



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, n° 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID35301>



Potencial da Multipolarização e da Multifrequência de Imagens de Radar na Identificação da Cobertura da Terra na Amazônia Oriental

Potential of Multipolarization and Multifrequency Radar Images in Identification of Land Cover in the Eastern Amazon

Fabício Sousa da Silva¹; Laurent Polidori²; Peter Mann de Toledo³; Aline Maria Meiguins⁴

¹ Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA), Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO/SEMA), São Luís/MA, Brasil. Email: professorfabriciosousa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6895-6496>

² Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UFPA), Belém/PA, Brasil. Email: laurent.polidori@ufpa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-9561>

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIIAV/INPE), São José dos Campos/MA, Brasil. Email: Peter.toledo@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4265-2624>

⁴ Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UFPA), Belém/PA, Brasil. Email: ameiguins@ufpa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0594-0187>

Resumo: O objetivo do presente trabalho é analisar o potencial de imagens de radar de abertura sintética para identificar as diferentes classes de cobertura de terras representativas para a Amazônia Oriental, em área de proteção. Foram analisadas imagens distribuídas gratuitamente referentes aos sensores ALOS PALSAR-2 (banda L, polarização HH e HV) e Sentinel 1A (banda C, polarizações VV e VH), referente ao mês de novembro de 2022, as quais foram avaliadas separadamente e integradas para identificação, através de classificação por aprendizagem de máquina, das seguintes classes: Cobertura Florestal, Cobertura Campestre, Campos úmidos e Cobertura Hídrica. Os resultados mostram que os alvos de interesse, em ambiente representativo da Amazônia, se apresentam melhor diferenciados através da integração multifrequencial e multipolarização entre as bandas C e L, permitindo alcançar acurácia de classificação excelente e todas as classes escolhidas apresentaram índice Kappa satisfatórios.

Palavras-chave: Retroespalhamento; Amazônia, Maranhão; SAR.

Abstract: The objective of the present work is to analyze the potential of synthetic aperture radar images to identify the different classes of land cover representative for the Eastern Amazon, in a protected area. Images distributed free of charge were analyzed referring to the ALOS PALSAR-2 (L-band, HH and HV polarization) and Sentinel 1A (C-band, VV and VH polarizations) sensors, referring to the month of November 2022, which were evaluated separately and integrated for identification, through machine learning classification, of the following classes: Forest Cover, Grassland Cover, Wet Fields and Water Cover. The results show that the targets of interest, in a representative environment of the Amazon, are better differentiated through the multifrequency integration and multipolarization between the C and L bands, allowing to achieve excellent classification accuracy and all the chosen classes presented satisfactory Kappa index.

Keywords: Backscatter; Amazon; Maranhão; SAR.

Recebido: 11/02/2024; Aceito: 05/04/2024; Publicado: 27/11/2024.

1. Introdução

A Amazônia Brasileira vive intensas mudanças em sua cobertura terrestre onde a ação antrópica tem contribuído significativamente nas alterações deste sistema ambiental. As conversões da cobertura da terra em diferentes usos têm sido motivadas historicamente por diferentes políticas de ordenamento, povoamento e interesses econômicos na região.

As áreas de proteção têm se destacado com eficácia na contenção das transformações supracitadas, sobretudo ante ao desmatamento (NUNES *et al.*, 2015). Na Amazônia, estão distribuídas áreas destinadas a diferentes níveis de proteção, destacando-se as Unidades de Conservação (UC's), que totalizam 335 áreas, além de 338 Terras Indígenas (COELHO, 2022). Ainda de acordo com (NUNES *et al.*, 2015), a depender do grau de restrição da área, a eficácia de contenção do desmatamento também pode variar.

Entre as diferentes categorias de UC's, cita-se o grupo de Áreas de Proteção Ambiental (APA), definidas como áreas de uso sustentável (permitido o usufruto racional dos recursos naturais existentes e habitação) e de proteção integral (de alta restrição), instituídas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC (Lei Federal 9985/2000).

Considerando a importância de serviços ambientais prestados por áreas protegidas, além da necessidade de garantia do cumprimento das leis que se destinam à preservação de tais áreas, iniciativas para o monitoramento de mudanças na cobertura da terra no Brasil surgiram a partir dos anos 80 e destacam-se desde então, os sistemas PRODES, DETER e *TerraClass*, apoiados em Sensoriamento Remoto.

O Sensoriamento Remoto constitui-se a principal ferramenta de apoio no monitoramento de áreas extensas, de forma sinótica e cuja dinâmica de alterações pode se dar repentinamente, sendo, portanto, de grande importância para o monitoramento da Amazônia. Contudo, é importante destacar as limitações de detecção na região Amazônica, decorrentes da cobertura de nuvens sobre esta área (ASNER, 2001; SALGADO *et al.*, 2018), quando avaliada através de sensores ópticos. Estas características motivaram o uso de sistemas sensores RADAR (*Radio Detection And Ranging*) como precursor no mapeamento da região amazônica.

A primeira grande iniciativa de reconhecimento cartográfico da Amazônia se deu no Brasil, através de sensor radar, de banda X, aeromarcado, no escopo do programa RADAM (radar na Amazônia), nos anos 70 (AZEVEDO, 1971; IBGE, 2018). Tais dados foram digitalizados, no início dos anos 2000, e disponibilizados publicamente. Outras iniciativas também são observadas em países Amazônicos, como na Guiana Francesa, com o programa "Guiana Nas Nuvens", usando o sensor orbital ERS-1 (RUDANT, 1994). Observam-se também outros programas para reconhecimento da Amazônia, em banda C, voltados ao reconhecimento da cobertura da terra e capacidade de imageamento SAR em áreas de florestas tropicais, com os respectivos programas Globe-SAR (WOODING *et al.*, 1994) e SAREX-92 (BROWN *et al.*, 1996).

A capacidade de imageamento através de sistemas sensores radar em ambientes tropicais úmidos ocorre com baixa ou nenhuma interferência atmosférica, tendo em vista os comprimentos de onda utilizados (de 2.5 à 120 cm). A detecção de alvos decorre da interação da energia emitida com a superfície, usualmente na forma de retro-espalhamento, que depende de parâmetros da superfície (tais como rugosidade e propriedades dielétricas) e da onda (tais como ângulo de incidência local, comprimento de onda, polarização) (JENSEM 2009; LEWIS E HENDERSON 1998).

No contexto amazônico são observadas iniciativas apoiadas em dados radar orbitais no mapeamento costeiro (TEIXEIRA; SOUZA FILHO, 2007; TEIXEIRA, 2011; GUIMARÃES, 2017) através da polarimetria de diferentes sensores, no mapeamento de inundações com sensores embarcados (FUCHSHUBER, 2011) e orbitais (FERREIRA, 2018), no mapeamento da cobertura vegetal e fitofisionomias (NUNES, 2011; SANTOS; GONÇALVES, 2009), no patrulhamento e defesa com sensor aeromarcado R-99 (ALVES *et al.*, 2009), na identificação de áreas desmatadas através de sensores SAR de banda L (SOUZA *et al.*, 2012; ABOUD NETA *et al.*, 2010), cartografia do relevo através de sensores operando em banda P (TANAJURA *et al.*, 2023), entre outras aplicações.

Na cartografia do uso e cobertura da terra são observadas diferentes iniciativas na Amazônia utilizando dados de radar (NEGRI, 2009; AZEVEDO *et al.*, 2014; WIEDERKEHR, 2018; DINIZ, 2019; DINIZ; GAMA; ADAMI, 2020). As classes de cobertura da terra podem apresentar limitações em sua detecção em decorrência de aspectos relacionados à ausência de dados multitemporais, polarimétricos e multifrequência nos diversos sistemas sensores disponíveis (FURTADO *et al.*, 2015). No entanto, o aumento da resolução temporal de sistemas sensores SAR, em diferentes frequências e polarizações, além das disponibilizações gratuitas de tais dados, tem possibilitado aplicações integrando diferentes sistemas sensores em áreas tropicais na Amazônia e na transição Cerrado/Amazônia (EVANS *et al.*, 2010).

Entre os dados SAR existentes na atualidade, merecem destaque os dados oriundos do Sentinel 1A (S1A) e ALOS PALSAR 2 (ALOS2). A missão Sentinel 1A (operando em banda C), da Agência Espacial Europeia (ESA), sucedeu às missões ERS e ENVISAT, com o diferencial de possuir grande capacidade de revista e disponibilização de forma gratuita. A missão ALOS PALSAR-2 (operando em banda L), da Agência Japonesa de Exploração Espacial (JAXA), sucedeu os

antecessores JERS-1 e ALOS PALSAR, lançados respectivamente em 1992 e 2006 e, embora inicialmente restrito, em 2022 a agência anunciou a abertura dos dados desde 2014 para acesso público em seu portal (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/alos_open_and_free_e.htm).

Tendo em vista a limitação atmosférica que o ambiente amazônico apresenta, para o imageamento através de sensores óticos e, considerando a disponibilidade pública e atual de diferentes missões de imageamento a partir de microondas, este estudo avaliou o potencial das imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*), multifrequência e multipolarização obtidas pelas missões Sentinel 1A (dual-pol: VH e VV) e ALOS PALSAR-2 (dual-pol: HH e HV) como alternativa na discriminação de classes de cobertura da terra em um recorte de área protegida na porção nordeste de Amazônia Brasileira.

2. Área de Estudo

Na Amazônia Oriental, localiza-se a Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense (figura 1) criada através do Decreto Lei 11.900/1991, e categorizada como de Uso Sustentável (Lei Federal 9985/2000), objetivando a harmonia entre a manutenção da biodiversidade local, o desenvolvimento sustentável e o usufruto racional dos recursos naturais existentes.

Esta área protegida possui como característica marcante uma vasta planície fluviomarinha com topografia planificada, nas quais extensas porções de terras são alagadas durante o período de chuvas e favorecem o surgimento de extensos lagos os quais se conectam aos cursos dos grandes rios também presentes na região. Tais características levaram a área a ser declarada Sítio RAMSAR, em 2000 (RAMSAR, 2020). Verifica-se ainda um ecossistema riquíssimo dos quais é possível citar fauna e flora diversificada, a presença de manguezais e babaçuais.

Esta área foi escolhida para este estudo em decorrência da dinâmica de transformação em sua cobertura, com forte destaque para perda da cobertura vegetal de porte arbóreo, secundário e florestal, conforme apontam os dados do Programa *TerraClass* para os anos de 2008, 2014 e 2020, sendo tais áreas substituídas historicamente por pastagens cultivadas cuja intensificação vem se dando nos últimos anos (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Neste contexto, escolheu-se os limites do Município de Turiilândia como área de estudo tendo em vista ser um recorte representativo da paisagem e das transformações citadas anteriormente (figura 1).

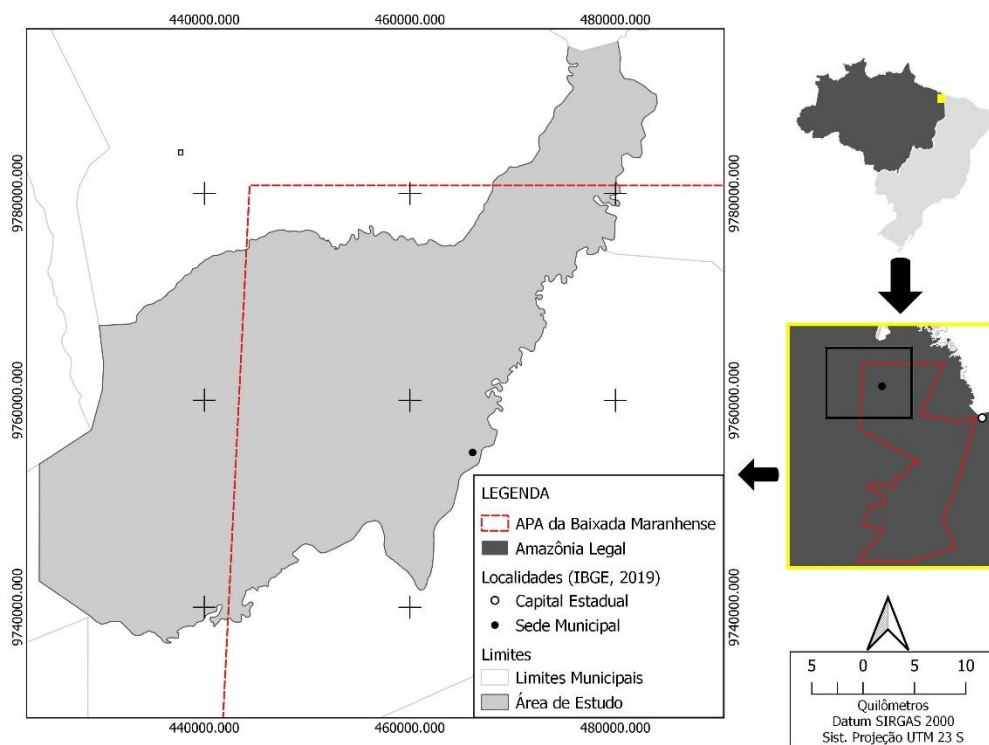


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Fonte: Silva *et al* (2024).

O município de Turilândia possui aproximadamente 1567 km², limitando-se com Turiacu, Santa Helena, Presidente Médici, Governador Nunes Freire, Bacurí e Serrano do Maranhão. Tal área integra de modo parcial a APA da Baixada, em sua porção noroeste.

3. Materiais e métodos

A classificação da cobertura da terra foi realizada a partir de imagens SAR e de dados de treinamento. Para aumentar a possibilidade de discriminar diferentes classes de cobertura, assumindo-se que as sensibilidades são complementares, utilizaram-se imagens de dois sensores de frequências diferentes, cada um oferecendo duas polarizações diferentes: Sentinel 1A (S1A) e ALOS PALSAR 2 (ALOS2). Os procedimentos referentes ao processamento das cenas SAR são apresentados de forma sintética na figura 2 e, descritos a seguir.

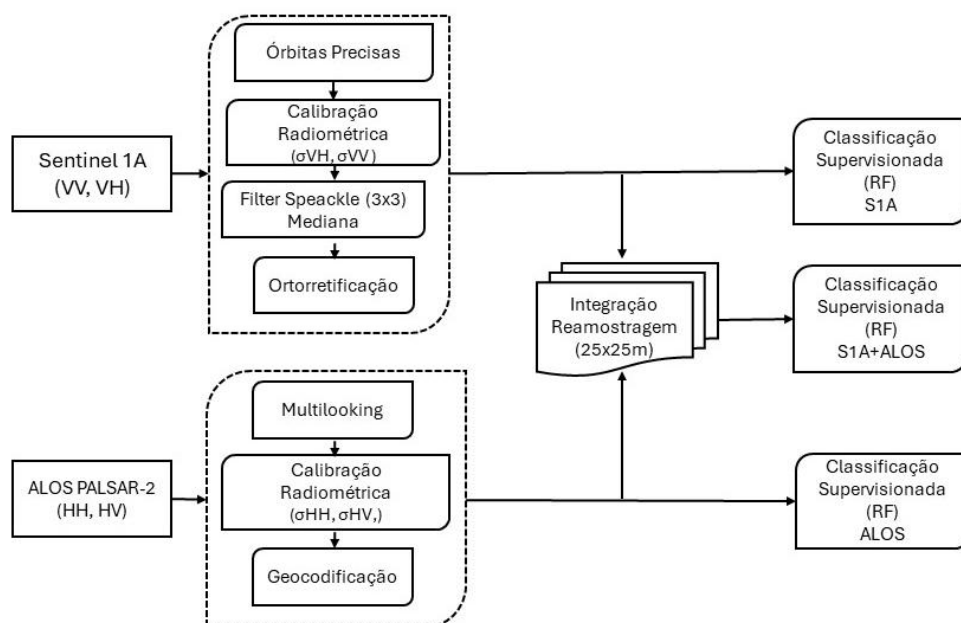


Figura 2 – Fluxograma de processos aplicados às cenas SAR.

Fonte: Silva et al (2024).

Adquiriu-se uma cena SAR S1A, datada de 06/11/2022 (distribuída gratuitamente em <https://search.asf.alaska.edu/>) adquirida em modo *Interferometric Wide - IW* (em dupla polarização: VV e VH) em nível *Ground Round Detection (GRD)* portador de dados de amplitude.

Foi adquirida também uma cena ALOS2, datada de 02/11/2022 (distribuída gratuitamente a partir do G-Portal Jaxa em <https://gportal.jaxa.jp/>) em modo *ScanSar* (com dupla polarização: HH e HV) com nível *Single Look Complex (SLC)*. Este nível contém informações de amplitude e fase.

Para a cena S1A, foram aplicados procedimentos de correção da cena, conforme Filipponi (2019), em ambiente SNAP 9.0 (*Sentinel Application Platform - Plataforma para aplicações Sentinel*), a saber:

I) Aplicação de órbitas precisas, para atualizar as informações sobre o estado da plataforma (velocidade e posição) durante a aquisição das informações;

II) Calibração radiométrica objetivando a obtenção dos coeficientes de retroespalhamento σ_{VV} e σ_{VH} (que caracterizam quanto da energia emitida em direção ao alvo retornou ao sensor) através do módulo Radar-Radiometric-Calibration;

III) Redução do efeito Speckle (com o menu *Single Speckle Filter* em mediana 3x3) para remover a granulação deste efeito, e;

IV) Ortoretificação (com o apoio do módulo Terrain Correction utilizando dados Shuttle Radar Topography Mission - SRTM de 30 m já incorporado ao aplicativo) e reamostragem para 25 m visando compatibilização com a cena PALSAR-2.

Para a cena ALOS2, foram aplicados procedimentos de transformação da cena SLC em amplitude. Os processos foram executados através do ENVI IDL 5.6 e do módulo SARSCAPE, ambos cedidos temporariamente pela SulSoft Brasil, representante Harris no Brasil, sob as licenças *ENVI+IDL 5.7 Evaluation - 7926-1881-2473-6822* e *SARscape 5.6 Evaluation - 8289-8281-7265-3938*. Os processos foram:

I) Aplicação do multilooking utilizando-se o padrão default do SARscape (Range looks: 1, Azimuth Looks: 5 e tamanho de pixel de 25 m);

II) Calibração Radiométrica e a Geocodificação visando a obtenção dos valores de retroespalhamento (σ_{HV} e σ_{HH}), além de corrigir geométrica e topograficamente a cena. A calibração radiométrica adotou as recomendações JAXA (2014) (equação 01), onde os fatores de calibração são: $CF1 = -83.0$; $A = 32$, os quais foram devidamente sinalizados no algoritmo Geocoding and Calibration. A geocodificação incluiu a ortoretificação da cena, com o modelo Shuttle Radar Topography Mission - SRTM de 30 m também incorporado ao módulo SARSCAPE.

$$\sigma = 10 * 10\log_{10}(I^2 + Q^2) + CF - A \quad \text{eq. 01}$$

Foram utilizados dados complementares dentre os quais citam-se: a) Chave de interpretação composta por informações de campo, realizada em julho de 2023 (figura 3); b) Imagens ópticas das missões LANDSAT-8 (de 29/09/2022) e CBERS 4A (de 29/10/2022) para apoio na etapa de amostragem e; c) Cobertura da Terra referente ao *TerraClass* para o ano de 2020.

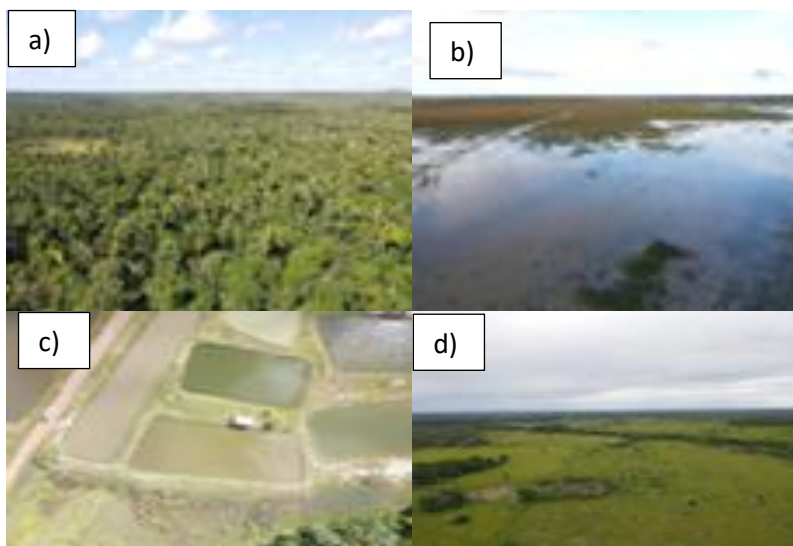


Figura 3 – Chave de interpretação para a área de estudo. a) Cobertura Florestal (CF); b) Campos Úmidos (CU); c) Cobertura Hídrica (CH); d) Cobertura Campestre (CC).

Fonte: Silva *et al* (2024).

As classes alvo adotadas neste trabalho foram as seguintes: (1) Cobertura Florestal - CF (composta por coberturas Florestal, Sucessão e Arbórea), (2) Cobertura Campestre - CC (formada por áreas abertas e extensas, com presença de gramíneas, pastagens manejadas e cultivos agrícolas), (3) Campos Úmidos - CU (áreas úmidas, rebaixadas topograficamente e sujeitas a inundação sazonal) e (4) Corpos Hídricos - CH (incluindo rios, lagos, tanques para piscicultura e açudes para dessedentação e abastecimento). Tais classes foram escolhidas por se apresentarem em grandes extensões e repetidamente, sendo o resultado das conversões de cobertura da terra e serem mais representativas para a área de estudo. Além disso, destaca-se que os Campos Úmidos desta UC são considerados protegidos pela legislação local (MARANHÃO, 1989).

Considerando, inicialmente, o fato de a área localizar-se em um contexto de forte interferência atmosférica, por estar situada em zona tropical equatorial, observou-se os dados pluviométricos da estação Meteorológica de Turiaçu (mais próxima à área de estudo), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Tais dados mostram ausência de precipitação nos dias que antecederam a aquisição da cena S1A e uma pequena precipitação no dia anterior a aquisição da cena ALOS2 (Figura 4).

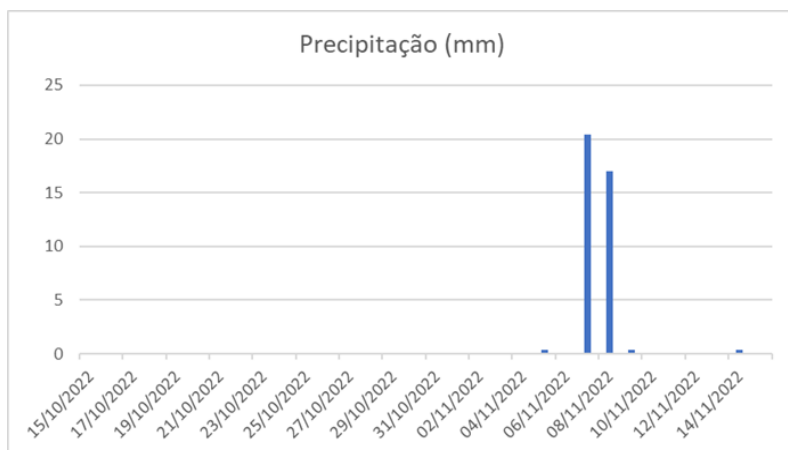


Figura 4 – Dados de precipitação pluviométrica para os meses de outubro e novembro referentes à área de estudo.
Fonte: Silva et al (2024).

Os registros de precipitação demonstram dias sem forte incidência de chuvas (figura 2) e, embora exista uma diferença de datas entre os produtos ALOS2 e S1A, assume-se para tanto não haver eventos significativos que diferenciam abruptamente a cobertura da terra entre as datas das cenas. Assim, esta pesquisa assume que os imageamentos são simultâneos.

Por fim, as cenas foram empilhadas e alinhadas em ambiente SNAP. Foram submetidas a diferentes combinações para a classificação supervisionada utilizando o algoritmo Random Forest (RF), no *Software* QGIS 3.28 LTR, através do *Semi-Automatic Classification Plugin* (CONGEDO, 2022) considerando parâmetros default (amostras de treinamento = 5000, árvores = 10), sendo avaliados posteriormente as estatísticas Kappa (LANDIS E KOCH, 1977) e Acurácia Global destes processos. Também foram avaliados, de forma exploratória, o comportamento estatístico de cada uma das classes nas diferentes frequências e polarizações.

4. Resultados e discussão

A análise dos valores de retroespalhamento dos alvos de interesse demonstra o comportamento dos alvos para as diferentes polarizações e frequências (figura 5). O S1A, apresenta valores de retroespalhamento que variam, nas diferentes polarizações, entre ~ -24 dB e ~ -6 dB, diferenciando-se bem a cobertura hídrica. Já o sensor ALOS2 apresenta valores de retroespalhamento que variam entre ~ -34 dB e ~ -16 dB, para ambas as polarizações, destacando-se dos demais alvos a CF, em HV e em HH, e CH, em HH.

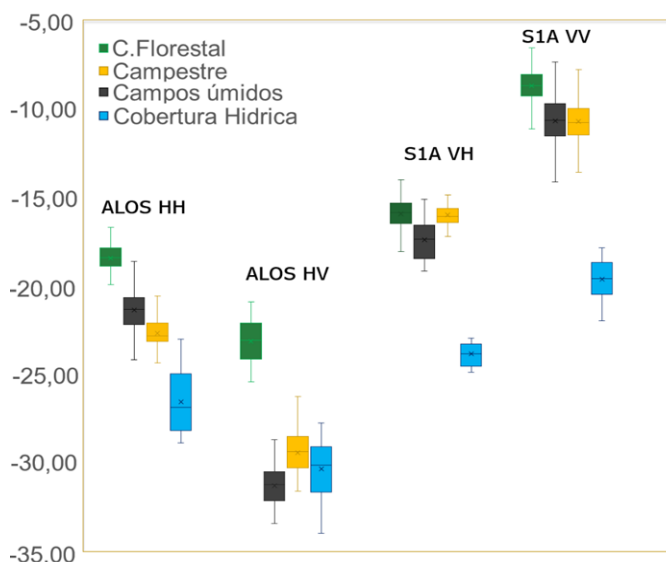


Figura 5 – Comportamento do retroespalhamento (dB) dos alvos nos diferentes sensores abordados. Fonte: Silva *et al.*, (2024).

As polarizações paralelas, isto é, HH (ALOS2) e VV (em S1A), apresentam maiores valores de retroespalhamento para todas as classes, com exceção de cobertura hídrica, e com destaque para a classe CF. Este comportamento decorre da interação no topo (para S1A) e no interior (ALOS2) do dossel, interagindo com folhas, troncos e galhos que compõem o alvo. São observados comportamentos semelhantes em experimentos observados na Amazônia, para o S1A (KYOHARA E SANO, 2022) e na transição Amazônia/Cerrado para o ALOS 2 (SILVA *et al.*, 2021).

Ainda sobre o comportamento de retroespalhamento de alvos, é importante destacar o comportamento da cobertura florestal na banda HV, para o ALOS 2. Shimada *et al.*, (2014) identificou que, em um recorte experimental da Amazônia, a polarização HV, no ALOS 2, foi capaz de melhor discriminar coberturas florestais de alvos não-florestais.

Ao observar figura 3, depreende-se que se uma dada classe apresenta proximidade no comportamento dos alvos para um dado sensor, a alternativa de usar outra frequência e/ou outra polarização aumenta as possibilidades de discriminação dos alvos.

Ao se avaliar o potencial isolado de cada um dos sistemas sensores para os alvos escolhidos, mediante classificação RF, através do índice Kappa, verificou-se que se apresentam como capazes de separar os alvos com coeficientes bom (S1A) e muito bom (ALOS2), conforme Landis e Koch (1977) (tabelas 1 e 2).

Tabela 1 – Matriz de confusão com estatísticas de acerto obtidas a partir dos dados do S1A.

Matriz de confusão integração S1A e ALOS2					
Classe (Pixels)	CF	CC	CH	CU	Total
CF	16129	1824	11	56	18020
CC	9735	14586	17	742	25080
CH	39	29	9790	39	9897
CU	525	2428	183	2754	5890
Total	26428	18867	10001	3591	58887
Acurácia do Produtor [%]	88,9309	55,8514	89,4878	70,9791	-
Acurácia do Usuário [%]	89,5061	58,1579	98,9189	46,7572	-
Kappa da Classe	0,5919	0,4704	0,989	0,4518	-
Acurácia Global [%]	86,9087				
Kappa	0,5459				

Fonte: Silva *et al* (2024).

Tabela 2 – Matriz de confusão com estatísticas de acerto obtidas a partir dos dados do ALOS2.

Matriz de confusão ALOS2					
Classe (Pixels)	CF	CC	CH	CU	Total
CF	16129	1824	11	56	18020
CC	9735	14586	17	742	25080
CH	39	29	9790	39	9897
CU	525	2428	183	2754	5890
Total	26428	18867	10001	3591	58887
Acurácia do Produtor [%]	88,9309	55,8514	89,4878	70,9791	-
Acurácia do Usuário [%]	89,5061	58,1579	98,9189	46,7572	-
Kappa da Classe	0,5919	0,4704	0,989	0,4518	-
Acurácia Global [%]	86,9087				
Kappa	0,5459				

Fonte: Silva *et al* (2024).

Para o produto ALOS 2, as classes CH e CF apresentaram valores de Kappa altos (0,9417 e 0,9358 respectivamente) e ao mesmo tempo foram os melhores, quando comparados às demais classes. O S1A também apresentou a cobertura hídrica como a classe de maior capacidade de separação dos demais alvos.

A integração dos dados S1A e ALOS2 permite uma classificação ao mesmo tempo multifrequência e multipolarização, que por sua vez, apresenta um melhoramento de categoria no índice Kappa, de modo que o valor observado neste indicador, sugere uma classificação excelente (tabela 3). O Kappa das classes apresenta-se muito bom (CU) e excelente (CH, CC, CF).

A abordagem multifrequência (banda C e banda L) apresenta um melhoramento significativo na identificação da cobertura da terra, e soma-se aos resultados encontrados no Cerrado (EVANS; COSTA, 2010) e em áreas de transição Cerrado/Amazônia (EVANS; COSTA, 2013) quando integrados sensores ALOS (banda L) e ENVISAT (banda C).

Tabela 3 – Matriz de confusão com estatísticas de acerto obtidas a partir da integração S1A e ALOS2.

Matriz de confusão integração S1A e ALOS2					
Classe (Pixels)	CF	CC	CH	CU	Total
CF	22344	475	8	69	22896
CC	3314	17102	31	550	20997
CH	40	12	9872	34	9958
CU	730	1278	90	2938	5036
Total	95,7883	83,9662	93,1913	77,979	58887
Acurácia do Produtor [%]	97,5891	81,4497	99,1364	58,34	-
Acurácia do Usuário [%]	0,888	0,7777	0,9912	0,57	-
Kappa da Classe	95,7883	83,9662	93,1913	77,979	-
Acurácia Global [%]	93,2278				
Kappa	0,8148				

Fonte: Silva *et al* (2024).

Apesar dos valores de Kappa apresentarem-se como bom e muito bom, respectivamente, para S1A e ALOS 2, é possível verificar o impacto dessa classificação em seu aspecto qualitativo (figura 6). Verifica-se que o aspecto da homogeneidade dos alvos interfere nos resultados.

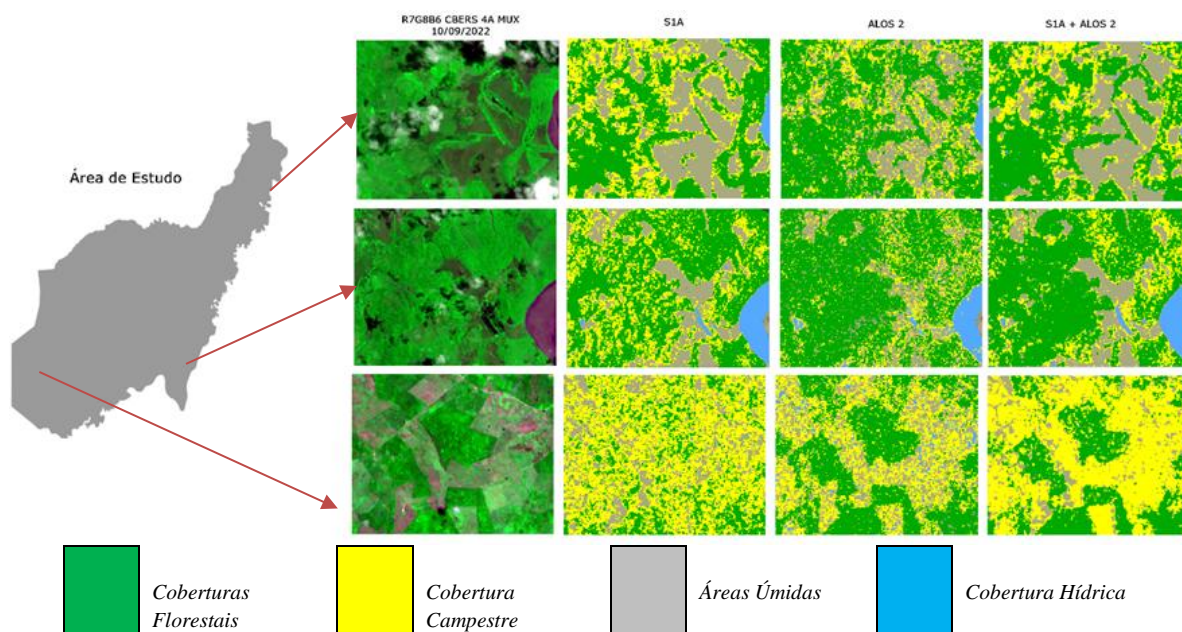


Figura 6 – Amostra comparativa entre os resultados obtidos nas diferentes classificações.
 Fonte: Silva *et al* (2024).

Áreas bem homogêneas, dominadas por Cobertura Florestal e Cobertura Hídrica, apresentaram um aspecto qualitativo melhor, quando observada a classificação resultante da cena S1A. Para o produto S1A, a identificação da classe CF é limitada em áreas fragmentadas e com presença forte de coberturas arbóreas. Já no produto ALOS2, a homogeneidade da classe CF não apresentou a mesma limitação existente em S1A, mas verificou-se a dificuldade do sistema sensor na identificação da classe CU. Tais ocorrências relacionam-se com os resultados quantitativos da extensão das classes obtidas pelas diferentes classificações (figura 7).

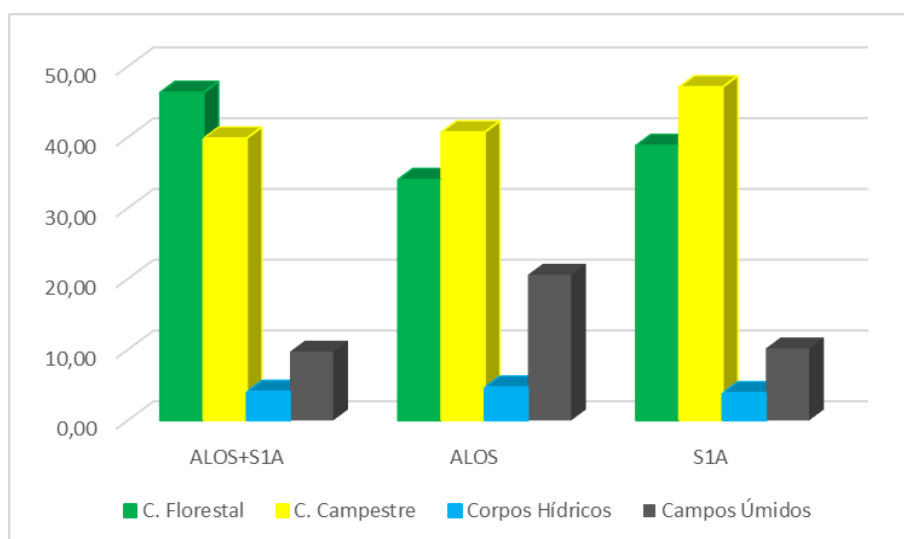


Figura 7 – Extensão da cobertura da terra obtida pelas diferentes fontes.
 Fonte: Silva *et al* (2024).

Entre as diferentes combinações de produtos, a integração dos dados ALOS 2 e S1A apresentou a maior extensão de área considerada Cobertura Florestal, bem como a menor área referente a Campos úmidos. Contudo, a Cobertura Hídrica mantém-se como a única classe sem diferença relevante no quantitativo de classes.

5. Considerações finais

A classificação de cobertura da terra apresentada nesta pesquisa gerada a partir do ALOS2 apresentou-se de uma forma geral levemente superior, quando comparado ao S1A, destacando-se a detecção da classe CF em áreas heterogêneas, embora limitado para a classe CU. Contudo, é oportuno destacar que o potencial do S1A associado ao aspecto multitemporal não foi explorado nesta pesquisa, sendo uma característica importante deste sensor que, atualmente, apresenta resolução temporal de 12 dias, em contraste com o ALOS 2, com 46 dias.

A integração entre dados S1A e ALOS2, com desprezível diferença temporal de aquisição (4 dias), mostrou-se capaz de separar bem classes de cobertura de terra na porção extremo nordeste da Amazônia, apresentando-se como excelente (>0,8). Contudo, apesar de satisfatória neste contexto de integração, destaca-se que a classe CU apresentou maior limitação quando comparado às demais classes, mas configura-se ainda como muito boa.

Outros estudos podem ser conduzidos para avaliar se a dinâmica de inundações e/ou conteúdo de umidade podem estar relacionados com o valor do Kappa obtido para a classe Campos úmidos. Pode ser também avaliadas classificações multitemporais para esta classe, por se tratar de uma cobertura dinâmica.

O produto integrado, utilizando-se dados referentes apenas à amplitude dos sensores S1A e ALOS 2, foi ainda capaz de gerar resultados satisfatórios para a classe Cobertura Florestal, classe de extrema importância, considerando que a área integra Unidade de Conservação em zona tropical úmida.

É oportuno destacar que futuramente, uma separação da Classe Cobertura Florestal em outras duas (Arbórea e Florestal) pode ser avaliada de modo a buscar melhores níveis de acerto e sua proximidade aos grandes projetos de monitoramento, tais como Mapbiomas e *TerraClass*.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA) e ao Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO/SEMA), pelo apoio logístico na execução dos trabalhos de campo na Baixada Maranhense. Agradecimento a Lorena Silva e Silva (graduanda em Engenharia Ambiental/UNICEUMA), pelo auxílio durante a missão de campo para coleta de amostras. Registra também agradecimento a SulSoft Brasil pela disponibilização da licença temporária ENVI e Sarscape, usadas em etapas de processamentos das imagens deste trabalho.

Referências

- ABOUD NETA, S. R.; FREITAS, C. C.; DUTRA, L. V. Uso de imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 62, p. 417-431, 2010.
- ALMEIDA, J. L.; BEZERRA, J. F. R.; SANTOS, J. R. C.; MORAES, M. M.; LISBOA, G. S. Avaliação das Mudanças no Uso da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio Turiaçu na região amazônica maranhense. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 4, p. 1965-1977, 2022.
- 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.
- AZEVEDO, L.. Radar in the Amazon. Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, *Center for Remote Sensing Information and Analysis*, Ann Arbor, p.2303-2306, 1971.
- BROWN, R.J.; BRISCO, B.; D'IORIO, M.A.; PREVOST, C.; RYERSON, R.A.; SINGHROY, V. RADARSAT Applications: Review of GlobeSAR Program. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22: 404-419, 1996
- CALDEIRA, C. R. T., POLIDORI, L., EL HAGE, M., COBACHO, O. C. M., BASTOS G. E., PIERRE, H., BALBAUD O. J. Comparação entre os Modelos Digitais de Terreno gerados por Radar em Banda P e LiDAR na Amazônia, um estudo de caso no Amapá (Brasil): Comparison between Digital Terrain Models generated by P-Band Radar and

-
- LiDAR in the Amazon, a case study in Amapá (Brazil). *Revista de Geociências do Nordeste*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 59–70, 2023
- CALDEIRA, C. R.; POLIDORI, L.; EL HAGE, M.; CALDEIRA, M. C. O; PIERRE, H. B. O. Comparação entre os Modelos Digitais de Terreno gerados por Radar em Banda P e LiDAR na Amazônia, um estudo de caso no Amapá (Brasil): Comparison between Digital Terrain Models generated by P-Band Radar and LiDAR in the Amazon, a case study in Amapá (Brazil). *Revista de Geociências do Nordeste*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 59–70, 2023
- COELHO, A, S. *POLÍTICAS PÚBLICAS E A CONFIGURAÇÃO DO BIOMA AMAZÔNIA NO ANTROPOCENO: UMA ANÁLISE DO DESMATAMENTO EM MÚLTIPLAS ESCALAS DE ESPAÇO E TEMPO*. Belém, 2022. 140f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Belém-PA 2022.
- CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, 2021.
- DINIZ, J. M. F. de S. Avaliação do potencial dos dados polarimétricos Sentinel-1A para mapeamento do uso e cobertura da terra na região de Ariquemes-RO. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.
- DINIZ, J. M. F. S., GAMA, F. F., ADAMI, M. Evaluation of polarimetry and interferometry of sentinel-1A SAR data for land use and land cover of the Brazilian Amazon Region. *Geocarto International*, v. 37, n.15, p.1482-1500, 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. *Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services, 2012*. Disponível em https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/S1_SP-1322_1.pdf Acesso em 18 de março de 2021.
- 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.
- FERREIRA, G. H. S. Identificação de áreas inundáveis na porção sul de Roraima com auxílio de imagens de Radar. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2018.
- FILIPPONI, F. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, v.18, n.11, 4p, 2019.
- FLORENZANO, T. G. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. Ed Oficina de Textos, São Paulo, 2008.
- FUCHSHUBER, E. M. AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS MULTIPOLARIMÉTRICOS NA BANDA-L DO SENSOR R99B-SAR PARA O MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDADAS NO LAGO DE COARI, AMAZÔNIA CENTRAL. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- FURTADO, L. F. A., SILVA, T. S. F., FERNANDES, P. J. F., NOVO, E. M. L. M. and cover classification of Lago Grande de Curuai floodplain (Amazon, Brazil) using multi-sensor and image fusion techniques. *ACTA AMAZÔNICA*, v.45, n.2, p.195-202, 2015.
- GUIMARÃES, U. S. Análise dos modelos digitais de superfície gerados por interferometria e radargrametria no estudo de ambientes costeiros amazônicos. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). CONHECER, MAPEAR, DESBRAVAR: MEMÓRIAS DO PROJETO RADAM BRASIL. Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais. - Rio de Janeiro : IBGE, 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101614>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). ALOS-2/PALSAR-2 Level 1.1/1.5/2.1/3.1 CEOS SAR Product Format Description (Handbook). 2014. 233 p. Disponível em: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/doc/fdata/PALSAR-2_xx_Format_CEOS_E_r.pdf. Acesso em 13 de outubro de 2023.
- JENSEN, J. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres (2ed)*. São José dos Campos: Ed. Parênteses, 2009.
- LANDIS, J. R.; KOCH, C. H. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 3, p. 159-174, 1977.
- LEE, J. S.; POTTIER, E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. *CRC Press*, 2009.
- LEI FEDERAL 9985/2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 06 Jan. 2022.
- LEWIS, A. J., HENDERSON, P. M., HOLCOMB, D.W. RADAR FUNDAMENTALS: THE GEOSCIENCE PERSPECTIVE. IN: HENDERSON, P.M.; LEWIS, A. J. (orgs.). *Manual of Remote Sensing: Principles & Applications of Imaging Radar*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, New York, p131-181, 1998.
- MARANHÃO. Constituição do Estado do Maranhão. 1989. Disponível em <http://www.al.ma.leg.br/arquivos/constituicao.pdf>. Acesso em 13 de outubro de 2023.
- MARANHÃO. Decreto Estadual 11900/1991 – CRIAÇÃO DA APA DA BAIXADA. Disponível em: https://documentacao.socioambiental.org/ato_normativo/UC/303_20100823_145738.pdf. Acesso em: 06 Jan. 2022.
- NEGRI, R.G. Avaliação de dados polarimétricos do sensor ALOS PALSAR para classificação da cobertura da terra da Amazônia. 2009. 170 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- NUNES, G. M.; Souza Filho, C. R.; Ferreira, L. G. Discriminação de fitofisionomias de floresta de várzea a partir do algoritmo Iterated Conditional Modes aplicado aos dados SAR/R99 (QUAD-POL/Banda L). *Revista ACTA AMAZÔNICA*, v. 41, n. 4, p. 471-480, 2011.
- NUNES, T. S S., FERREIRA, L. V., VENTICINQUE, E. M. A importância das Unidades de Conservação e Terras Indígenas na contenção do desmatamento na Amazônia Legal Brasileira. IN: VIEIRA, I. C. G., JARDIM, M. A. G., ROCHA, E. J. P. (orgs.). *Amazônia em Tempo: Estudos climáticos e socioambientais*. Belém, Universidade Federal do Pará: Museu Paraense Emílio Goeldi: Embrapa Amazônia Oriental, 2015.
- PARADELLA, W. R. O USO DE RADAR ORBITAL EM APLICAÇÕES AMBIENTAIS NA AMAZONIA BRASILEIRA: A AVALIAÇÃO DO RADARSAT NO PROGRAMA ADRO. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 331-340, 1996. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2005/01.07.13.54/doc/T212.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2021.
- RAMSAR (2020). Ramsar Information Sheet. Disponível em https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/BR1020RIS_2002_en.pdf. Acesso em 13 de outubro de 2023.
- RANGEL, M. E. S. CONTRIBUIÇÃO DOS DADOS INTEGRADOS DOS SISTEMAS SENSORES TM/LANDSAT-5 E ERS-1/SAR PARA O ESTUDO DE USO E COBERTURA DA TERRA NO NORDESTE DA ILHA DO MARANHÃO. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2000.
- RUDANT, J.P. 1994. French Guyana through the clouds: first complete satellite coverage. *ESA Earth Observation Quarterly*, 44: 1-6.

-
- SALGADO, C. B., CARVALHO JÚNIOR, O. A. C., GOMES, R. A. T., GUIMARÃES, R. F. Cloud interference analysis in the classification of MODIS-NDVI temporal series in the Amazon region, municipality of Capixaba, Acre - Brazil. *Sociedade & Natureza*, v. 31, p. e47062, 2019.
- SANO, E. E., MENESES, P. R., ALMEIDA, T. REFLECTÂNCIA DOS ALVOS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS. IN: MENESES, P. R., ALMEIDA, T., BAPTISTA, G. M. M. (orgs.). *Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação*. São Paulo, Oficina de Textos, 2019.
- SANTOS, J. R; GONÇALVES, F. G. Polarimetric responses patterns and scattering mechanisms of forest targets from L-band radar. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 61, n. 4, p. 391-397, 2009.
- SHIMADA, M. et al. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007-2010). *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v. 155, p. 13-31, 2014.
- SILVA, F. S.; PESTANA, A. L. M. Mapeamento da cobertura hídrica da microrregião da Baixada Maranhense com dados do sensor SAR Sentinel 1A. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.1, n. 2, p.058-071, 2020.
- TEIXEIRA, S. G Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2011.
- TEIXEIRA, S. G.; SOUZA FILHO, P. W.; M. Análise de coeficientes de retroespalhamento de imagens multitemporais RADARSAT-1 na discriminação de ambientes costeiros tropicais das regiões da Baixada Maranhense. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 5019-5026, 2007. Disponível em: <http://mart.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.31.40/doc/5019-5026.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2021.
- WIEDERKEHR, N. C. MUDANÇA DE USO E COBERTURA DA TERRA A PARTIR DOS DADOS POLARIMÉTRICOS ALOS/PALSAR-2 EM UMA PORÇÃO DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS E ÁREAS ADJACENTES. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, 2018.
- WOODHOUSE, I. H. *Introduction to Microwave Remote Sensing*. New York: CRC Press/Taylor & Francis, 2006.
- WOODING, M.G.; ZMUDA, A.D.; ATTEMA, E. 1994. An overview of SAREX-92 data acquisition and analysis of the tropical forest environment, In: Longdon, N. (orgs.). *Proceedings of the Second Euro-Latin American Space Days*, European Space Agency, Paris, ESA SP-363: 57-68.