, J. J. Gamma maximum a posteriori speckle filtering with the Mallat algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 10, p. 2319-2330, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.855079>.
- MAGALHÃES, I. A. L.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL SENTINEL 1 DE INUNDAÇÕES NA

AMAZÔNIA CENTRAL. **Mercator (Fortaleza)**, v. 21, 2022.
<https://doi.org/10.4215/rm2022.e21019>

MAHDAVI, S.; SALEHI, B.; GRANGER, J.; AMANI, M.; BRISCO, B.; HUANG, W. Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. **GIScience & Remote Sensing**, v. 55, n. 5, p. 623-658, 2018. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1419602>

MARKERT, K. N.; MARKERT, A. M.; MAYER, T.; NAUMAN, C.; HAAG, A.; POORTINGA, A.; BHANDARI, B.; THWAL, N. S.; KUNLAMAI, T.; CHISHTIE, F.; KWANT, M.; PHONGSAPAN, K.; CLINTON, N.; TOWASHIRAPORN, P.; SAAH, D. Comparing sentinel-1 surface water mapping algorithms and radiometric terrain correction processing in southeast asia utilizing google earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2469, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12152469>

MARTINIS, S.; RIEKE, C. Backscatter analysis using multi-temporal and multi-frequency SAR data in the context of flood mapping at River Saale, Germany. **Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 7732-7752, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70607732>

MASCOLO, L.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; CLOUDE, S. R. Thermal noise removal from polarimetric Sentinel-1 data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 19, p. 1-5, 2021. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3050921>

MAURICE-BOURGOIN, L.; QUIROGA, I.; CHINCHEROS, J.; COURAU, P. Mercury distribution in waters and fishes of the upper Madeira rivers and mercury exposure in riparian Amazonian populations. **Science of the Total Environment**, v. 260, n. 1-3, p. 73-86, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00542-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00542-8)

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon Basin, In: JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J.; PAROLIN, P. (Eds.). **Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. 1 ed. Berlin, Germany: Springer, 2010, p. 43–59.

MENDES, V. A.; DE CARVALHO, D. P.; DE ALMEIDA, R.; RECKTENVALD, M. C. N. D. N.; PEDROSA, O. P.; DE SOUSA-FILHO, I. F.; DÓREA, J. G.; BASTOS, W. R. Mercury in blood, hair, and feces from subsistence fish-eating riverines of the Madeira River Basin (Western Amazon). **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 67, p. 126773, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126773>

MLECZKO, M.; MRÓZ, M. Wetland Mapping Using SAR Data from the Sentinel-1A and TanDEM-X Missions: A Comparative Study in the Biebrza Floodplain (Poland). **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 78, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10010078>

MORADI, M.; SAHEBI, M.; SHOKRI, M. Modified Optimization Water Index (MOWI) for Landsat-8 OLI/TIRS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 4W4, p. 185–190, 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-185-2017>

MOURA, N.V.A.; CARVALHO, O.L.F.; GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Deep-water oil-spill monitoring and recurrence analysis in the Brazilian territory using Sentinel-1 time series and deep learning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 107, p. 102695, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102695>

MUNAWAR, H. S.; HAMMAD, A. W.; WALLER, S. T. Remote sensing methods for flood prediction: A review. **Sensors**, v. 22, n. 3, p. 960, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22030960>

MUSA, Z. N.; POPESCU, I.; MYNETT, A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 9, p. 3755-3769, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3755-2015>

OHARA, W. M.; DE QUEIROZ, L. J.; ZUANON, J.; TORRENTE-VILARA, G.; VIEIRA, F. G.; DA COSTA DORIA, C. R. Fish collection of the Universidade Federal de Rondônia: its importance to the knowledge of Amazonian fish diversity. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 37, n. 2, p. 251-258, 2015. <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v37i2.26920>

PALMER, S. C. J.; KUTSER, T.; HUNTER, P. D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 1–8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>

PARK, E.; HO, H. L.; TRAN, D. D.; YANG, X.; ALCANTARA, E.; MERINO, E.; SON, V. H. Dramatic decrease of flood frequency in the Mekong Delta due to river-bed mining and dyke construction. **Science of The Total Environment**, v. 723, p. 138066, 2020. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01074.x>

PARK, J. W.; KOROSOV, A. A.; BABIKER, M.; SANDVEN, S.; WON, J. S. Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 56, n. 3, p. 1555-1565, 2017. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2765248>

POTIN, P.; BARGELLINI, P.; LAUR, H.; ROSICH, B.; SCHMUCK, S. Sentinel-1 mission operations concept. In: **2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2012. p. 1745-1748. [10.1109/IGARSS.2012.6351183](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351183)

RAMSEY III, E. Radar remote sensing of wetlands. In: LUNETTA, R.; ELVIDGE, C. (Eds.). **Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications**. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, 1998, cap. 13. p. 211–243.

REBELO, L. M.; FINLAYSON, C. M.; NAGABHATLA, N. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 7, p. 2144-2153, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>

REDDINGTON, C. L.; MORGAN, W. T.; DARBYSHIRE, E.; BRITO, J.; COE, H., ARTAXO, P.; SCOTT, C. E.; MARSHAM, J.; SPRACKLEN, D. V. Biomass burning aerosol over the Amazon: analysis of aircraft, surface and satellite observations using a global aerosol model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 14, p. 9125-9152, 2019. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9125-2019>

SALGADO, C. B.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F. Análise da interferência de nuvens na classificação de séries temporais MODIS-NDVI na

região da Amazônia, município de Capixaba, Acre. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-47062>

SANTOS, R. E.; PINTO-COELHO, R. M.; FONSECA, R.; SIMÕES, N. R.; ZANCHI, F. B. The decline of fisheries on the Madeira River, Brazil: The high cost of the hydroelectric dams in the Amazon Basin. **Fisheries management and ecology**, v. 25, n. 5, p. 380-391, 2018. <https://doi.org/10.1111/fme.12305>

SCHMULLIUS, C.; EVANS, D. Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 2713–2722, 1997. <https://doi.org/10.1080/014311697217297>

SCHUMANN, G. J. P.; MOLLER, D. K. Microwave remote sensing of flood inundation. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 83, p. 84-95, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.002>

SHARMA, T. P. P.; ZHANG, J.; KOJU, U. A.; ZHANG, S.; BAI, Y.; SUWAL, M. K. Review of flood disaster studies in Nepal: A remote sensing perspective. **International journal of disaster risk reduction**, v. 34, p. 18-27, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.11.022>

SHEN, L.; LI, C. Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm. In: **2010 18th International Conference on Geoinformatics**. IEEE, 2010. p. 1-4. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567762>

SKAKUN, S.; KUSSUL, N.; SHELESTOV, A.; KUSSUL, O. Flood hazard and flood risk assessment using a time series of satellite images: A case study in Namibia. **Risk Analysis**, v. 34, n. 8, p. 1521-1537, 2014. <https://doi.org/10.1111/risa.12156>

SUEDEL, B. C.; AMORIM, R. S.; LAUTH, T. J.; CREECH, C. T. Nature-based solutions for improving navigation reliability on the Madeira River, Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 18, n. 1, p. 115-122, 2022. <https://doi.org/10.1002/ieam.4478>

THOMAS, R. F.; KINGSFORD, R. T.; LU, Y.; HUNTER, S. J. Landsat mapping of annual inundation (1979–2006) of the Macquarie Marshes in semi-arid Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 4545–4569, 2011. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.489064>

TORRES, R.; SNOEIJ, P.; GEUDTNER, D.; BIBBY, D.; DAVIDSON, M.; ATTEMA, E.; POTIN, P.; ROMMEN, B.; FLOURY, N.; BROWN, M.; TRAVER, I.N.; DEGHAJE, P.; DUESMANN, B.; ROSICH, B.; MIRANDA, N.; BRUNO, C.; L'ABBATE, M.; CROCI, R.; PIETRAPAOLLO, A.; HUCHLER, M.; ROSTAN, F. GMES Sentinel-1 mission. **Remote sensing of environment**, v. 120, p. 9-24, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

TWELE, A.; CAO, W.; PLANK, S.; MARTINIS, S. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 13, p. 2990–3004, 2016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304>

UDDIN, K.; MATIN, M. A.; MEYER, F. J. Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh. **Remote Sensing**, v. 11, n. 13, p. 1581, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11131581>

VASILE, G.; TROUVÉ, E.; LEE, J. S.; BUZULOIU, V. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 1609-1621, 2006. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.864142>

WANG, X.; XIE, H. A review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. **Water**, v. 10, n. 5, p. 608, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10050608>

WERNER, M. Shuttle radar topography mission (SRTM) mission overview. **Frequenz**, v. 55, n. 3-4, p. 75-79, 2001. <https://doi.org/10.1515/FREQ.2001.55.3-4.75>

WHITE, L.; BRISCO, B.; DABBOOR, M.; SCHMITT, A.; PRATT, A. A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands. **Remote Sensing**, v. 7, p. 7615-7645, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70607615>

XIAO, X.; ZHANG, Q.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFYSY, S.C.; MOORE, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of a deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n.2, p. 256–270, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.010>

XU, H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A. H.; ALLEN, A. G. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 10, p. 1641-1653, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00329-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00329-5)

YAN, K.; DI BALDASSARRE, G.; SOLOMATINE, D. P.; SCHUMANN, G. J. P. A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level. **Hydrological processes**, v. 29, n. 15, p. 3368-3387, 2015. <https://doi.org/10.1002/hyp.10449>

YUAN, S.; BAO, F.; ZHANG, X.; LI, Y. Severe Biomass-Burning Aerosol Pollution during the 2019 Amazon Wildfire and Its Direct Radiative-Forcing Impact: A Space Perspective from MODIS Retrievals. **Remote Sensing**, v. 14, n. 9, p. 2080, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14092080>

ZANATTA, G. V. **O extrativismo de açaí (euterpe precatoria mart.) e os sistemas produtivos tradicionais na terra indígena Kwatá-Laranjal, Amazonas**. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus, Amazonas, 2012.