



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**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 DE MESTRADO

SARAH MARTINS NOVAIS FROTA

BRASILIA-DF
JULHO 2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE INUNDAÇÃO E COTA
FLUVIOMÉTRICA NA SUB-BACIA DO ALTO RIO NEGRO: UMA
ANÁLISE BASEADA EM DADOS DE RADAR (SENTINEL-1A)**

SARAH MARTINS NOVAIS FROTA

Orientador: Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Dissertação de Mestrado

BRASILIA-DF
JULHO 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE INUNDAÇÃO E COTA
FLUVIOMÉTRICA NA SUB-BACIA DO ALTO RIO NEGRO: UMA
ANÁLISE BASEADA EM DADOS DE RADAR (SENTINEL-1A)**

SARAH MARTINS NOVAIS FROTA

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, opção Acadêmica.

Aprovado por:

Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Doutor (GEA – UnB)
(Orientador)

Renato Fontes Guimarães, Doutor (GEA – UnB)
(Examinador interno)

Edson Eyji Sano, Doutor (Embrapa Cerrados)
(Examinador externo)

BRASILIA-DF
JULHO 2019

Ficha catalográfica

Frota, Sarah M Novais

Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto Rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A) / Sarah Martins Novais Frota; orientador Osmar Abílio de Carvalho Júnior – Brasília, 2019.

Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia – Universidade de Brasília, 2019

1. Áreas alagadas
2. SAR
3. Sensoriamento remoto
4. Campinaranas

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor

Sarah Martins Novais Frota

Dedico este trabalho especialmente:

A espiritualidade que me guia, e
com grande maestria sempre abre meus
caminhos. Sou grata.

Aos meus avós, seu Jesfe e Emília, que
me passaram valores primorosos não só por
palavras, mas principalmente por atos. Vocês
são de fato meus maiores ídolos, exemplo de
humildade e coragem.
amo muito vocês!

E claro a minha mãe, Íris, a senhora é
um exemplo de luta, dedicação e humildade.
Sou uma admiradora ferrenha da sua luta. Te
amo, muito!

AGRADECIMENTOS

A todos os professores da Universidade de Brasília, onde tive o prazer de estar presente e adquirir mais conhecimento.

Ao meu orientador Osmar Abílio de Carvalho Júnior por ser uma fonte de inesgotável de conhecimento, e por ter me dado a oportunidade de fazer parte da equipe do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE), no qual tive o privilégio de fazer novas amizades e trocar experiências no âmbito do geoprocessamento

Um agradecimento especial ao IBAMA, sim, este órgão me possibilitou um enorme aprendizado, mas além de tudo me apresentou ao ser humano mais competente, ético e de bom coração que eu poderia conhecer. Prof. Dr. Edson Eyji Sano, sou eternamente grata pela amizade, presteza e conselhos que o senhor dedicou à mim ao longo desses anos, é inenarrável meu sentimento de gratidão. Obrigada por tudo!

Agradeço a minha amiga e irmã, Fernanda Medeiros a qual sempre me deu forças e esteve comigo quando o desânimo teimava em estar presente. Minha amiga, você foi essencial nessa fase.

Ao meu estimado amigo Juan Doblás, obrigada por sua dedicação, paciência, e considerações mais que importantes, posso dizer essenciais, você foi um grande incentivador dessa pesquisa. Gratidão!

E por fim e não menos importante, ao meu companheiro, Mario Oliveira, que se interessou fortemente por minha pesquisa e contribuiu com elucidações muito pertinentes. Você soube se fazer presente mesmo na distância, e me transmitiu forças quando já não havia. Sou eternamente grata!

Aos membros integrantes da banca examinadora, muito obrigada pela disposição em avaliar o trabalho e sugerir aperfeiçoamentos necessários.

Agradeço aqueles que de alguma forma me ajudaram a alcançar o objetivo de obter o grau de mestre em Geografia. É inviável mencionar todas que me ajudaram, mas fica aqui o meu sincero sentimento de gratidão!

Esse trabalho é fonte de uma admiração ao qual alimento a algum tempo, a Amazônia. A magnitude desse bioma, ao qual sempre estive ligada desde minha primeira experiência profissional, sempre me surpreendeu por sua complexidade e comportamento. Isso me intriga e me move. Este trabalho com certeza contribuiu para que eu aumentasse meu conhecimento sobre esse lugar fantástico!

RESUMO

Esta pesquisa se propõe a analisar a dinâmica de inundação na região Amazônica. Nesta área há uma fitofisionomia denominada de campinarana, que são ecossistemas próximos a solos pobres e arenosos comumente sujeitos ao alagamento periódico consequente da flutuação do lençol freático. O objetivo específico desta pesquisa é determinar a relação entre área de floresta de campinarana inundada, estimada por meio de análise de cenas de radar do satélite Sentinel-1A, e o nível da água medido por uma estação fluviométrica. A área de estudo selecionada corresponde à uma cena do satélite Sentinel-1A, localizada na sub-bacia do Alto Rio Negro e engloba parte dos municípios de Caracaraí/Roraima e Barcelos/Amazonas. Foram selecionadas 32 imagens de radar do satélite Sentinel-1A (banda C, polarizações VV e VH, tamanho de pixel de 10 metros, modo de imageamento IW – Interferometric Wide) do período de 05 de outubro de 2016 a 24 de outubro 2017. A título de validação, as áreas inundadas que foram mapeadas na cena de 13 de agosto de 2017 foram comparadas com a correspondente área inundada, obtida pela análise de uma cena do satélite óptico Landsat-8 da mesma data e convertida em normalized water difference index (NWDI). Em seguida, as áreas inundadas estimadas nas 32 cenas de radar foram comparadas com os dados in situ de nível da água fornecidos pela estação fluviométrica de Ajuricaba. Neste capítulo as áreas alagadas também são caracterizada de forma sucinta e objetiva e posteriormente a aplicação e caracterização do sistema SAR.

Palavras-chave: Radar; SAR; Sensoriamento remoto; serie temporal; Áreas alagadas.

ABSTRACT

This research proposes to analyze the dynamics of flooding in the Amazon region. In this area there is a phytophysiology known as Campinarana, which are ecosystems near poor and sandy soils commonly subject to periodic flooding due to the fluctuation of the water table. The specific objective of this research is to determine the relationship between flooded campinarana forest area, estimated by means of the Sentinel-1A satellite radar scene analysis, and the water level measured by a fluvimetric station. The selected study area corresponds to a Sentinel-1A satellite scene, located in the Upper Rio Negro sub-basin and comprises part of the municipalities of Caracaraí / Roraima and Barcelos / Amazonas. We selected 32 radar images of the Sentinel-1A satellite (C-band, VV and VH polarizations, 10-meter pixel size, IW (Interferometric Wide imaging mode)) from October 5, 2016 to October 24, 2017. validation title, the flooded areas that were mapped in the August 13, 2017 scene were compared to the corresponding flooded area, obtained by the analysis of a scene from the Landsat-8 optical satellite of the same date and converted into a normalized water index index (NWDI). Then, the flooded areas estimated in the 32 radar scenes were compared with the in situ water level data provided by the fluvial station of Ajuricaba. In this chapter the flooded areas are also characterized succinctly and objectively and later the application and characterization of the SAR system

Keywords: Radar; SAR; Remote sensing; Time series; Flooded areas

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE FIGURAS. | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS. | xii |
| CAPITULO I – APRESENTAÇÃO GERAL | 12 |
| I.1 INTRODUÇÃO | 12 |
| I.2 REVISÃO METODOLÓGICA | 13 |
| I.2.1 Características gerais de ambientes de inundação..... | 13 |
| I.2.2 Características gerais das imagens de radar. | 15 |
| I.3 OBJETIVOS..... | 18 |
| I.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 19 |
| REFERÊNCIAS | 19 |
| CAPITULO II -Relação entre área de inundação e cota fluvométrica na sub-bacia do Auto Rio Negro: Uma análise baseada em dados do radar. Relation between flooding área and water level in the upper Rio Negro’s floodplain: na analysisi based on radar data (sentinela 1A). | |
| 2.1 Introdução..... | 26 |
| 2.2 Área de estudo | 28 |
| 2.1.1 Dados..... | 29 |
| 2.1.2 Etapas do processamento..... | 32 |
| 2.1.3 Identificação de áreas inundadas. | 34 |
| 2.3 RESULTADOS | 36 |
| 2.3.1 Calculo de áreas de inundação por meio de imagens Sentinel-1A. | 36 |
| 2.3.2 Mapeamento de área de inundação por meio de imagens Landsat..... | 38 |
| 2.3.3 Correlação entre áreas inundadas e cotas altimétricas da estação fluviométricas | 40 |
| 2.4 DISCUSSÃO | 43 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 45 |
| REFERENCIAS | 46 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura. 1 - Chave dos principais tipos de florestas amazônicas sujeitas à inundação..... | 14 |
| Figura. 2 - Principais bandas dos sensores SAR | 17 |
| Figura. 3 - Interação de bandas orbitais com a copa de árvores..... | 17 |
| Figura. 4 - Tipos de reflexão radar | 18 |
| Figura 5. Mapa de localização envolvendo os Rios Demeni, Rio Branco e Rio Negro, próximo à sede do município de Barcelos – AM | 30 |
| Figura 6. Localização das estações fluviométricas próximas da área de estudo..... | 33 |
| Figura 7. Fluxograma com as principais etapas do estudo..... | 34 |
| Figura 8. Coeficientes Kappa para as polarizações VH (a) e VV (b), obtidas por meio do software Abílio. | 36 |
| Figura 9. Dinâmica temporal de área alagada na área de estudo, estimada pelas cenas do satélite Sentinel-1A nas polarizações VV e VH | 38 |
| Figura 10. Relação entre as áreas de inundação estimadas pelas polarizações VV e VH..... | 39 |
| Figura 11. Resultado do mapeamento de área inundada por meio da técnica de NDWI aplicada à cena do satélite Landsat-8 do dia 13 de agosto de 2017 (a) e comparação com os mapeamentos obtidos pelas cenas do satélite Sentinel-1A da mesma data nas polarizações VV e VH | 40 |
| Figura 12. Relação entre cota altimétrica obtida da estação fluviométrica de Ajuricaba e áreas inundadas estimadas pelas polarizações VV e VH do Sentinel-1A. | 41 |
| Figura 13. Correlação exponencial entre área inundada estimada pelas polarizações VV (a) e VH (b) e nível da água da estação fluviométrica de Ajuricaba envolvendo toda a série temporal. | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Data das imagens de radar do satélite Sentinel-1A analisadas neste estudo..... | 30 |
| Tabela 2. Características dos modos de imageamento dos satélites Sentinel-1A e Landsat-8 considerados neste estudo..... | 31 |
| Tabela 3. Interpretação do kappa..... | 36 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|-------------------------------------------|
| ANA | Agência Nacional das Águas |
| dB | Decibel |
| ENVI | <i>Environment for Visualizing Images</i> |
| GREEN | Banda 3 do satélite Landsat-8 |
| NDWI | Índice de Água por Diferença Normalizada |
| NIR | Infravermelho próximo |
| OLI | <i>Operational Land Imager</i> |
| SAR | <i>Synthetic Aperture Radar</i> |
| SR | Sensoriamento remoto |
| SWIR | Infravermelho de ondas curtas |
| USGS | Serviço Geológico dos Estados Unidos |

CAPÍTULO 1

CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 Introdução

As zonas úmidas da Amazônia são caracterizadas pela alta biodiversidade e extensas planícies de inundação (EWEL, 2010). Este ecossistema é identificado como um dos mais complexos do planeta, que por sua vez promove diversos serviços ecossistêmicos aos recursos hídricos mundiais e à população humana (SOUSA et al., 2013). Neste sistema dinâmico de vazantes e cheias, ocorrem variados processos biológicos e biogeoquímicos (HUANG, 2014).

Na bacia do Alto Rio Negro, a espécie vegetal predominante nessas áreas alagadas são as campinaranas que possuem fitofisionomia aberta, normalmente com uma matriz herbácea em que se salientam arbustos isolados que variam entre 1 a 5 metros de altura, com alguns indivíduos atingindo até nove metros (FERREIRA, 2009). Segundo Daly e Prance (1989), apesar de ocupar 7% da Amazônia legal brasileira, existem poucos estudos na literatura sobre estes ecossistemas.

Para monitorar o comportamento desses ambientes, comumente são usadas medições de campo de níveis de água, todavia, quando estas áreas são muito remotas, o que é muito comum na Amazônia, estes dados acabam se tornando obsoletos pela dificuldade de acesso ao local. Além disso, Jung et al. (2011) mencionaram que há uma certa complexidade em estudar planícies de inundação, pois a dinâmica do fluxo é irregular no espaço e no tempo. Segundo Dias (2014), a deficiência de análises é um fator que limita as ações de gestão tanto ambientais quanto da população ribeirinha.

O Brasil é um país carente de caracterização detalhada de seus recursos naturais (OLIVEIRA, 2009). E é nesta lacuna que o uso do sensoriamento remoto (SR) e ferramentas de geoprocessamento vêm possibilitando superar tais condicionantes, possibilitando a otimização da caracterização do meio físico. Neste sentido, a utilização de imagens de satélite tem sido cada vez mais valorizada para este fim; diversas abordagens de sensoriamento remoto têm-se mostrado eficaz para estudar a hidrologia e a dinâmica desses ecossistemas (JUNG et al., 2011).

Técnicas de geoprocessamento e SR surgem como um instrumento que têm produzido resultados satisfatórios na geração de estimativas de dados hídricos e no auxílio a órgãos gestores e pesquisadores de diferentes áreas. Atualmente, trabalhos que abrangem o monitoramento de ambientes hídricos usando SR permitem gerar informações espaciais com baixo custo (MARTINS et al., 2016).

Os sensores ópticos espectrais a bordo de satélites ou aerotransportados obtêm dados de sensoriamento remoto relativamente compreensíveis e largamente aplicados em diversas finalidades. Essas imagens operam nas faixas espectrais do visível e infravermelho, porém, apresentam limitações para regiões com alta incidência de nuvens (SOUZA-FILHO et al., 2011). Quase 75% das áreas alagadas ocorrem em áreas com predomínio de dossel florestal denso, enquanto outros 25% são identificados como água aberta (MELAK & HESS, 2010). O uso de imagens ópticas para delimitação de ambientes de inundação apresentam resultados satisfatórios para “águas abertas”. Para áreas inundadas, uma alternativa são os sensores de radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*), conforme comprovado por estudos conduzidos por Matgen et al. (2011), Gala et al. (2013) e Brown et al. (2016). O potencial de imagens SAR para detectar mudanças nas condições de umidade do solo também foi demonstrado por diversos autores (ULABY et al., 1986; WHITE et al., 2005; VACHON et al., 2011; MOHAMMADI et al., 2017).

1.2 Revisão de literatura

1.2.1 Características gerais de ambientes de inundação

A paisagem amazônica está dividida em dois ambientes, ecossistemas de terra firme e ecossistemas densamente alagados. As planícies de inundação são áreas que recebem periodicamente o aporte lateral das águas de rios, lagos, da precipitação direta ou de lençóis freáticos, sendo de particular interesse na região amazônica aquelas associadas a rios e lagos (JUNK et al., 1989).

Estudos sobre a estrutura, função e composição das áreas alagadas na Amazônia classificam estes ambientes em duas classes, águas brancas (várzeas) e águas escuras (igapós). A primeira é composta por um grande número de matérias e nutrientes em suspensão e um pH neutro, a segunda é rica em substâncias húmicas, pobre em

nutrientes e um pH ácido (FERREIRA, 2005). Diferenças nos níveis de nutrientes entre os dois ecossistemas influenciam a composição de espécies, a riqueza e as taxas de crescimento de comunidades de plantas superiores (JUNK et al., 2015). Prance (1980) propôs nomenclaturas para as áreas alagadas mais comuns da Amazônia, conforme mostradas na Figura 1.

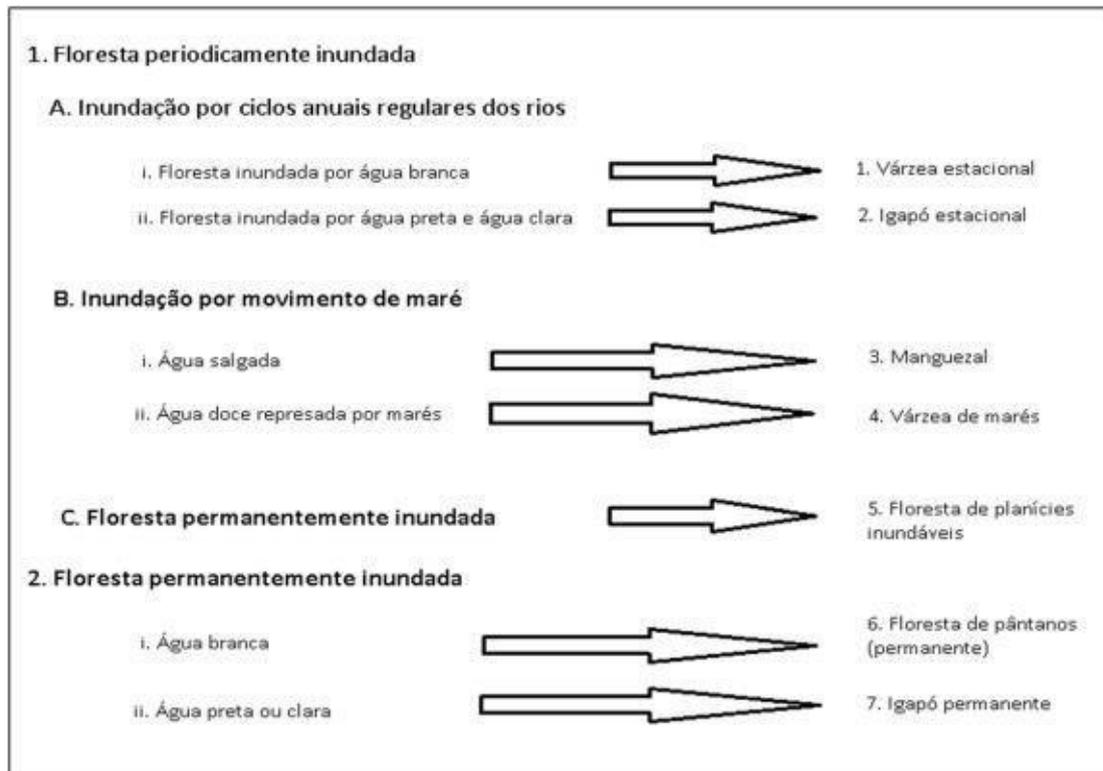


Figura 1. Chave dos principais tipos de florestas Amazônicas sujeitas à inundação.

Fonte: Prance (1980).

Segundo Ferreira et al. (2005), as florestas de igapó, devido à ocorrência em regiões geológicas mais antigas do Terciário e Pré-Cambriano, ocorrem em solos bastante pobres, isto é, em ambientes muito sensíveis e de difícil recuperação uma vez modificados pela intervenção humana. O nível de regeneração destes ambientes é muito baixo e a retirada de sua cobertura vegetal pode levar a prejuízos irreversíveis do habitat, frente à importância ecológica e estrutural que as plantas desempenham para a sustentação desse ambiente (LOBO et al., 2018).

Por fim, Fraxe et al. (2013), mencionou que o fator diferencial nestes ambientes inundados é a dificuldade em estabelecer os limites entre o que é superfície terrestre e aquática, justamente pelo comportamento irregular das enchentes e das vazantes.

1.2.2 Características gerais das imagens de radar

Um sistema de radar, a princípio, nada mais é do que a emissão de energia eletromagnética e a sua posterior recepção e processamento para determinar a posição e natureza dos alvos (SIRAD, 2018). Em 1951, um matemático da Goodyear, Carl A. Wiley, desenvolveu uma série de algoritmos que permitiam combinar diversas observações de radar para simular a utilização de grandes antenas. O método, chamado de SAR (*Synthetic Aperture Radar*), permitiu a utilização de pequenos aparelhos e o seu transporte em aviões e pequenas embarcações. Esse sistema é atualmente utilizado nas plataformas orbitais (satélites). A antena embarcada emite energia em uma determinada frequência e recebe a energia refletida, que depois de processada, fornece informações sobre o terreno dentro de uma faixa de imageamento da ordem de dezenas de quilômetros. À medida que o satélite se desloca na sua órbita pré-determinada, o sensor vai ‘varrendo’ a superfície da Terra, gerando assim imagens de toda a superfície terrestre.

Os sensores SAR são classificados como ativos, isto é, não necessitam de fonte externa de radiação eletromagnética como o Sol para obter dados, diferentemente dos sensores passivos (ópticos). Tais sensores possuem fonte própria de radiação que emitem pulsos de energia na faixa de micro-ondas, a qual interage com a superfície do terreno, retroespalhando parte da radiação incidente. A própria antena que emite a radiação, registra essa energia retroespalhada. Uma grande vantagem de sensores de radar é a sua capacidade de penetrar nuvens e, dependendo do comprimento de onda, de penetrar na estrutura das copas de árvores (JENSEN, 2009). Na Figura 2, é mostrada a frequência de operação dos sensores SAR, enquanto a Figura 3 ilustra a interação de cada frequência em um dossel vegetacional hipotético.

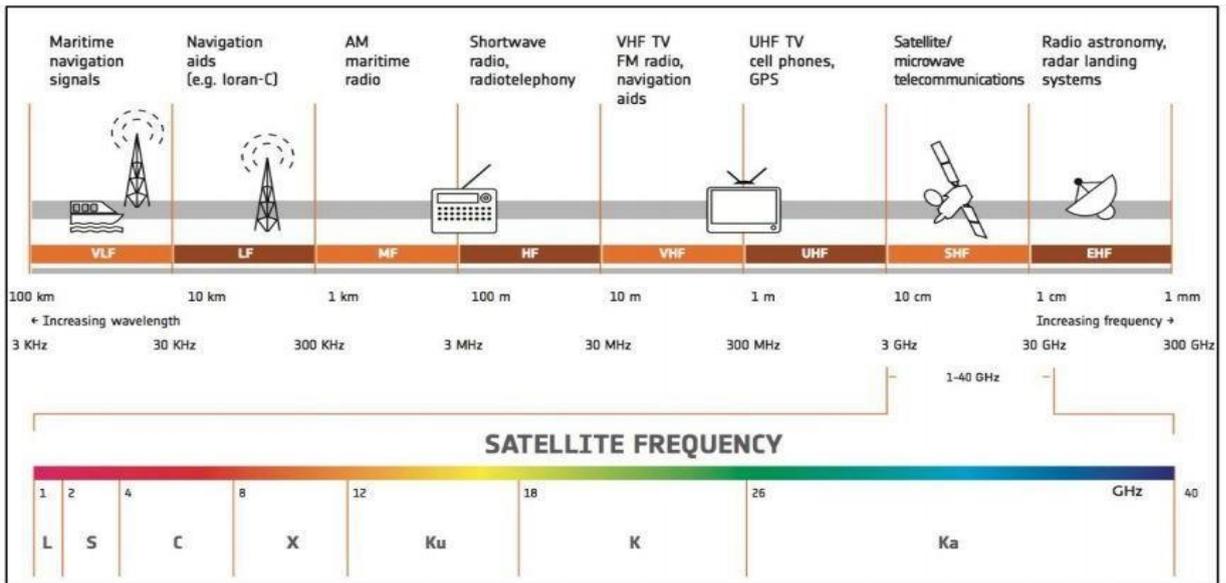


Figura 2. Principais frequências de operação dos sensores SAR. Fonte: curso SAR/DPI.

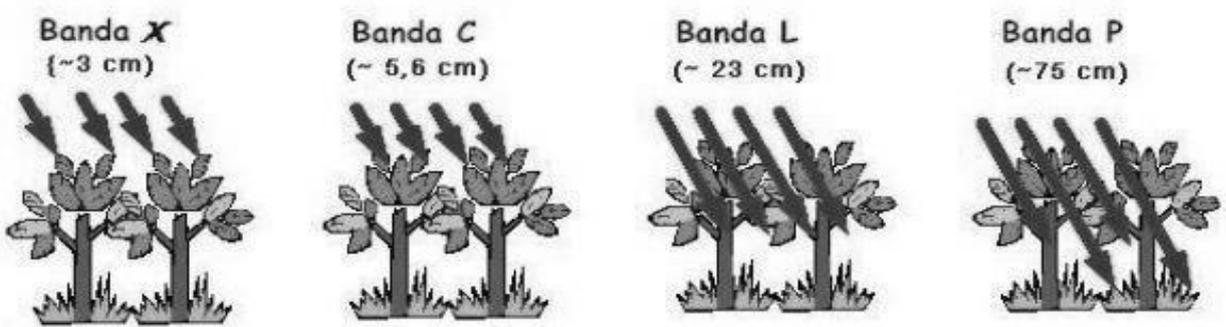


Figura 3. Interação de bandas de radar nas copas de árvores. Fonte: curso SAR/DPI.

O retroespalhamento do radar, diferentemente de uma imagem óptica, é influenciado fortemente pelas características do terreno. Basicamente, o que interfere nesse sinal é a geometria e a rugosidade do terreno: a forma em que a onda emitida é refletida pelo objeto determina a quantidade de energia que vai voltar à antena, conforme mostrado na Figura 4.

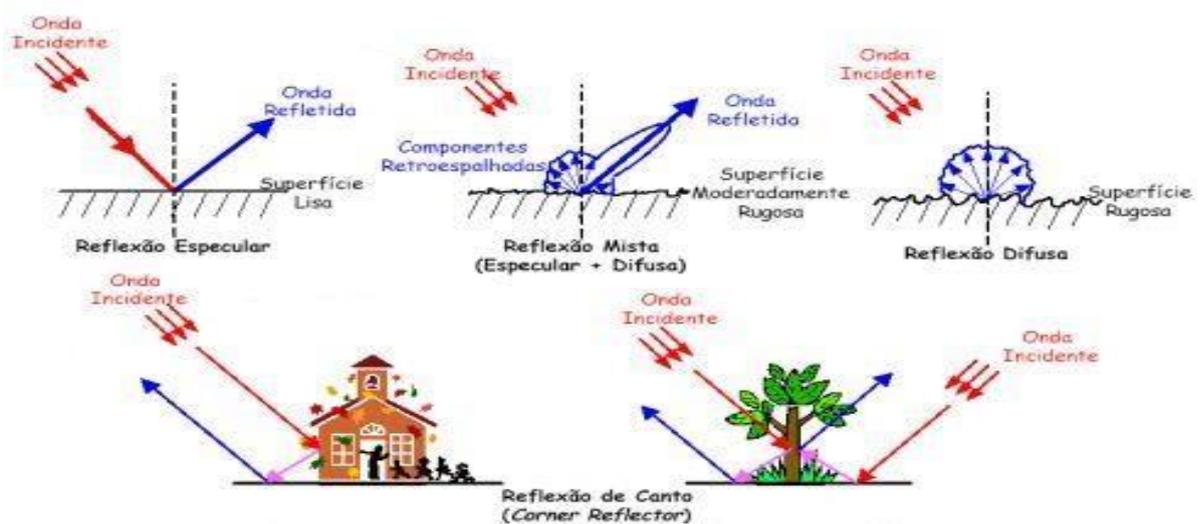


Figura 4 - Tipos de reflexão radar

(Fonte: curso SAR/DPI)

Assim, em função da geometria e rugosidade do terreno, tem-se quatro tipos de reflexão:

- Especular: o raio de energia se perde, o retorno à antena é nulo e o retroespalhamento é mínimo. É o caso das superfícies planas como lagos e rios calmos.
- Reflexão mista: áreas com pouca rugosidade (solos expostos, por exemplo). O retroespalhamento é fraco.
- Reflexão difusa: áreas rugosas (por exemplo, dossel florestal). Retroespalhamento é médio, com bastante *speckle* (ruído aleatório).
- Reflexão de canto: produzida pela reflexão dupla da radiação incidente, comum em locais com presença de edifícios ou árvores maiores. Retroespalhamento é muito alto.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é a constante dielétrica. A constante dielétrica refere-se à habilidade dos materiais em conduzir energia elétrica (JENSEN, 2009). A constante dielétrica varia de 3 a 8 na região do espectro das micro-ondas em superfícies que possuam baixo índice de umidade, mas em superfícies que essa característica é maior, esse valor tende a aumentar (JENSEN, 2009).

As imagens de radar, além de ser influenciada pelo comprimento de onda ou frequência, também depende da polarização da radiação incidente e retroespalhada. Existem quatro modos de polarização: HH – envio e retorno de energia polarizada horizontalmente; HV – envio de energia polarizada horizontalmente e retorna verticalmente; VV – envio e retorno de energia polarizada verticalmente; e VH – envio de energia polarizada verticalmente e retorna horizontalmente (JENSEN, 2009). Outro fator relevante das imagens SAR é o aspecto granulado conhecido como aspecto de “sal e pimenta”, relacionado com o efeito *speckle*. Este efeito é intrínseco às imagens SAR e decorre da interferência aleatória da radiação incidente nos alvos (dispersores) individuais, resultando em uma formação igualmente aleatória de pixels mais escuros ou mais claros (JENSEN, 2009). Filtros espectrais adaptativos são comumente usados para minimizar esses efeitos.

Por fim, o imageamento da superfície terrestre com o uso de sensores orbitais de radar é substancialmente diferente do realizado pelos satélites ópticos. As informações obtidas não oferecem uma interpretação tão intuitiva, e o processamento das mesmas costuma ser pesado e matematicamente complexo. Todavia, muitos estudos com SAR têm demonstrado resultados positivos, como no Rio Negro (FRAPPART et al., 2005) e no rio Amazonas (ARNESEN et al., 2013), o que permite dizer que sensoriamento remoto de radar vem se tornando uma ferramenta importante para diversas análises, principalmente na Amazônia.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é propor uma metodologia para processamento digital de série temporal de imagens de radar com o intuito de analisar a dinâmica de uma área alagada na Amazônia no período de um ano (2016- 2017).

O objetivo específico desta pesquisa é determinar a relação entre área de floresta de campinarana inundada, estimada por meio de análise de cenas de radar do satélite Sentinel-1A, e o nível da água medido por uma estação fluviométrica localizada na sub-bacia do Alto Rio Negro. Este estudo procurará demonstrar que, em regiões onde não há disponibilidade de dados nas estações fluviométricas, é possível utilizar dados de radar para monitorar o nível da água e emitir alertas de possíveis enchentes para remoção de comunidades ribeirinhas próximas.

1.4 Estruturação da dissertação

Esta dissertação foi elaborada no formato de apresentação de artigo científico segundo as diretrizes estabelecidas para o Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília.

No primeiro capítulo, é apresentada uma breve descrição do tema, contendo o problema em questão, a justificativa, bem como os objetivos gerais e específicos do trabalho.

No capítulo seguinte, é apresentado o artigo intitulado “Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto Rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A)”. O artigo visou cumprir os objetivos supracitados e apresenta as áreas alagadas identificadas nas imagens do satélite Sentinel-1A, localizada na Amazônia, juntamente com uma avaliação das variáveis utilizadas e a correlação entre a área alagada delimitada nas imagens de radar e o nível da água medida pela estação fluviométrica de Ajuricaba.

Referências

ARNESEN, A. S.; SILVA, T. S. F.; HESS, L. L.; NOVO, E. M. L. M.; RUDORFF, C. M.; CHAPMAN, B. D.; McDONALD, K. C. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 51-61, 2013.

BROWN, K. M.; HAMBIDGE, C. H.; BROWNETT, J. M. Progress in operational flood mapping using satellite synthetic aperture radar (SAR) and airborne light detection and ranging (LIDAR) data. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 2, p. 196-214, 2016.

DALY, D. C.; PRANCE, G. T. Brazilian Amazon. In: CAMPBELL D. G.; HAMMOND H. D. (Eds.). **Floristic Inventory of Tropical Countries**. Nova York: New York Botanical Garden, p. 401-426, 1989

DIAS, A. P. **Análise espacial aplicada na delimitação de áreas úmidas da planície de inundação do Médio Araguaia** (dissertação de mestrado em Ciências Florestais). Cuiabá: UFMT, 91 f., 2014.

EWEL, K. C. Appreciating tropical coastal wetlands from a landscape perspective. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 8, n. 1, p. 20-26, 2010.

FERREIRA, L. V.; ALMEIDA, S. S.; AMARA, D. D.; PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da estação científica Ferreira Penna: Subsídios para o plano de manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. **Pesquisas, Botânica**, n. 56, p. 103-116, 2005.

FERREIRA, L.V. Effect of flooding duration on species richness, floristic composition and forest structure in river margin habitats in Amazonian blackwater floodplain forests. Implications for future design of protected areas. **Biodiversity and Conservation**, v. 9, p. 1-14, 2000.

FRAPPART, F.; SEYLER, F.; MARTINEZ, J.; LEÓN, J. ; CAZENAVE, A. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 387-399, 2005.

FRAXE, T. J. P.; MEDEIROS, C. M.; SANTIAGO, J. L.; CASTRO, A. P. Terras e águas: gestão de recursos comuns na várzea amazônica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE ANTROPOLOGIA, 26., Porto Seguro, BA. **Anais...** Brasília: ABANT, Abant. Bahia, 16 p., 2013.

GALA, T. S.; MELESSE, A. M. Monitoring prairie wet area with an integrated LANDSAT ETM+, RADARSAT-1 SAR and ancillary data from LIDAR. **Catena**, v. 95, p. 12-23, 2013.

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.

ISA. Instituto Socioambiental. **SIRAD - Sistema de Indicação Radar de Desmatamento**. Brasília, 28 p. , 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parentese, 2009.

JUNG, H. C.; ALSDORF, D.; MORITZ, M.; LEE, H.; VASSOLO, S. Analysis of the relationship between flooding area and water height in the Logone floodplain. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 7-8, p. 232-240, 2011.

JUNK, W. J.; WITTMANN, F.; SCHONGART, J.; PIEDADE, M. T. F. A classification of the major habitats of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, n. 4, p.677-693, 2015.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: INTERNATIONAL LARGE RIVER SYMPOSIUM, Ontário, Canadá, **Proceedings...** p. 110-127, 1989.

KEEL, S. H. K.; PRANCE, G. T. Studies of the vegetation of a white-sand black-water igapó (Rio Negro, Brazil). **Acta Amazonica**, v. 9, n. 4, p. 645-655, 1979.

LOBO, G. S.; WITTMANN, F.; PIEDADE, M. T. F. Response of black-water floodplain (igapó) forests to flood pulse regulation in a dammed Amazonian river. **Forest Ecology and Management**, v. 434, p.110-118, 2019.

MADARI, B.; CUNHA, T. J. F.; SOARES, R. Organic matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazônia. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, p. 21-28, 2011.

MARTINS, F. S. R. V.; SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; XAUD, H. A. M. Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in northern Amazon. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 46, p. 163-174, 2016.

MATGEN, P.; HOSTACHE, R.; SCHUMANN, G.; PFISTER, L.; HOFFMANN, L. ; SAVENIJE, H. H. G. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 7-8, p. 241-252, 2011

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.). **Amazon Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. Springer, Ecological Studies, p. 43-59, 2010.

MOHAMMADI, A.; COSTELLOE, J. F.; RYU, D. Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 70-82, 2017.

PRANCE, G. T. A terminologia dos tipos de florestas amazônicas sujeitas à inundação. **Acta Amazonica**, v. 10, n. 3, p. 495-504, 1980.

SOUSA, R. N. **Influência do pulso de inundação sobre a variação sazonal de queda de folhas em florestas de várzea na Amazônia Central e viabilidade de estimação por sensoriamento remoto** (dissertação de mestrado em Ecologia). Manaus: INPA, 61p., 2013.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R.; RODRIGUES, S. W. P.; COSTA, F. R.; MURA, J. C.; GONÇALVES, F. D. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multipolarized L-band airborne synthetic aperture radar imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 95, p. 88-98, 2011.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing. Active and Passive.** Washington: Artech House, 1986.

VACHON, P. W.; WOLFE, J. C-band cross-polarization wind speed retrieval. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 3, p. 456-459, 2011.

WHITE, L.; BRISCO, B.; DABBOOR, M.; SCHMITT, A.; PRATT, A. A collection of SAR methodologies for monitoring wetlands. **Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 7615-7645, 2005.

Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto Rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A)

Relation between flooding area and water level in the Upper Rio Negro's floodplain: an analysis based on radar data (Sentinel-1A)

¹Sarah Martins Novais Frota, ¹Osmar Abílio de Carvalho Júnior, ²Juan Doblas Pietro

¹Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900 Brasília, DF, Brazil

E-mails: sarah.ambiental@gmail.com, osmarjr@unb.br

²Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE, CEP: 12227-010 ,São José dos Campos – SP

E-mail: juandb@gmail.com

Resumo - Na região Amazônica, há uma fitofisionomia denominada de campinarana, que são ecossistemas próximos a solos pobres e arenosos comumente sujeitos ao alagamento periódico consequente da flutuação do lençol freático. O objetivo desta pesquisa é determinar a relação entre área de floresta de campinarana inundada, estimada por meio de análise de cenas de radar do satélite Sentinel-1A, e o nível da água medido por uma estação fluviométrica. A área de estudo selecionada corresponde à uma cena do satélite Sentinel-1A, localizada na sub-bacia do Alto Rio Negro e engloba parte dos municípios de Caracaraí/Roraima e Barcelos/Amazonas. Foram selecionadas 32 imagens de radar do satélite Sentinel-1A (banda C, polarizações VV e VH, tamanho de pixel de 10 metros, modo de imageamento IW – Interferometric Wide) do período de 05 de outubro de 2016 a 24 de outubro 2017. Para cada polarização, foi definido um limiar de separação entre corpo d'água e alvos terrestres, em termos de coeficiente de retroespalhamento (-12 dB e -19 dB para as polarizações VV e VH, respectivamente). A título de validação, as áreas inundadas que foram mapeadas na cena de 13 de agosto de 2017 foram comparadas com a correspondente área inundada, obtida pela análise de uma cena do satélite óptico Landsat-8 da mesma data e convertida em

normalized water difference index (NWDI). Em seguida, as áreas inundadas estimadas nas 32 cenas de radar foram comparadas com os dados in situ de nível da água fornecidos pela estação fluviométrica de Ajuricaba. De modo geral, as cenas obtidas na polarização VH identificaram valores de áreas inundadas relativamente mais altos em relação às obtidas na polarização VV, principalmente para áreas de inundação menores. Porém, as correlações de Pearson entre área inundada e nível da água para as polarizações VV e VH foram semelhantes e relativamente altas ($R = 0,7889$ e $0,7885$, respectivamente).

Palavras-chave: Radar; SAR; Sensoriamento remoto; Serie temporal; Áreas alagadas.

Abstract - In the Amazon region, there is a phytophysiology called Campinarana, which are ecosystems near poor and sandy soils commonly subject to the periodic flooding consequent to the fluctuation of the water table. The objective of this research is to determine the relation between flooded campinarana forest area, estimated by means of the Sentinel-1A radar satellite data analysis, and the water level measured by a fluviometric station. The study area corresponds to a Sentinel-1A satellite scene located in the Upper Rio Negro sub-basin and comprises part of the municipalities of Caracaraí (Roraima State) and Barcelos (Amazonas State). We selected 32 Sentinel-1A images obtained in the C-band, VV and VH polarizations, 10-meter pixel size, Interferometric Wide image acquisition mode, and overpasses from October 5, 2016 to October 24, 2017. For each polarization, a threshold between water body and ground targets was defined in terms of backscattering coefficients (-12 dB and -19 dB for VV and VH polarizations, respectively). As a validation procedure, the flooded area mapped in the scene of August 13, 2017 was compared to the corresponding flooded area obtained from a Landsat-8 optical scene. This Landsat imagery, obtained in the same Sentinel-1A overpass, was converted into normalized water difference index (NWDI). The flooded areas estimated in the 32 radar scenes were compared with the in situ water level data provided by the fluvial station of Ajuricaba. In general, the scenes obtained in the VH polarization presented larger values of flooded areas in comparison with those obtained in the VV polarization, especially for smaller flooded areas. However, Pearson's correlations between flooded area and water level for VV and VH polarizations were similar and relatively high ($R = 0.7889$ and 0.7885 , respectively).

Keywords: Radar; SAR; Remote sensing; Time series; Flooded areas

2.1 Introdução

As zonas úmidas da Amazônia, formadas pelo sistema de inundação rio-planície, correspondem a um dos ecossistemas mais complexos do planeta e são caracterizadas pela alta biodiversidade e produtividade, além de promoverem a preservação de recursos hídricos e vários serviços ecossistêmicos para população humana (EWEL, 2010). Na bacia Amazônica, as florestas alagadas ocupam uma área de aproximadamente 400.000 km² (SOUSA, 2013). Os processos biológicos e biogeoquímicos que envolvem a vegetação e todo o sistema estão intrinsecamente ligados aos pulsos de inundação (HUANG et al., 2014). Na bacia do Rio Negro, a área, a profundidade e a duração da inundação sazonal têm concussão direta na qualidade e quantidade de populações vegetais (JUNG et al., 2011). No alto Rio Negro, há uma grande concentração de espécies endêmicas de campinaranas, as quais possuem uma fitofisionomia delgada, com sub-bosques relativamente abertos e sem a presença de cipós e lianas (GUIMARÃES et al., 2016). Targhetta (2012) mencionou que os igapós sobre solos arenosos constituem importantes fontes de espécies para as campinaranas, podendo também funcionar como corredores de dispersão para algumas destas espécies. Mesmo com tamanha importância e ocupando 7% da Amazônia Legal, ainda há poucos estudos na literatura sobre esses ecossistemas (DALY et al., 1989).

Há certa dificuldade quando se estuda a planície de inundação, pois a análise da dinâmica espaço-temporal do fluxo de águas que geralmente ocupam extensas áreas é bastante complexa (JUNG et al., 2011). Na Amazonia, há estações de medição in situ de fluviometria que auxiliam na análise desse comportamento espaço-temporal, fornecendo informações sobre cheias e vazantes que são essenciais na compreensão da dinâmica das águas nas planícies de inundação (ALSDORF et al., 2007). Essas estações fluviométricas são gerenciadas pela Agência Nacional das Águas (ANA), que é responsável pela rede hidrometeorológica nacional, composta por mais de 4.500 estações no país (ANA, 2016). Em lugares remotos, o número dessas estações é reduzido e muitas vezes não possuem dados atualizados. A região Norte foi a última região do Brasil a receber estações de medição, justamente por conta da limitação de acesso. A distribuição das estações geralmente leva em consideração as necessidades

dos principais usuários de recursos hídricos, isto é, os setores energético, agrícola, transporte fluvial, saneamento, defesa civil, instituições de pesquisa, dentre outros.

Técnicas de sensoriamento remoto têm demonstrado grande capacidade de manipular dados de extensas áreas alagadas (JUNG et al., 2011). As imagens orbitais têm sido cada vez mais utilizadas para este fim, aumentando a chance de estimar variações nos níveis da água e de mapear a extensão de inundações (e.g., SMITH, 1997; ALSDORF et al., 2007; JUNG et al., 2011). Tanto os sensores ópticos como os de radar de abertura sintética (SAR - synthetic aperture radar) podem identificar áreas inundadas. Os sensores ópticos apresentam limitação quanto às condições ambientais, como presença de cobertura de nuvens (HUANG et al., 2013). O alto índice de cobertura de nuvens na Amazônia torna os sensores de radar mais adequados para a aquisição de dados temporais (PEREIRA et al., 2018). No dia 03 de abril de 2014, a Agência Espacial Europeia (ESA) lançou o satélite de radar denominado de Sentinel-1A, que opera na banda C (comprimento de onda de ~ 5 cm), polarizações VV e VH (V = polarização vertical; H = polarização horizontal) e tamanho de pixel de 10 metros no modo de imageamento Interferometric Wide (IW) (ESA, 2013). O Sentinel-1A opera com uma estabilidade radiométrica aprimorada, seus dados podem ser obtidos gratuitamente da internet e a resolução espacial é de 12 dias (TORRES et al., 2012).

Os dados SAR, por sua vez, apresentam alguns desafios na identificação de áreas alagadas, pois a sua análise deve ser feita levando-se em consideração outros fatores que influenciam no retorno do radar, como a frequência de operação do sensor (bandas X, C ou L), polarização, direção da varredura, velocidade e direção do vento no momento de aquisição das imagens, estrutura das folhas e troncos e umidade da vegetação (WESTMAN et al., 1987; VAN DER SANDEM et al., 2012). Vários estudos têm sido realizados utilizando séries temporais de dados SAR para analisar a extensão de inundação de grandes bacias (e.g., CAZALS et al., 2016; PEREIRA et al., 2018; RÜETSCH et al., 2019).

Considerando que as medições fluviométricas são diárias e a passagem do radar são mais esporádicas, o objetivo desta pesquisa é determinar a relação entre área de floresta de campinarana inundada, estimada por meio de análise de cenas de radar do satélite Sentinel-1A, e o nível da água medido por uma estação fluviométrica localizada na sub-bacia do Alto Rio Negro. Este estudo procurará demonstrar que, em regiões onde não há disponibilidade de estações fluviométricas, é possível utilizar dados de radar

para monitorar o nível da água e emitir alertas de possíveis enchentes para remoção de comunidades ribeirinhas próximas.

2.2 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na divisa do estado do Amazonas com Roraima, na planície de inundação da sub-bacia do Alto Rio Negro, pertencente à grande bacia Amazônica. A área localiza-se nas coordenadas $0,452166^\circ$ de latitude sul e $62,537373^\circ$ de longitude oeste, zona UTM 20, ocupa uma área de 1.600 km^2 e é banhada pelo Rio Demeni, Rio Branco e Rio Negro (Figura 5). A temperatura média anual é de $26,2^\circ \text{C}$, com precipitação média anual de 1935 mm . O Rio Negro é o maior rio de águas escuras do mundo e o maior afluente da margem esquerda do Rio Amazonas, com $1,5 \text{ mil km}$ de extensão (ROMAN, 2018). Apesar das águas escuras do Rio Negro serem pobres em nutrientes, a bacia possui cerca de 550 espécies de peixes com características ecológicas específicas e valiosas do ponto de vista ambiental (KEEL e PRANCE, 1979).

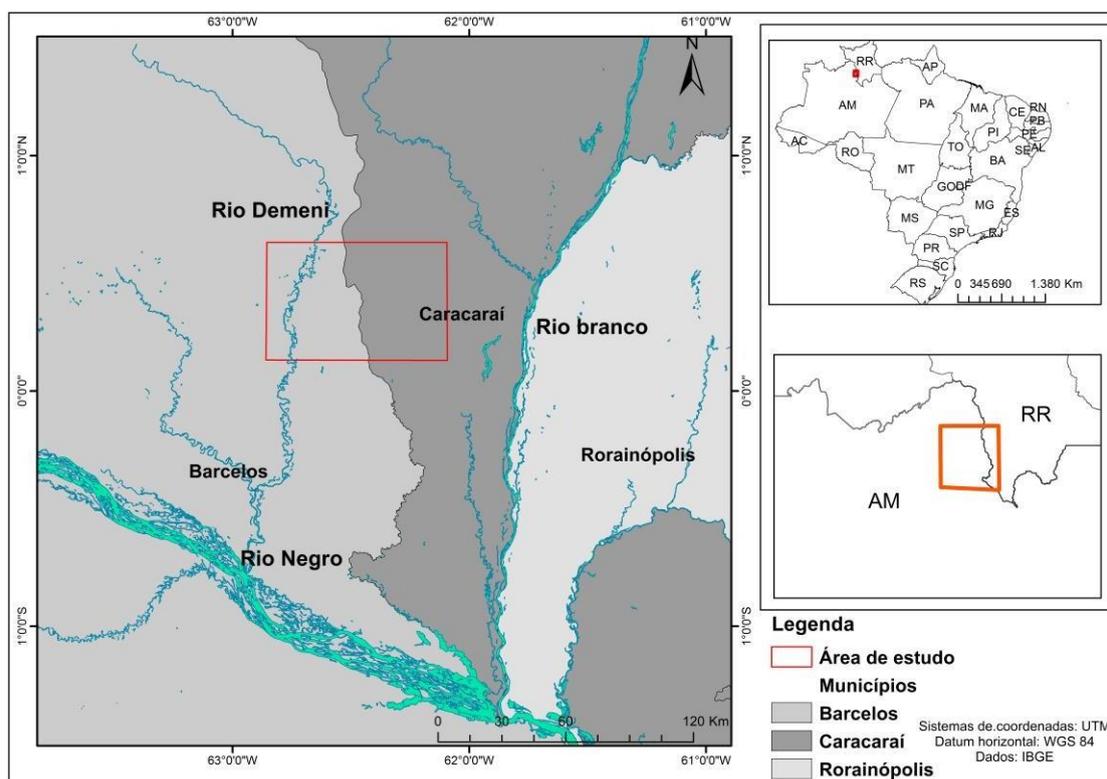


Figura 5. Mapa de localização envolvendo os Rios Demeni, Rio Branco e Rio Negro, próximo à sede do município de Barcelos – AM.

Essa região possui vegetação predominante de Caatinga amazônica, também chamada de floresta de campina ou campinarana (do tupi rana = falsa; “falsa campina”). Esse tipo de vegetação é composta por árvores delgadas de pouca espessura, dossel de aproximadamente 20 metros de altura, poucas árvores emergentes até 30 metros e presença rara de cipós espessos. Tanto as árvores do dossel quanto as do sub-bosque possuem copas pequenas, com poucos galhos (OLIVEIRA e DALY, 2001). Apesar do importante avanço na pesquisa sobre a planície Amazônica, a floresta de campinarana do Rio Negro tem sido pouco estudada em termos de estrutura, composição florística, características ambientais e regime hídrico (MONTERO e LATRUBESSE, 2013; GUIMARÃES et al., 2016).

No Rio Negro, as enchentes ocorrem durante a estação chuvosa (dezembro a julho). A temperatura é uniforme e alta em toda a bacia Amazônica, enquanto os tipos de solos apresentam grande diversidade, desempenhando, portanto, um papel mais importante que o clima na diferenciação de tipos de vegetação (KEEL e PRANCE, 1979). Os solos predominantes na extensa planície da região são solos arenosos hidromórficos (Espodosolos) e com áreas isoladas de Latossolo Amarelo, caracterizados por elevado grau de intemperismo e com fortes restrições nutricionais (LIMA et al., 2005). Em geral, são solos ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica, baixa fertilidade e baixo potencial de produção (MADARI e SOARES, 2011). Na estação seca, verifica-se a formação de praias com bom potencial turístico para a região. As peculiaridades do Rio Negro e sua profunda interação com os corpos hídricos fazem com que quaisquer ações desencadeadas no espaço geográfico da região hidrográfica produzam efeitos imediatos sobre os recursos hídricos.

2.1.1 Dados

Foram selecionadas 32 cenas do satélite Sentinel-1 da área de estudo, entre os meses de outubro de 2016 a outubro de 2017, todas com periodicidade de 12 dias (Tabela 1). Essas cenas foram obtidas da plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) no modo de imageamento denominado de *Interferometric Wide* (IW), com duas polarizações (VV e VH) e tamanho de pixel de 10 m. Essas imagens são disponibilizadas nessa plataforma com alguns pré-processamentos, tais como a remoção

de ruídos termais, mescla de bordas, calibração radiométrica e ortorretificação. Na etapa de ortorretificação, os dados são convertidos para coeficiente de retroespalhamento (σ°) utilizando-se o modelo digital de elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 metros. Os coeficientes foram fixados no 1° e no 99° percentil para preservar a faixa dinâmica em relação aos valores anômalos e quantificados para 16 bits (GEE, 2015).

Tabela 1. Data das imagens de radar do satélite Sentinel-1A analisadas neste estudo.

| Sequência | Data | Sequência | Data |
|------------------|-------------|------------------|-------------|
| 1 | 05/10/2016 | 17 | 27/04/2017 |
| 2 | 17/10/2016 | 18 | 09/05/2017 |
| 3 | 29/10/2016 | 19 | 21/05/2017 |
| 4 | 10/11/2016 | 20 | 02/06/2017 |
| 5 | 22/11/2016 | 21 | 14/06/2017 |
| 6 | 16/12/2016 | 22 | 26/06/2017 |
| 7 | 28/12/2016 | 23 | 08/07/2017 |
| 8 | 09/01/2017 | 24 | 20/07/2017 |
| 9 | 21/01/2017 | 25 | 01/08/2017 |
| 10 | 02/02/2017 | 26 | 13/08/2017 |
| 11 | 14/02/2017 | 27 | 25/08/2017 |
| 12 | 26/02/2017 | 28 | 06/09/2017 |
| 13 | 10/03/2017 | 29 | 18/09/2017 |
| 14 | 22/03/2017 | 30 | 30/09/2017 |
| 15 | 03/04/2017 | 31 | 12/10/2017 |
| 16 | 15/04/2017 | 32 | 24/10/2017 |

Para validar as detecções das áreas inundadas nas cenas de radar, foi obtida ainda uma imagem óptica do satélite Landsat-8 *Operational Land Imager* (OLI) do dia 13 de agosto de 2017 (mesma data de passagem da 26ª cena do Sentinel-1A) e sem cobertura de nuvens (Tabela 2).

A estação fluviométrica de Ajuricaba é uma das poucas que fornecem dados atualizados de nível da água próximos à área de estudo (Figura 6). Os dados são medidos por meio da leitura direta de uma régua linimétrica que fica alinhada perpendicularmente ao eixo do rio. A estação de Ajuricaba localiza-se à margem esquerda do Rio Demeni e à montante da área de estudo, a uma distância aproximada de 35 km entre ambas. Essa estação é gerenciada pela ANA e os dados estão disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A coleta diária dos dados é feita por um observador responsável por medir as leituras das régua duas vezes ao dia, às 7 horas e às 17 horas. Os dados diários são obtidos por meio de média aritmética simples das duas leituras (ANA, 2016).

Tabela 2. Características dos modos de imageamento dos satélites Sentinel-1A e Landsat-8 considerados neste estudo.

| Parâmetros | Sentinel-1A | Landsat-8 |
|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Faixa espectral | Microondas (banda C) | Visível e infravermelho próximo e médio |
| Resolução temporal | 12 dias | 16 dias |
| Modo de imageamento | Interferometric Wide (IW) | Varredura |
| Resolução espacial | 5 m x 20 m (azimute x alcance no terreno) | 30 m |
| Tamanho de pixel | 10 m | 30 m |
| Faixa de imageamento | 250 km | 185 km |
| Ângulo de incidência | 31° - 46° | Nadir |
| Órbita | Descendente | Descendente |
| Polarização | VV e VH | - |

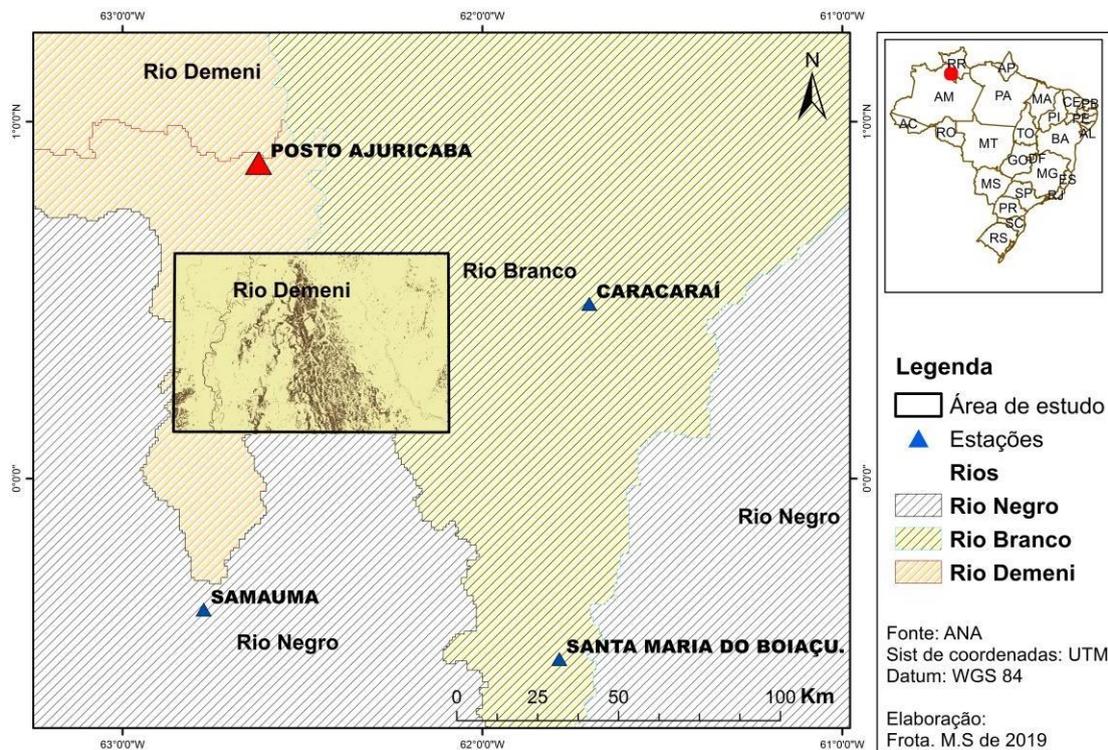


Figura 6. Localização das estações fluviométricas próximas da área de estudo.

2.1.2 Etapas do processamento

Neste estudo, foi proposta uma metodologia para comparar as polarizações VV e VH do Sentinel-1A para identificar a extensão da área inundada e correlacionar com dados in situ de nível da água da estação fluviométrica de Ajuricaba (Figura 7). As análises foram conduzidas inicialmente considerando-se as polarizações VV e VH de forma individualizada. Na sequência, foi feito um empilhamento (cubo temporal), de modo que todos os processamentos pudessem ser aplicados simultaneamente para ambas as polarizações. Em seguida, as cenas foram processadas pela técnica de filtragem espacial do tipo passa-baixa com intuito de reduzir o efeito *speckle*, um tipo de ruído multiplicativo e aleatório que é inerente ao processo de aquisição de imagens de radar. Os filtros devem manter aproximadamente a intensidade média do retroespalhamento das imagens, porém, com redução da variância e com preservação de bordas e textura (DONG et al., 2001). Nesse estudo, foi considerado o filtro Lee adaptativo com uma janela de 3 pixels x 3 pixels (LEE et al., 2006).

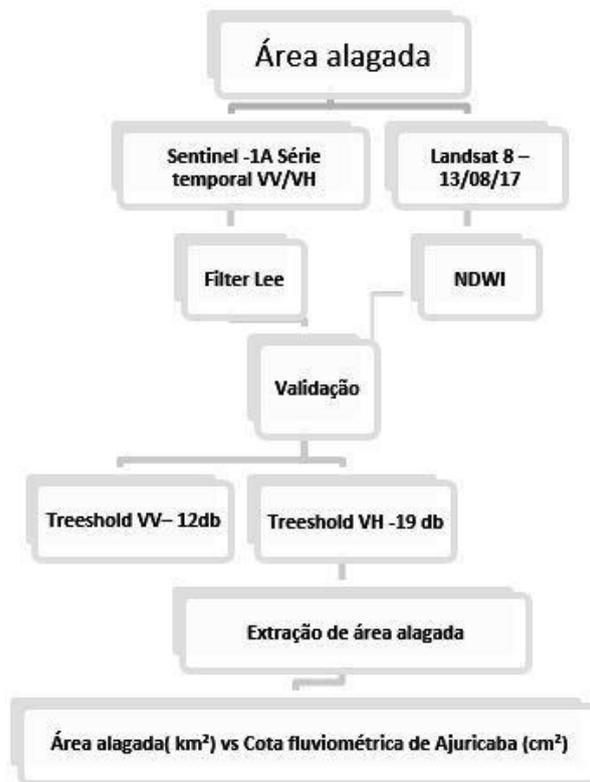


Figura 7. Fluxograma com as principais etapas do estudo.

Posteriormente, o método do Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) foi aplicado para a imagem Landsat-8 para validar a estimativa de área de inundação envolvendo as duas polarizações. Na literatura, diversas combinações de cálculo NDWI são apresentados e discutidos (MCFEETERS, 1996; XU, 2006). Neste estudo, o método utilizado foi o proposto por McFeeters (1996), que definiu o NDWI como:

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)}$$

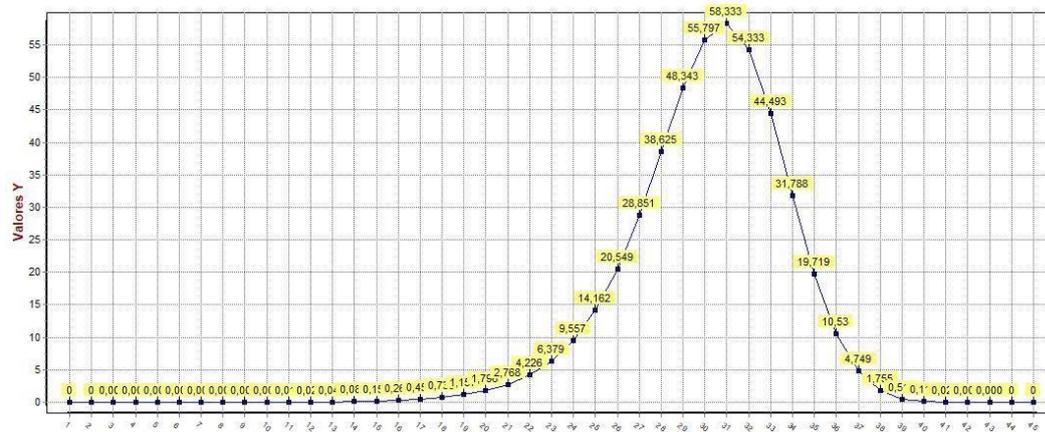
onde GREEN é uma banda que opera na faixa espectral do verde e NIR representa a banda espectral que opera na faixa espectral do infravermelho próximo. A seleção desses comprimentos de onda auxiliou nos seguintes processos: maximização da resposta espectral tipicamente elevada dos corpos d'água na faixa espectral do verde; e minimização da resposta espectral tipicamente baixa dos corpos d'água na faixa espectral do NIR. O intervalo de valores do NDWI varia de -1 a +1. McFeeters (1996)

definiu zero como sendo o limiar, ou seja, será água se $NDWI \geq 0$ e não água se $NDWI < 0$.

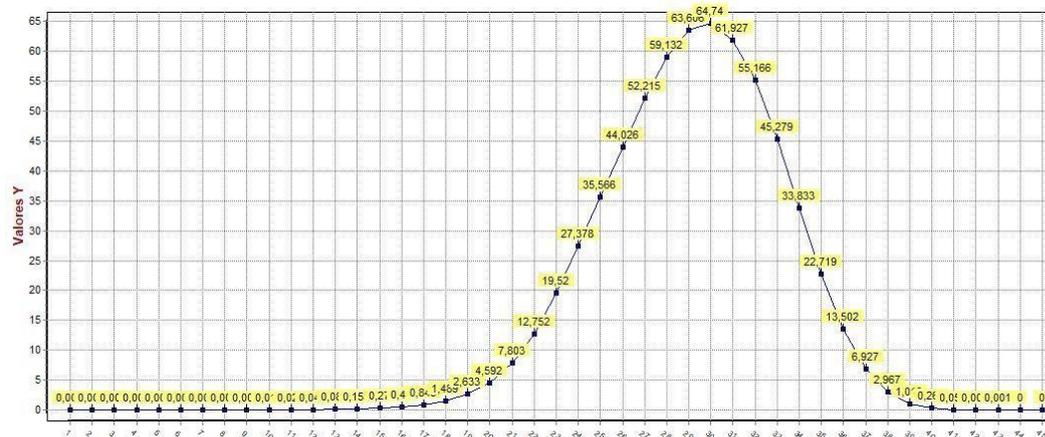
Após identificar as áreas alagadas para ambas polarizações, realizou-se a correlação entre os dados. A análise foi feita por meio do coeficiente de determinação (R^2) que consiste em uma análise estatística envolvendo duas variáveis, seguido de obtenção de linha de tendência linear ou não-linear. Realizou-se ainda o fatiamento desses dados de área alagada em iguais períodos e com mesmo número de amostras (datas), e verificou-se a correlação separadamente para cada período, afim de observar como essa proporção se comporta nos períodos de vazante e cheia. Cazals et al. (2016) mencionaram que a acurácia na detecção de áreas de inundação por meio dos dados de radar na banda C depende do tipo de vegetação associado (pequenos ou grandes dósseis). A cobertura vegetal pode impedir que os sinais de radar atinjam a superfície d'água subjacente, interferindo na delimitação de áreas de inundação.

2.1.3 Identificação de áreas inundadas

As extensões de inundação estimadas por meio de imagens Sentinel-1A e Landsat-8 convertidas em NDWI foram comparadas e analisadas por meio do coeficiente Kappa de Cohen, com suporte do software de processamento digital de imagens Abílio, para as polarizações VV e VH. Um limiar global para o limite terra-água foi definido com base nos histogramas das imagens SAR utilizadas no estudo contendo apenas as áreas identificadas como inundações. Uma abordagem de limiar (*threshold*) foi aplicada à imagem-diferença para extrair o maior valor negativo e as mudanças nos coeficientes de retroespalhamento, destacando-se, assim, as áreas com maior probabilidade de serem inundadas. Nessa etapa, houve o fatiamento em 45 intervalos para identificar o melhor índice Kappa. Na polarização VH, o melhor índice Kappa foi de 64,9, enquanto para a polarização VV, o índice Kappa foi de 58,3 (Figura 8). Com base nesses valores, foi calculado o melhor valor de corte para ambas as polarizações, por meio da seguinte equação: intervalo mínimo + (intervalo* maior valor de intervalo). Verificou-se que os melhores valores de corte que permitiam melhor definição da extensão de inundação e melhor preservação dos limites de bordas dos corpos hídricos seriam -19 dB para VH e -12dB para VV, para toda a série temporal.



(a)



(b)

Figura 8. Coeficientes Kappa para as polarizações VH (a) e VV (b), obtidas por meio do software Abílio.

Portanto, para se alcançar o resultado da acurácia geral da classificação automática, realizou-se a proporção do número de pixels corretamente classificados pelo número total de pixels, enquanto o Kappa é um coeficiente que varia de 0 a 1 representando um índice geral de concordância. A Tabela 3 demonstra a qualidade da concordância a partir do resultado do coeficiente Kappa.

Tabela 3. Interpretação do coeficiente Kappa.

| Coeficiente Kappa de Concordância | |
|------------------------------------------|-----------------------------|
| Valor do coeficiente Kappa | Interpretação |
| < 0 | Sem concordância |
| 0 – 0,19 | Concordância pobre |
| 0,20 – 0,39 | Concordância fraca |
| 0,40 – 0,59 | Concordância moderada |
| 0,60 – 0,79 | Concordância substancial |
| 0,80 – 1,00 | Concordância quase perfeita |

Fonte: adaptado de Landis e Koch (1977).

2.3 Resultados

2.3.1 Cálculo de áreas de inundação por meio de imagens Sentinel-1A

Na Figura 9, é mostrada a dinâmica temporal das áreas inundação da área de estudo, estimada pelas polarizações VV e VH do Sentinel-1A. Ambas as polarizações apresentaram padrão temporal similar ao longo do período analisado. Houve uma ligeira tendência da polarização VH em estimar maior área de inundação, em relação à polarização VV. A partir de 26 de junho de 2017, as duas polarizações tendem a apresentar áreas de inundação bastante similares. Durante o período analisado, as médias de áreas inundadas nas 32 cenas consideradas foram de 282 km² (polarização VV) e 326 km² (polarização VH). A maior área de inundação foi obtida em 26 de junho de 2017 (459 km² e 468 km² para as polarizações VV e VH, respectivamente), enquanto a menor área foi obtida em 16 de dezembro de 2016 (132 km², polarização VV) e em 22 de novembro de 2016 (176 km², polarização VH).

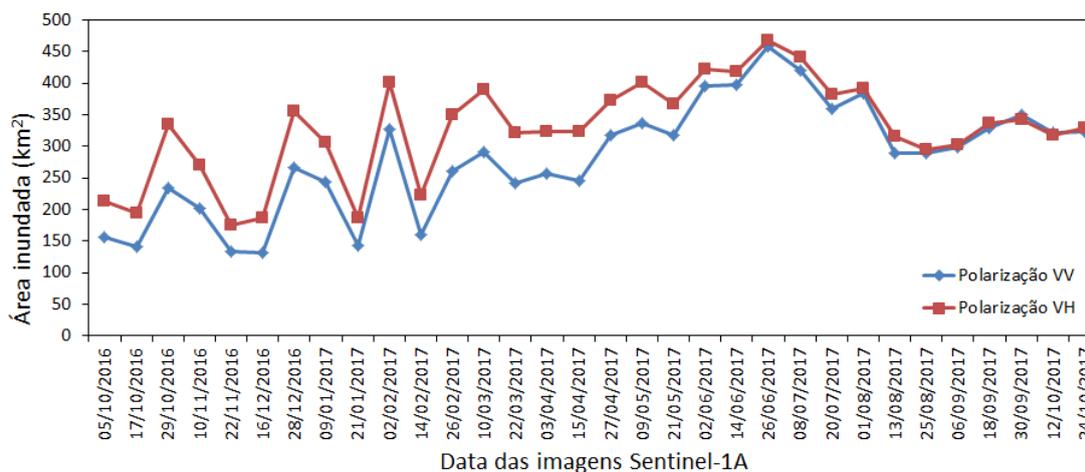


Figura 9. Dinâmica temporal de área alagada na área de estudo, estimada pelas cenas do satélite Sentinel-1A nas polarizações VV e VH.

As diferenças nas estimativas de áreas alagadas nas duas polarizações são decorrentes do fato de que a intensidade de retroespalhamento dos sinais de radar incidente em alvos terrestres varia em função da polarização e das características biofísicas dos alvos, notadamente, o conteúdo de água no dossel vegetal e nos solos, a rugosidade do terreno e a estrutura das árvores e arbustos presentes no dossel (DALLEMAND et al., 1993). As variações nas diferenças no cálculo de área inundada ao longo do período considerado ocorrem porque as características biofísicas dos alvos são dinâmicas ao longo do ano. Clement et al. (2018), ao analisar 13 cenas do Sentinel-1A obtidas no modo de imageamento IW da região de Yorkshire, Reino Unido, também obtiveram a maioria das estimativas de áreas de inundação mais altas para a polarização VH. Segundo esses últimos autores, a falta de consistência na estimativa de áreas inundadas nas duas polarizações pode ser decorrente da rugosidade relativamente alta da superfície da água, causada pela presença de ventos. Após o pico da cheia em 26 de junho de 2017, ambas as polarizações apresentaram estimativas de áreas mais próximas. Os resultados concordam ainda com a afirmação de Bousbih et al. (2017). Segundo esses autores, o retroespalhamento dos sinais de radar incidentes em corpos d'água tende a aumentar na polarização VV.

Na Figura 10, é mostrada a relação entre as estimativas de áreas obtidas pelas duas polarizações. Verifica-se uma alta correlação linear entre ambas as polarizações, com valor de R^2 de 0,96. Há uma tendência de superestimação da área inundada pela polarização VH quando a extensão é relativamente menor, porém, com tendência de

equiparação para áreas superiores a 500 km². Estimativas de áreas de inundação situadas no intervalo de aproximadamente 250 km² a 350 km² apresentaram ora uma boa concordância entre as duas polarizações, ora uma superestimativa da polarização VH.

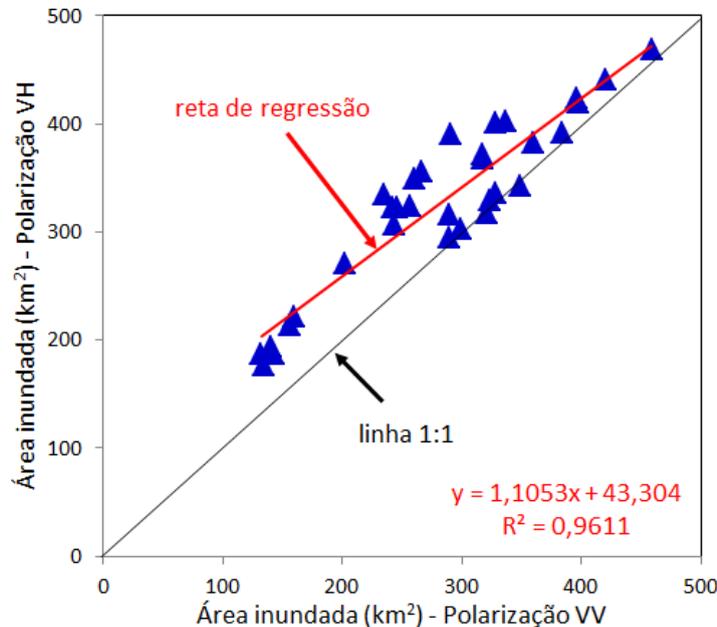


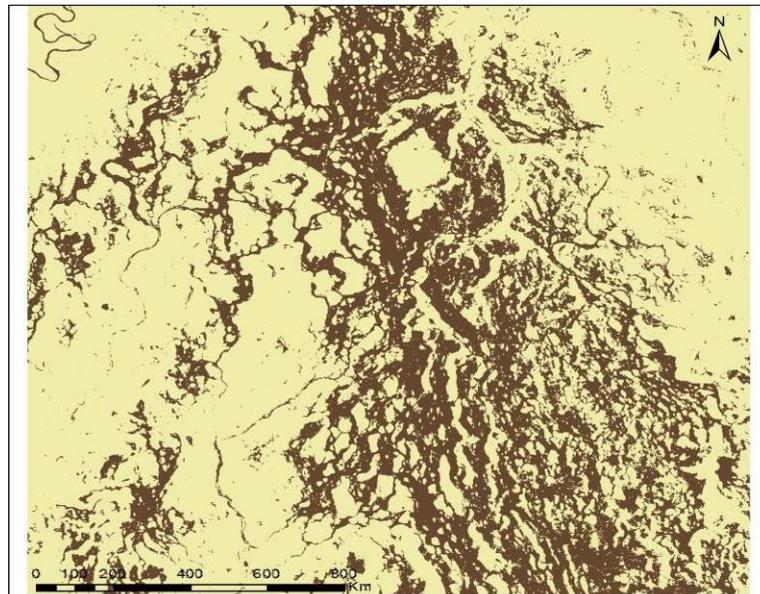
Figura 10. Relação entre as áreas de inundação estimadas pelas polarizações VV e VH.

2.3.2 Mapeamento de área de inundação por meio de imagens Landsat-8

O resultado do mapeamento de área inundada utilizando a técnica do NDWI aplicada à imagem Landsat-8 OLI obtida no dia 13 de agosto de 2017 é mostrado na Figura 11. Pela técnica do NDWI, foram mapeados 489 km² de área inundada, ligeiramente superior às áreas mapeadas pelas polarizações VV e VH do Sentinel-1A (290 km² e 316 km², respectivamente). O coeficiente kappa (κ) variou de 0,58 para VV e de 0,64 para VH, apresentando um bom índice entre o resultado óptico e as duas polarizações. Em algumas poucas áreas, a polarização VH identificou áreas adicionais de inundação em relação à cena do Landsat-8. Somente com dados de validação de campo poder-se-ia afirmar que essas áreas adicionais correspondem, de fato, a áreas de inundação. É possível ainda que correspondam a erros de classificação, uma vez que sombras nas imagens de radar nas bordas entre dossel de vegetação principalmente arbórea e corpos d'água, decorrentes do imageamento lateral que é inerente ao processo

de aquisição de dados de radar de visada lateral, podem ser confundidas com água (RÜETSCHI et al., 2019).

a)



b)

c)

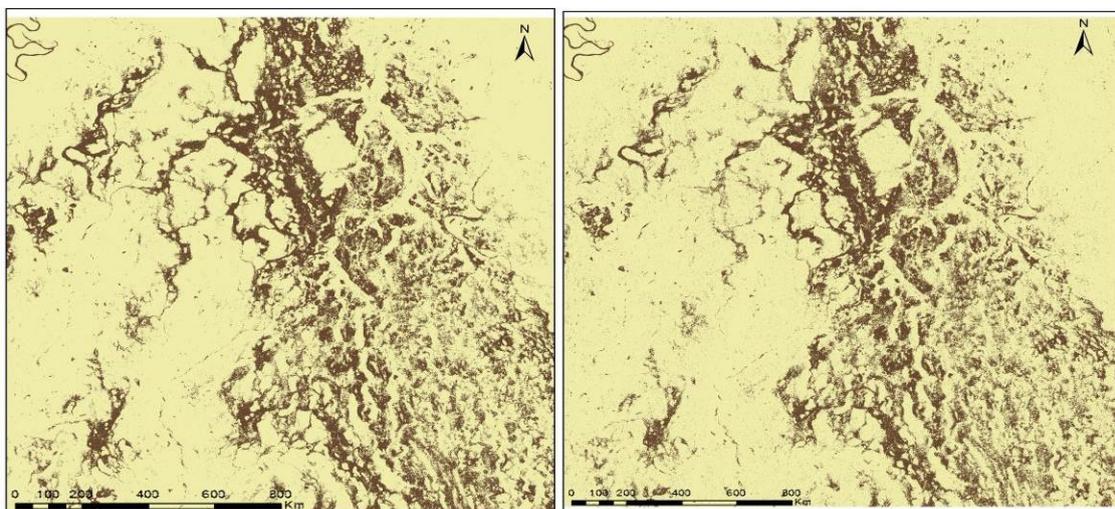


Figura 11. Resultado do mapeamento de área inundada por meio da técnica de NDWI aplicada à cena do satélite Landsat-8 do dia 13 de agosto de 2017 (a) e comparação com os mapeamentos obtidos pelas cenas do satélite Sentinel-1A da mesma data nas polarizações VV (b) e VH (c).

2.3.3 Correlação entre áreas inundadas e cotas altimétricas da estação fluviométrica

Na Figura 12, é mostrada a série temporal das cotas altimétricas no período de 05 de outubro de 2016 a 24 de outubro de 2017, relacionando-a com as estimativas de áreas inundadas obtidas por meio das polarizações VV e VH do Sentinel-1A. Como as leituras das cotas altimétricas são realizadas diariamente, os seus dados correspondem exatamente às datas de passagens do satélite.

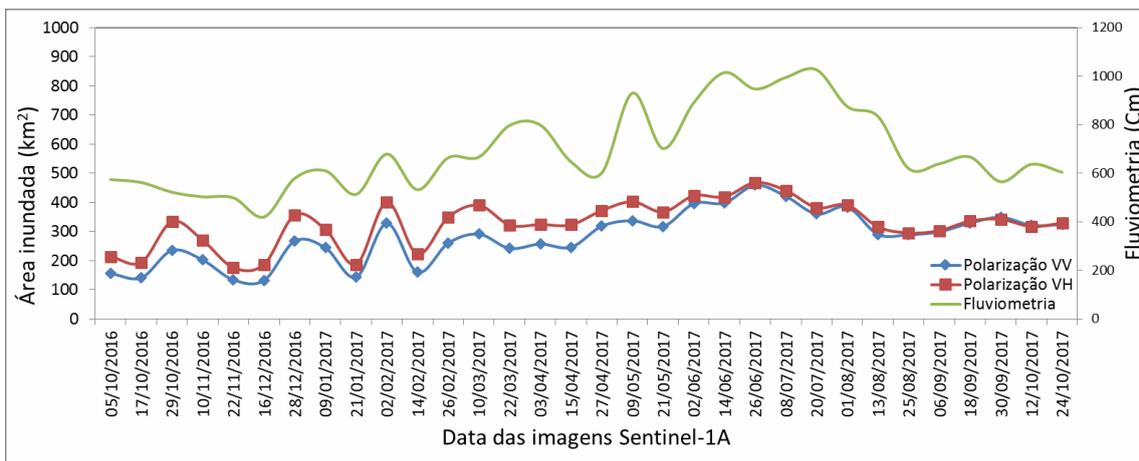
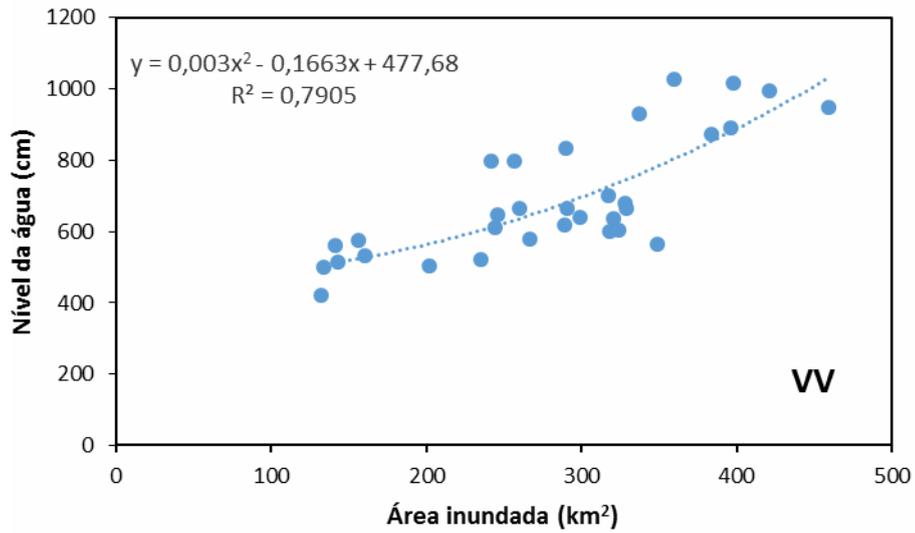


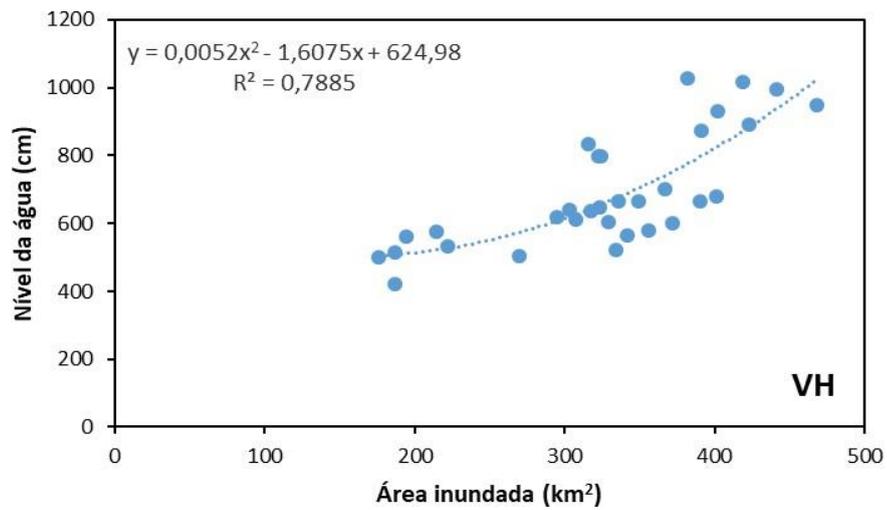
Figura 12. Relação entre cota altimétrica obtida da estação fluviométrica de Ajuricaba e áreas inundadas estimadas pelas polarizações VV e VH do Sentinel-1A.

Foi identificada uma relação positiva entre a área inundada e as variações diárias da cota fluviométrica da estação para a área de estudo (Figuras 13 e 14). O coeficiente de correlação está relacionado com o fractal da paisagem. Inicialmente, valores baixos de R^2 foram encontrados entre as variáveis ao usar um modelo linear ($R^2 = 0,77$ para a polarização VV e $R^2 = 0,76$ para a polarização VH). Valores moderados de R^2 foram encontrados para modelo exponencial, indicando que a área de estudo possui uma dinâmica de inundação lagunar, onde o aumento de área é proporcional ao quadrado do aumento da altura. Portanto, o ajuste de dados foi realizado com base em uma polinomial de segunda ordem. Com base nisso, foi realizado a correlação exponencial entre área inundada estimada pelas polarizações VV(a) e VH (b) e nível da água da estação fluviométrica de Ajuricaba envolvendo toda a série temporal, conforme a figura 13.

Cazals et al. (2016) afirmaram que, na sua área de estudo, águas abertas foram melhor identificadas pelos dados do Sentinel-1A, pois as bordas se encontravam mais nítidas, sem a influência de dosséis de vegetação densos.



(a)



(b)

Figura 13. Correlação exponencial entre área inundada estimada pelas polarizações VV (a) e VH (b) e nível da água da estação fluviométrica de Ajuricaba envolvendo toda a série temporal

2.4 Discussão

Esse estudo se propôs a estimar, primeiramente, as áreas alagadas utilizando dados do Sentinel-1A e posteriormente a correlação entre esses dados com o nível altimétrico da estação de Ajuricaba. As estimativas de áreas alagadas foram validadas por meio de uma imagem óptica do satélite Landsat-8 com a mesma data de passagem do Sentinel-1A. O NDWI foi a técnica aplicada para delimitar áreas alagadas na imagem Landsat-8. O índice kappa obtido foi de 0,64 para a polarização VV e de 0,58 para a polarização VH. O limiar utilizado como valor de corte para separar área inundada de outros alvos terrestres foi de -12 dB para a polarização VV e de -19 dB para a polarização VH.

Manjusree et al. (2012) mencionaram que é provável que a polarização VH superestime áreas alagadas, pois as polarizações cruzadas apresentam variação mais ampla no retroespalhamento dos sinais de radar incidentes sobre a vegetação, criando sombras no contato entre corpos d'água e dossel vegetal que geralmente são identificadas como água. Clement et al. (2018) sugeriram cautela na utilização de dados ópticos para validar dados SAR para estimar áreas alagadas, pois podem existir imprecisões nessa identificação. Em outras palavras, não deve ser considerada como uma técnica altamente confiável, mesmo porque somente uma única imagem óptica de referência foi utilizada neste estudo. Além disso, não foi possível utilizar a imagem ideal, isto é, do período de máxima inundação, devido à grande cobertura de nuvens.

A polarização VV, por sua vez, tende a subestimar as áreas de inundação, somente conseguindo se igualar à VH próximo do período de cheia. Bousbih et al. (2017) justificaram que a polarização VV possui uma sensibilidade maior à umidade do solo. Quanto mais a vegetação fica em segundo plano na paisagem e a água toma maiores proporções, maior é o sinal do retroespalhamento de VV.

Posteriormente, as áreas alagadas identificadas pelas duas polarizações foram correlacionadas com o nível d'água da estação fluviométrica de Ajuricaba. Essa análise mostrou uma boa correlação para o período total de estudo e para ambas as polarizações. As correlações de Pearson para as polarizações VV e VH foram semelhantes ($R = 0,7905$ e $0,7885$, respectivamente), corroborando com resultados obtidos por Twele et al. (2016), que mostraram que a polarização VV proporcionou um

desempenho ligeiramente superior em relação à polarização VH.

Tais análises demonstram que, em época de vazante, o radar é relativamente limitado para prover dados de níveis de água em áreas sem estações fluviométricas. No entanto, para o período de cheia, a correlação é relativamente mais alta. Convém ressaltar que é nesses períodos de cheia que há um maior número de alertas para a defesa civil remover ribeirinhos e comunidades próximas a essas áreas de risco de inundação. Por isso, a estação de Ajuricaba serviu como bom exemplo para demonstrar que em áreas sem estações fluviométricas ou com estações com dados desatualizados, as imagens do Sentinel-1A podem ser utilizadas para previsão de inundação.

Essa correlação poderia ter sido mais alta caso a estação fluviométrica estivesse localizada mais próxima da área de estudo, mas isso não preservaria as características endêmicas dessa área. O fato da vegetação de campinarana ser de menor porte em relação à floresta ombrófila densa, facilitou a delimitação de áreas inundadas nas cenas do Sentinel-1A. Cazals et al. (2016) mencionaram, em seu estudo com dados do Sentinel-1A, que águas abertas foram delimitadas com maior sucesso em relação às áreas alagadas em meio a grandes dosséis vegetacionais.

Regra geral, a dinâmica da planície de inundação pode ser estimada combinando áreas de inundação com mudanças de nível da água. No entanto, a extensão das inundações varia muito no espaço e no tempo, portanto, fatores como incerteza e avaliação de acurácia devem ser observados (FRAPPART et al., 2006). A análise nesse período amostral de um ano conseguiu fornecer um volume significativo de dados, auxiliando na identificação de pixel de água em pelo menos alguma data. Devido às altas variações espaciais e temporais das áreas alagadas, a validação de delimitação de áreas inundadas em regiões relativamente amplas derivadas de imagens SAR continua sendo um desafio (CAZALS et al., 2016), embora forneça grandes informações em escalas maiores, constituindo-se em um complemento importante para análises hídricas, ambientais e de biodiversidade.

2.5 Considerações finais

Os resultados obtidos por esse estudo permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

- 1) A polarização VH, em relação à polarização VV, mostrou resultados superiores na delimitação de áreas inundadas na sub-bacia do rio Negro. Porém, a polarização VV mostrou uma correlação ligeiramente superior com os dados da estação fluviométrica mais próxima da área de estudo. Portanto, dados de radar na polarização VH pode realmente identificar com maior precisão as áreas alagadas, mas também pode superestimar essas áreas.
- 2) Resultados melhores poderiam ser obtidos caso o Sentinel-1B fosse disponibilizado para o Brasil, otimizando a resolução temporal para 6 dias. O uso de técnicas automatizadas de delimitação de alvos (por exemplo, segmentação de imagens por crescimento de regiões) poderá fornecer uma delimitação mais precisa de áreas alagadas com imagens SAR.
- 3) Vários *softwares* associados (ENVI, Abilio), juntamente com a plataforma *Google Earth Engine*, otimizaram o resultado e o tempo desta análise.
- 4) Recomenda-se a continuidade desse estudo, investigando, por exemplo, uma série temporal maior, associando o potencial do uso integrado de imagens ópticas e de radar, ambos disponibilizados gratuitamente na internet, para melhorar a acurácia na identificação de áreas inundadas na Amazônia.

Referências

ALSDORF, D.; BATES, P.; MELACK, J.; WILSON, M.; DUNNE, T. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L08402, 5 p., 2007.

ANA. Agência Nacional das Águas. **Medindo as águas do Brasil – noções de plu e fluviometria**. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/122>. Acesso em: 18 fevereiro 2019.

BROWN, K. M.; HAMBIDGE, C. H.; BROWNETT, J. M. Progress in operational flood mapping using satellite synthetic aperture radar (SAR) and airborne light detection and ranging (LIDAR) data. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 2, p. 196-214, 2016.

CAZALS, C.; RAPINEL, S.; FRISON, P. L.; BONIS, A.; MERCIER, G.; MALLET, C.; CORGNE, S.; RUDANT, J. P. Mapping and characterization of hydrological dynamics in a coastal marsh using high temporal resolution Sentinel-1A images. **Remote Sensing**, v. 8, 570, 17 p., 2016.

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.

DALY, D. C.; PRANCE, G. T. Brazilian Amazon. In: CAMPBELL D. G.; HAMMOND H. D. (Eds.). **Floristic Inventory of Tropical Countries**. Nova York: New York Botanical Garden, p. 401-426, 1989.

DONG, Y.; MILNE, A. K.; FORSTER, B. C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 4, p. 851-863, 2001.

ELATAWNEH, A.; WALLNER, A.; MANAKOS, I.; SCHNEIDER, T.; KNOKE, T. Forest cover database updates using multi-seasonal Rapideye data-storm event assessment in the Bavarian Forest National Park. **Forests**, v. 5, p. 1284-1303, 2014.

ESA. European Space Agency. **Sentinel-1: User Handbook**, ESA Standard Document, 2013.

EWEL, K. C. Appreciating tropical coastal wetlands from a landscape perspective.

Frontiers in Ecology and the Environment, v. 8, n. 1, p. 20-26, 2010.

FERREIRA, L. V.; ALMEIDA, S. S.; AMARA, D. D.; PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da estação científica Ferreira Penna: Subsídios para o plano de manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. **Pesquisas, Botânica**, n. 56, p. 103-116, 2005.

FRAPPART, F.; DO MINH, K.; L'HERMITTE, J.; CAZENAVE, A.; RAMILLIEN, G.; LE TOAN, T.; MOGNARD-CAMPBELL, N. Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data. **Geophysical Journal International**, v. 167, n. 2, p. 570-584, 2006.

FRAZIER, P.; PAGE, K.; LOUIS, J.; BRIGGS, S.; ROBERTSON, A. I. Relating wetland inundation to river flow using Landsat TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 19, p. 3755-3770, 2003.

GALA, T. S.; MELESSE, A. M. Monitoring prairie wet area with an integrated LANDSAT ETM+, RADARSAT-1 SAR and ancillary data from LIDAR. **Catena**, v. 95, p. 12-23, 2013.

GEE. Google Earth Engine. **Sentinel-1 algorithms**. 2018. Disponível em: <<https://developers.google.com/earth-engine/sentinel1>>. Acesso em: 20 de junho de 2018.

GUIMARÃES, F.S; BUENO, G.T. As campinas e Campinaranas Amazônicas. **Caderno de Geografia**, v.26, 45, p 13-15, 2016.

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.

JUNG, H. C.; ALSDORF, D.; MORITZ, M.; LEE, H.; VASSOLO, S. Analysis of the relationship between flooding area and water height in the Logone floodplain. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 7-8, p. 232-240, 2011.

KEEL, S. H. K.; PRANCE, G. T. Studies of the vegetation of a white-sand black-water igapó (Rio Negro, Brazil). **Acta Amazonica**, v. 9, n. 4, p. 645-655, 1979.

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, 2006.

LIMA, D. (Org.). **Diversidade socioambiental nas várzeas dos rios Amazonas e Solimões: perspectivas para o desenvolvimento da sustentabilidade**. Manaus: IBAMA, ProVárzea, 416 p., 2005.

MADARI, B.; CUNHA, T. J. F.; SOARES, R. Organic matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazônia. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, p. 21-28, 2011.

MANJUSREE, R.; KUMAR, L. P.; BHATT, C. M.; RAO, G. S.; BHANUMURTHY, V. Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 3, n. 2, p. 113-122, 2012.

MATGEN, P.; HOSTACHE, R.; SCHUMANN, G.; PFISTER, L.; HOFFMANN, L. ; SAVENIJE, H. H. G. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 7-8, p. 241-252, 2011.

McFEETERS, S. K. The use of 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.

MOHAMMADI, A.; COSTELLOE, J. F.; RYU, D. Application of time series of remotely sensed normalized difference water, vegetation and moisture indices in characterizing flood dynamics of large-scale arid zone floodplains. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 70-82, 2017.

MONTERO, J,C; LATRUBESSE, E,M; The Igapó of the Negro River in central Amazônia: Linking late-successional inundation forest with fluvial geomorphology. **Journal of South American Earth Sciences**. v.180, p.1-13,2013

OLIVEIRA, A. A.; DALY, D. C.; VICENTINI, A.; COHN-HAFT, M. Florestas sobre areia: campinaranas e igapós. In: OLIVEIRA, A. A.; DALY, D. C. (Eds.), **Florestas do Rio Negro**, São Paulo: Companhia das Letras, Cap. 6, p. 180-219, 2001.

PEREIRA, G. H. A.; CECHIM JÚNIOR, C.; FRONZA, G.; DEPPE, F. Uso da plataforma Google Earth Engine para análise multitemporal de imagens SAR para detecção de variações de áreas inundadas no Pantanal. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 7., Jardim, MS. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, p. 274-282, 2018.

RUETSCH, M; SMALL, D; WASER, T, L.Rapid detection of windthrows using Sentinel -1 C-band SAR data. **Remote sensing**. v.115, n.11, p 2-5, 2019

SMITH, L. C.; ISACKS, B. L.; BLOOM, A. L.; MURRAY, A. B. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: Potential application to ungaged basins. **Water Resources Research**, v. 32, n.7, p. 2021-2034, 1996.

SOUSA, R. N. **Influência do pulso de inundação sobre a variação sazonal de queda de folhas em florestas de várzea na Amazônia Central e viabilidade de estimação por sensoriamento remoto** (dissertação de mestrado em Ecologia). Manaus: INPA, 2013, 61 p.

TARGHETTA, N. Floristic and structural comparison between igapó and campinarana forests along hydro-edaphic gradients in the Uatumã Sustainable Development Reserve. **Central Amazon**. P- 26-37, 2012 .

TORRES, R.; SNOEIJ, P.; GEUDTNER, D.; BIBBY, D.; DAVIDSON, M. et al. GMES Sentinel-1 mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 9-24, 2012.

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.

VAN DER SANDEN, J. J.; GELDSETZER, T.; SHORT, N.; BRISCO, B. **Advanced SAR applications for Canada's cryosphere (freshwater ice and permafrost) - Final Technical Report for the Government Related Initiatives Program (GRIP)**. Ottawa: Natural Resources Canada, 54 p., 2012.

VARGHESE, A. O.; JOSHI, A. K. Polarimetric classification of C-band SAR data for forest density characterization. **Current Science**, v. 108, n. 1, p. 100-106, 2015.

VACHON, P. W.; WOLFE, J. C-band cross-polarization wind speed retrieval. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 3, p. 456-459, 2011.

WESTMAN, W. E.; PARIS, J. F. Detecting forest structure and biomass with C-band multipolarization Radar: Physical model and field tests. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, n. 2, p. 249-269, 1987.

WHITE, L.; BRISCO, B.; DABBOOR, M.; SCHMITT, A.; PRATT, A. A collection of SAR methodologies for monitoring wetlands. **Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 7615-7645, 2005.

XU, H. Modification of normalised 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.

