



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

TOMAZ ALEXANDRE DA SILVA NETO

**MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS NA REGIÃO DO BAIXO JAGUARIBE
(CEARÁ) UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-1 E SENTINEL-2**

FORTALEZA

2023

TOMAZ ALEXANDRE DA SILVA NETO

MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS NA REGIÃO DO BAIXO JAGUARIBE
(CEARÁ) UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-1 E SENTINEL-2

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia. Linha de pesquisa: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cynthia Romariz Duarte.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S584m Silva Neto, Tomaz Alexandre da.
 Mapeamento de áreas inundáveis na região do Baixo Jaguaribe (Ceará) utilizando imagens
Sentinel- 1 e Sentinel-2 / Tomaz Alexandre da Silva Neto. – 2023.
 68 f. : il. color.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de
Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2023.
 Orientação: Prof. Dr. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.
 Coorientação: Prof. Dr. Cynthia Romariz Duarte.

1. banda c. 2. águas superficiais. 3. processamento em nuvem. I. Título.

TOMAZ ALEXANDRE DA SILVA NETO

MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS NA REGIÃO DO BAIXO JAGUARIBE
(CEARÁ) UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-1 E SENTINEL-2

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia. Linha de pesquisa: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 27/04/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Viana Freires
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

A todos que de alguma forma contribuíram
para a realização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Maria e Joaquim, por terem me incentivado e apoiado a sempre seguir meus sonhos; aos meus queridos amigos (Camila Praxedes, Edson Felipe, José Rocha, Laura Cidrão, Nathalia Olímpio, Raquel Martins, Talita Santos, Thiago Vinicius e Viviane Monteiro) e irmão (Adriano Sousa) por sempre estarem ao meu lado; a professora Rita, por ter aceitado participar deste trabalho, pela devida orientação e conhecimento compartilhado; a Professora Cynthia por todo apoio e confiança depositados em mim e que foram fundamentais para a minha formação; ao Professor Beltrão Sabadia (*in memoriam*) por todo carinho e conselhos valiosos. A minha amiga Luzia Suerlange por toda confiança, parceria e aventuras no campo, a Joyce Shantala pelas orientações e conselhos. Esse trabalho tem participação efetiva e emocional de vocês duas. Aos meus amigos do GEOCE (Cláudio, Eduardo, Maykon e Maynara), o apoio e ajuda de vocês foram essenciais na realização deste trabalho.

“O Rio Jaguaribe é uma artéria aberta por onde
escorre e se perde o sangue do Ceará.”
(Demócrito Rocha, 1960).

RESUMO

As áreas inundáveis são de extrema importância para a manutenção da vida terrestre por terem relação direta com a dinâmica hidrológica. Por serem áreas planas, com baixa declividade e próximas aos cursos d'água, tornam-se regiões preferenciais para projetos de irrigação, cultivo agrícola, pastagem e construção de acessos viários. Essas atividades geram impactos negativos tais como desmatamento, assoreamento dos rios, ocupação desordenada, inundações, contaminação das águas etc. Os dados RADAR de abertura sintética (SAR) vem apresentando ótimos resultados no mapeamento e no monitoramento dessas áreas pela alta frequência de revisitação, resolução espacial e por não sofrerem influência da atmosfera. O objetivo desse estudo foi mapear as áreas de inundação de uma região do Baixo Jaguaribe localizada próxima ao município de Russas, no Estado do Ceará, para duas estações climáticas distintas para o ano de 2021, por meio das imagens SAR. Utilizou-se a técnica de Limiar de Retroespalhamento em SAR nas imagens do satélite Sentinel-1. Essas imagens foram pré-processadas e foi construído um cubo multitemporal através da plataforma Google Earth Engine para observação do comportamento dos alvos ao longo do tempo. Como resultado, delimitaram-se as áreas inundáveis através da comparação entre os períodos de cheia e seca. O pico de cheia aconteceu no mês julho, correspondendo a uma área de 121,18 há e o período seco ocorreu no mês novembro, cobrindo uma área de 32,38 ha. Foram identificados os principais tipos de Cobertura e Uso da Terra das áreas inundáveis e das Áreas de Proteção Permanente (APP). Constatou-se que nas áreas inundáveis, mais de 50% da área corresponde a classe solo exposto. Cerca de 3% da área corresponde a ocupação antrópica. Quanto ao uso e ocupação das áreas de restrição identificou-se que cerca de 20% dessas regiões são compostas pelas classes Área antrópica não agrícola e Área antrópica agrícola, gerando um conflito em relação ao uso dessas áreas de acordo com a Lei Federal nº 12.651/12 (Código Florestal). Essas informações servem como base para o tipo de gerenciamento que deve ser adotado pelos órgãos responsáveis. Com a identificação precisa das áreas propensas a inundações, é possível tomar medidas preventivas e de mitigação, como a construção de infraestrutura para o controle de cheias, além de contribuir na elaboração de políticas públicas que visem a identificação de áreas prioritárias para a implementação de práticas de conservação do solo e de recuperação de áreas degradadas.

Palavras-chave: banda c; águas superficiais; processamento em nuvem.

ABSTRACT

Floodplains are extremely important for maintaining life on land, as they are directly related to hydrological dynamics. Because they are flat areas, with low slopes and close to watercourses, they become preferred areas for irrigation projects, agricultural cultivation, grazing and the construction of roads. These activities generate negative impacts such as deforestation, silting up of rivers, disorderly occupation, flooding, water contamination, etc. Synthetic Aperture RADAR (SAR) data has shown excellent results in mapping and monitoring these areas due to its high revisit frequency, spatial resolution and the fact that it is not influenced by the atmosphere. The aim of this study was to map the flood areas in a region of the Lower Jaguaribe River located near the municipality of Russas, in the state of Ceará, for two different climatic seasons for the year 2021, using SAR images. The SAR Backscatter Threshold technique was used on Sentinel-1 satellite images. These images were pre-processed and a multi-temporal cube was built using the Google Earth Engine platform to observe the behaviour of the targets over time. As a result, the flooded areas were delineated by comparing the flooded and dry periods. The flood peak occurred in July, corresponding to an area of 121.18 ha and the dry period occurred in November, covering an area of 32.38 ha. The main types of Land Cover and Land Use of the flooded areas and Permanent Protection Areas (PPAs) were identified. It was found that in the flooded areas, more than 50% of the area corresponds to the exposed soil class. Around 3% of the area corresponds to human occupation. As for the use and occupation of restricted areas, it was identified that around 20% of these regions are made up of the classes Non-agricultural anthropogenic area and Agricultural anthropogenic area, generating a conflict in relation to the use of these areas in accordance with Federal Law No. 12,651/12 (Forest Code). This information serves as a basis for the type of management that should be adopted by the responsible bodies. By accurately identifying areas prone to flooding, it is possible to take preventative and mitigation measures, such as building flood control infrastructure, as well as contributing to the development of public policies aimed at identifying priority areas for the implementation of soil conservation practices and the recovery of degraded areas.

Keywords: c-band; waters surface; cloud processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Mapa de localização da área	20
Figura 2	–	Fotografia aérea obtida por drone em 05/05/2021 da área de estudo localizada no município de Russas	21
Figura 3	–	Mapa das Unidades Fitoecológicas da área de estudo	22
Figura 4	–	Mapa geológico da área de estudo	23
Figura 5	–	Mapa pedológico da área de estudo	24
Figura 6	–	Demonstração do ângulo de incidência	27
Figura 7	–	Tipos de Retroespalhamento: Especular, Difuso e reflexão de canto Cielo da informação	28
Figura 8	–	<i>Layout</i> de visualização do ambiente de edição de código do GEE	31
Figura 9	–	Fluxograma dos procedimentos realizados no trabalho	33
Figura 10	–	Modos de aquisição dos diferentes produtos Sentinel-1	35
Figura 11	–	Comportamento da precipitação e da cota altimétrica acumulada na estação Passagem Russas no ano de 2021	37
Figura 12	–	Comportamento da precipitação na estação Passagem Russas e nas estações Limoeiro e Limoeiro Centro, que ficam a montante da estação Passagem Russas, no ano de 2021	38
Figura 13	–	Pré-processamento da Imagem Sentinel-1: (A) Imagem bruta que recebeu apenas o processamento Multilooking; (B) Correção radiométrica; (C) Remoção do ruído <i>Speckle</i> (Filtro Lee Refinado); (D) Correção geométrica. Composição RGB utilizada nas imagens coloridas: Polarização sigma R-VV, G-VH e B-VV/VH	41
Figura 14	–	Cubo multitemporal elaborado para análise sazonal	43
Figura 15	–	Pontos coletados na imagem Sentinel-2 para validação do melhor valor de limiar	44
Figura 16	–	Espacialização dos pontos coletados na imagem Sentinel-2 na imagem Sentinel-1	44

Figura 17 – Imagem Sentinel-1 período chuvoso (maio/2021): (a) Polarização VH; (b) Polarização VV	46
Figura 18 – Imagem Sentinel-1 período seco (novembro/2021): (a) Polarização VH; (b) Polarização VV	47
Figura 19 – Fotografia aérea do dia 05/05/2022 mostrando bancos de areia cobertos por vegetação no período chuvoso	47
Figura 20 – Bancos de areia descobertos (sem vegetação) no período seco.....	48
Figura 21 – Diferença espectral entre as polarizações VV e VH	49
Figura 22 – Comparação visual e qualitativa da redução de ruídos entre as técnicas: (a) MNF e (b) redutor média do GEE	50
Figura 23 – Diferença visual entre os valores de limiar: (a) -23 dB, (b) -24 dB e (c) - 25 dB	51
Figura 24 – Média dos meses classificados pelo limiar de -23 dB	52
Figura 25 – Distribuição em gráfico da área coberta pela classe água ao longo de 2021	53
Figura 26 – Diferença do nível do Rio Jaguaribe entre os períodos de seca e cheia	54
Figura 27 – Mapa de uso e cobertura da área de estudo	56
Figura 28 – Classe de uso e ocupação correspondentes a área de inundação no período chuvoso	57
Figura 29 – Uso e cobertura do solo nas APP	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Coordenadas UTM da área de estudo	21
Tabela 2	–	Bandas de radar e seus respectivos comprimentos de onda e frequência	25
Tabela 3	–	Modos de imageamento do sensor e seus diferentes parâmetros	34
Tabela 4	–	Imagens Sentinel-1 adquiridas para a área de estudo	36
Tabela 5	–	Valores máximos, mínimos e desvio padrão do Retroespalhamento	45
Tabela 6	–	Classes de uso e cobertura do solo e suas respectivas áreas	56
Tabela 7	–	Área das classes de uso e cobertura do solo correspondentes as áreas inundáveis	58
Tabela 8	–	Classes de uso e cobertura identificadas nas APP da área de estudo	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CART	Classification and Regression Trees
ESA	Agência Espacial Europeia
EW	Extra Wide Swath Mode
GEE	Google Earth Engine
GRD	Ground Range Detected
IW	Interferometric Wide Swath Mode
MNF	Minimum Noise Fraction
OCN	Ocean
REM	Radiação Eletromagnética
RNA	Redes Neurais Artificiais
SAR	Radar de Abertura Sintética
SLAR	Radar de Visada Lateral
SLC	Single Look Complex
SNAP	Sentinel Applications Platform
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVM	Support Vector Machine
SM	Strip Map Mode
UTM	Universal Transversa de Mercator
WV	Wave Mode

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	19
1.2	Objetivos Específicos	19
2	ÁREA DE ESTUDO	20
2.1	Localização	20
2.2	Aspectos Geológico-Geomorfológicos	22
2.3	Aspectos Hidroclimáticos	23
2.4	Aspectos morfopedológicos	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1	Sensoriamento Remoto por RADAR	25
3.2	Classificação de imagens SAR	28
3.3	Google Earth Engine	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1	Imagens Sentinel-1	34
4.2	Dados auxiliares	37
4.2.1	<i>Dados fluviométricos e pluviométricos</i>	37
4.3	Pré-Processamento e tratamento de ruídos	38
4.3.1	<i>Aplicar arquivo de órbita</i>	38
4.3.2	<i>Remoção do ruído térmico</i>	38
4.3.3	<i>Correção das bordas</i>	39
4.3.4	<i>Calibração radiométrica</i>	39
4.3.5	<i>Correção do terreno</i>	39
4.3.6	<i>Conversão para decibéis (dB)</i>	40
4.3.7	<i>Aplicação de filtro</i>	40
4.4	Processamento	42
4.4.1	<i>Classificação</i>	42
4.5	Identificação das áreas inundáveis	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Polarização	46
5.2	Tratamento de Ruídos	49
5.3	Valor de Limiar	50

5.4	Impactos socioeconômicos e ambientais	55
6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

As ocupações nas proximidades de corpos hídricos sempre foram uma constante ao longo da história, principalmente em virtude da necessidade do uso da água tanto para o consumo humano quanto para as mais diversas atividades (agricultura, pecuária e a indústria) (OLIVEIRA, 2010). Essas regiões são importantes para a manutenção da vida terrestre principalmente por se tratar de um ecossistema que tem relação direta com a dinâmica hidrológica (BARTSCH *et al.*, 2009; MORAES NOVO, 2010; LIN *et al.*, 2013; WHITE *et al.*, 2015).

A ocupação das áreas inundáveis deve ser orientada de acordo com a legislação brasileira vigente, dentre elas as Leis Federais nº 12.651/12 (Código Florestal) e nº 6.766/79 (Parcelamento do solo Urbano). De acordo com o Código Florestal, as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular são consideradas como Áreas de Preservação Permanente (APP) (BRASIL, 2012).

Ao ocupar essas áreas junto às margens dos rios, o homem enfrenta sérios problemas por conta do regime fluvial dos corpos hídricos. A ocupação dessas zonas de acumulação sazonal, que servem para o extravasamento natural das cheias, se manifesta pela incorporação de terrenos das APP, gerando impactos como desmatamento da mata ciliar, assoreamento dos rios e contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Esses impactos são observados principalmente nos núcleos urbanos predispostos a enchentes, acarretando prejuízos sociais e danos materiais (ALMEIDA *et al.*, 2020). Conforme Christofolletti (2001), a ampliação das áreas urbanizadas, devido à construção de regiões impermeabilizadas, repercute na capacidade de infiltração das águas no solo, favorecendo o escoamento superficial, a concentração das enxurradas e a ocorrência de ondas de cheia.

O mapeamento de áreas inundáveis serve como base para a tomada de decisões do poder público e têm o potencial de minimizar os danos decorrentes deste fenômeno através de medidas de ordem não-estruturais (modelagem, mapeamentos, previsão e planejamento) e estruturais (obras hidráulicas). As medidas não-estruturais são compostas por ações que visam reduzir os efeitos das inundações e adaptar os habitantes das áreas atingidas para uma melhor convivência com a ocorrência periódica desses fenômenos. As ações de ordem estrutural têm como objetivo minimizar o transbordamento dos cursos d'água para que as atividades desenvolvidas na região não sejam comprometidas diminuindo a magnitude dos episódios.

De acordo com IPT (2007), o gerenciamento dessas áreas pode ser visto sob três

enfoques:

- a) Eliminação e/ou redução dos riscos: Tem como objetivo reduzir o risco agindo sobre o próprio processo através da implementação de medidas estruturais;
- b) Evitar a formação das áreas de risco: Tem como objetivo evitar o crescimento de áreas de risco através de um controle efetivo da forma de uso do solo. Esse controle se dá através de fiscalização e diretrizes técnicas que possibilitem a ocupação de forma adequada;
- c) Conviver com os problemas: Objetiva a convivência com os riscos presentes através da elaboração e operação de planos preventivos de defesa civil, envolvendo um conjunto de ações coordenadas.

Não há dúvidas que o melhor e menos oneroso caminho é a prevenção. Tucci (2005) afirma que grande parte do gerenciamento não incentiva a prevenção das inundações; ao invés disso, os órgãos públicos declaram estado de calamidade pública e recebem recursos, com ausência de concorrência pública para gastar.

É comum ver trabalhos que mapeiam áreas onde já ocorrem processos de inundação e trazem a comprovação de que o evento existe e sempre acontecerá quando houver condições para isto, não existindo ações mitigadoras suficientes que transformem tal realidade (BORGES; FERREIRA, 2019). Observam-se também poucos investimentos em pesquisas relacionadas ao entendimento do regime fluvial para a previsão e espacialização das inundações (OLIVEIRA, 2010). Desta forma, justifica-se a importância do mapeamento das regiões onde ainda não há ocupação urbana significativa e seus demais usos, mas que estão próximas de centros urbanos em expansão.

O avanço das técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, em conjunto com a evolução das técnicas computacionais de processamento de imagens, abre uma nova possibilidade para a identificação das áreas inundáveis com a aquisição de dados periódicos dos locais mais inacessíveis. Devido à dinâmica sazonal, muitos estudos com sensoriamento remoto utilizam sensores RADAR ao invés de sensores ópticos pela facilidade de aquisição periódica de informação sem interferência atmosférica. Na região semiárida existem alguns períodos do ano em que a condição atmosférica atrapalha a aquisição de imagens, fazendo com que ocorram descontinuidades na aquisição dos dados.

Os sensores RADAR são sistemas ativos que trabalham na região espectral das micro-ondas. Os sistemas de sensores ativos são aqueles que emitem seu próprio feixe de radiação eletromagnética e a partir daí recebem a resposta do alvo (WOODHOUSE, 2006; JENSEN, 2009; MORAES NOVO 2009, 2010; ZHANG *et al.*, 2013; PONZONI *et al.*, 2015).

Eles possuem certas vantagens sobre os sensores ópticos: (a) o imageamento pode ser no período diurno ou noturno, pois não dependem de uma fonte externa de radiação eletromagnética, como o Sol; e (b) operam quase sem interferência de nuvens, precipitação ou neblina, permitindo uma cobertura em condições de tempo adversas (HENDERSON; LEWIS, 2008; JENSEN, 2009; FENG *et al.*, 2011; PONZONI *et al.*, 2015). Uma vez que essas imagens possam ser adquiridas de forma gratuita, esses dados podem ser usados como uma alternativa ao uso de sensores ópticos. Um exemplo de imagens RADAR disponibilizadas de forma gratuita é o Sentinel-1 da Agência Espacial Europeia (ESA, do inglês *European Space Agency*).

O programa Sentinel, consiste em uma constelação de dois satélites equipados com sensores radar do tipo SAR. Seus produtos são distribuídos gratuitamente e operam na banda C da faixa espectral das micro-ondas. Esses dados estão sendo utilizados em diversos tipos de trabalhos, tais como: mapeamento e monitoramento dos ambientes ártico e marinho, áreas de risco de movimentos de massa, ambientes inundáveis, apoio em desastres, entre outros (SNOEIJ *et al.*, 2009; MALENOVSKÝ *et al.*, 2012; TORRES *et al.*, 2012). Sua resolução temporal de 12 dias para a cobertura de apenas um satélite e seis dias para o uso dos dois, garante uma série temporal robusta, permitindo um bom conjunto de dados sobre a dinâmica espacial na superfície terrestre, como, por exemplo, a dinâmica hídrica em ambientes inundáveis.

O processamento em conjunto de dados multitemporais muitas vezes obtêm maior acurácia por considerar a dinâmica temporal e fenológica na discriminação dos alvos superficiais (BLAES *et al.*, 2005, BRUZZONE *et al.*, 2004). Diversas pesquisas constataram o aumento da acurácia da classificação com o emprego de imagens multitemporais de RADAR (BRISCO; BROWN, 1995; BARGIEL; HERRMANN, 2011). O processamento dessa grande quantidade de dados produzida é um desafio, pois exige computadores cada vez mais potentes e uma maior capacidade de armazenamento dos dados. Uma solução para esse problema é a utilização de plataformas de computação em nuvem que sejam seguras, eficientes e avançadas. Um exemplo é a plataforma Google Earth Engine (GEE) que foi desenvolvida pela empresa Google com o objetivo de facilitar o processamento de dados multitemporais em grandes áreas e auxiliar no monitoramento por longos períodos (AMANI *et al.*, 2020).

Desta forma, estudos relacionados ao mapeamento de áreas inundáveis em regiões semiáridas utilizando dados RADAR apresentam grande importância científica e visam buscar soluções aos problemas enfrentados na preservação dessas áreas. As informações e os dados gerados permitem o monitoramento das atividades que possam causar impactos ambientais, além de auxiliar numa melhor gestão desses ambientes evitando desastres naturais futuros.

1.1 Objetivo Geral

Mapear as áreas inundáveis de uma área localizada na região do Baixo Jaguaribe (Ceará), a partir do processamento de imagens de satélite da constelação Sentinel-1 na Plataforma Google Earth Engine.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Delimitar áreas de inundação adjacentes ao Baixo curso do Rio Jaguaribe para o ano de 2021, para a orientação de medidas mitigadoras com foco na preservação desses ambientes;
- b) Avaliar a utilização do Google Earth Engine (GEE) como meio de obtenção de dados e processamento em nuvem neste estudo de caso;
- c) Verificar a capacidade do Sentinel-1 em aplicações voltadas à identificação e classificação de áreas inundáveis;
- d) Identificar os tipos de Cobertura e Uso da Terra mais afetados pelas inundações na área de estudo;
- e) Propor uma metodologia para mapeamento de áreas inundáveis no semiárido.

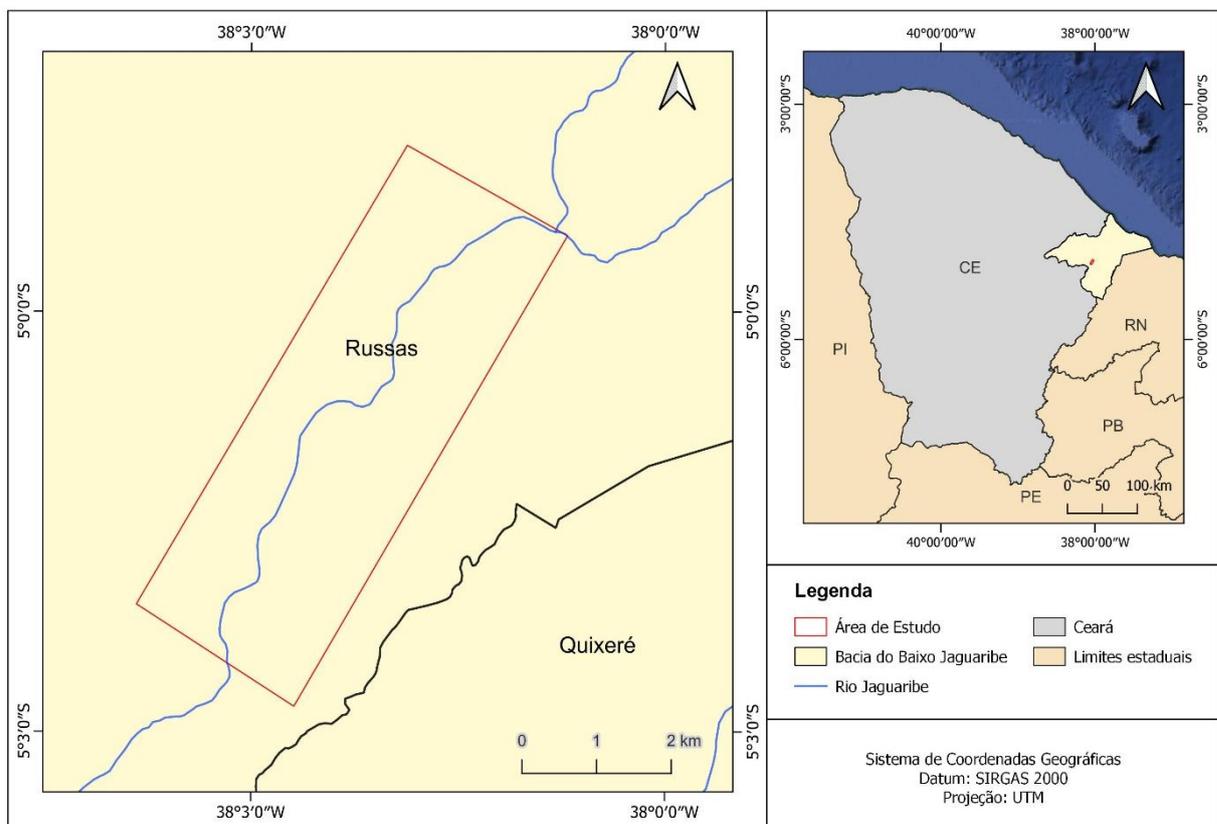
2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

O Rio Jaguaribe localiza-se na região leste do estado do Ceará e representa a maior e mais importante reserva hídrica cearense. Juntamente com seus tributários, os rios Banabuiú e Salgado, formam as bacias do Alto, Médio e Baixo Jaguaribe. Sua bacia hidrográfica abrange aproximadamente 80.000 km² e compreende, praticamente, a metade da área do Estado (PANTALENA; MAIA, 2014).

A sub-bacia do Baixo Jaguaribe corresponde a uma extensa planície aluvial que compreende uma área de 6.875 km². É responsável por um escoamento médio anual de 42,89 hm³. A bacia do Baixo Jaguaribe tem aproximadamente 207 açudes, dentre os quais destaca-se o açude Santo Antônio de Russas que é monitorado pela COGERH. A área de estudo encontra-se na sub-bacia do Baixo Jaguaribe (Figura 1), e está localizada precisamente no canal esquerdo do rio Jaguaribe, bifurcação esquerda do rio, no Município de Russas (Figura 2).

Figura 1 – Mapa de localização da área.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de IPECE (2022).

Figura 2 – Fotografia aérea obtida por drone em 05/05/2021 da área de estudo localizada no município de Russas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A região analisada apresenta uma área de aproximadamente 17,654 Km², cuja coordenadas estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas UTM da área de estudo.

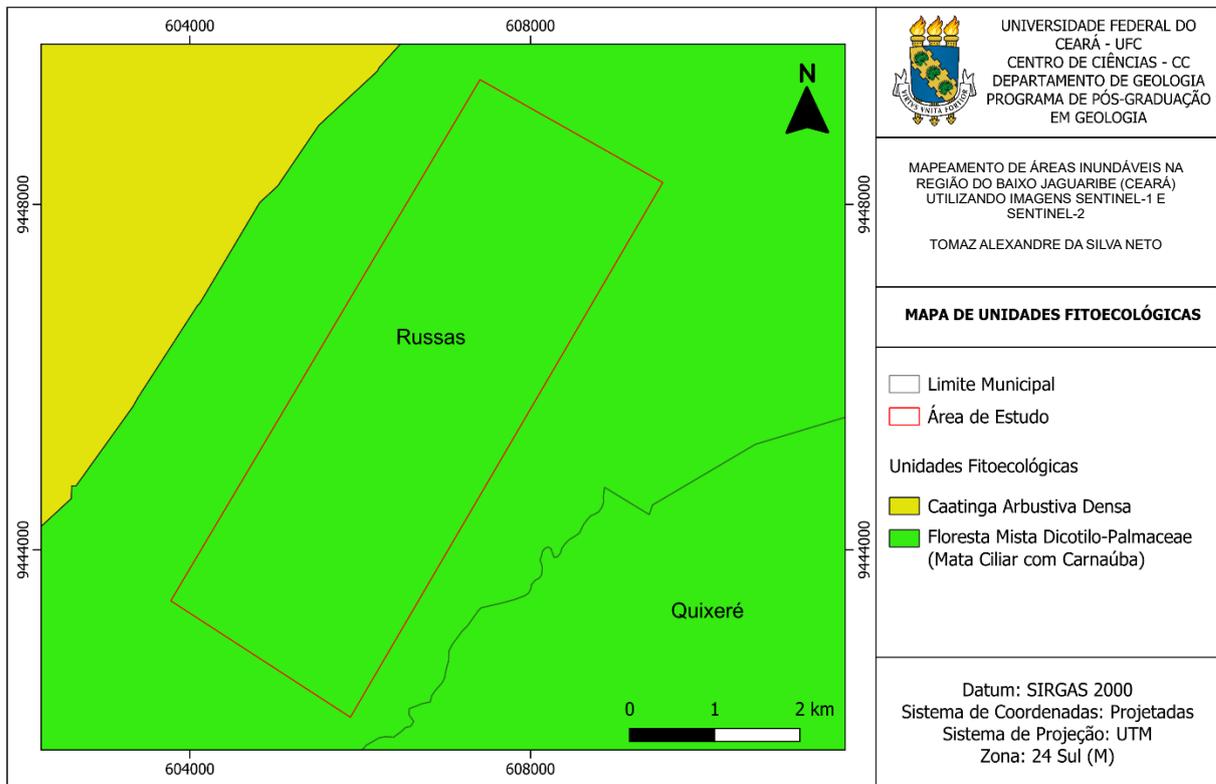
Vértice	X	Y
1	607440	9449427
2	609610	9448233
3	605884	9442064
4	603778	9443410

Fonte: Elaborado pelo autor.

O clima da região é classificado como tropical quente semiárido, com pluviosidade média de 870 mm ao ano e temperatura entre 26° C e 28° C. O bioma característico é a caatinga e apresenta vegetações do tipo Floresta Mista Dicotilo-Palmaceae, Caatinga arbustiva densa,

Caatinga Arbustiva aberta, Complexo Vegetacional da Zona Litorânea e Floresta caducifólia espinhosa (IPECE, 2022).

Figura 3 – Mapa das Unidades Fitoecológicas da área de estudo.

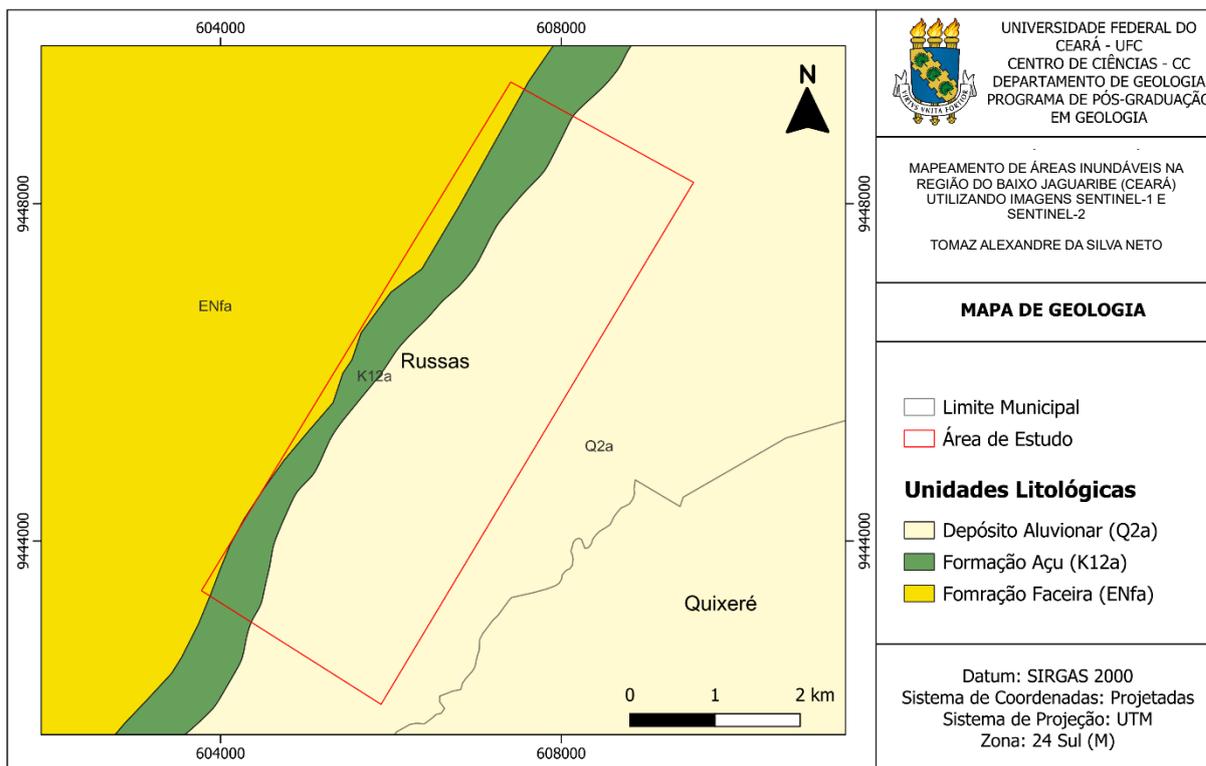


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de IPECE (2022).

2.2 Aspectos Geológico-Geomorfológicos

Um vale de largura e extensão consideráveis é a principal característica da área, que está situada no nível de 30 m de altitude, circuncidada por relevos mais elevados nas duas margens. Uma vertente com inclinação bastante variável separa o nível da planície fluvial com o *front* da cuesta da chapada do Apodi. A área se encontra sobre uma planície com relevo bastante plano na zona dos aluviões. A margem direita do rio é limitada pelas rochas do grupo Apodi pertencentes as formações Açú e Jandaíra. A margem esquerda do rio é limitada pelos aluviões da Formação Faceira do Grupo Barreiras. Os depósitos aluvionares constituem a maior parte do Baixo Jaguaribe e são representados por sedimentos areno-argilosos do Quaternário (Figura 4) (SILVA; MAIA, 2017).

Figura 4 – Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de IPECE (2022)

Marcada por um intenso processo de deposição sobre o embasamento cristalino, a planície fluvial do rio Jaguaribe foi formada pela interação dos processos geomorfológicos e climáticos que ocorreram a partir do desgaste das rochas do embasamento e pela ação das mudanças climáticas ocorridas a partir do Cenozoico. O rio possui margens limitadas por baixos níveis de terraços fluviais que são compostos por seixos de composição quartzosa. Acima do terraço encontram-se as várzeas que são regiões onde o uso agrícola é bastante intenso no período chuvoso (SILVA; MAIA, 2017).

Segundo Souza (2002), a semiaridez do Baixo Jaguaribe conduziu ao desenvolvimento de uma vasta superfície de aplainamento dada a partir de processos de morfogênese responsáveis pela elaboração da depressão periférica do Estado do Ceará.

2.3 Aspectos Hidroclimáticos

O escoamento das águas é influenciado diretamente pela contextualização climática da região, marcada por estar inserida no domínio do clima semiárido. A principal característica do domínio semiárido é a existência de dois períodos definidos: um seco e longo, em média com oito meses de duração e um chuvoso que é curto, irregular e distribui-se de forma desigual

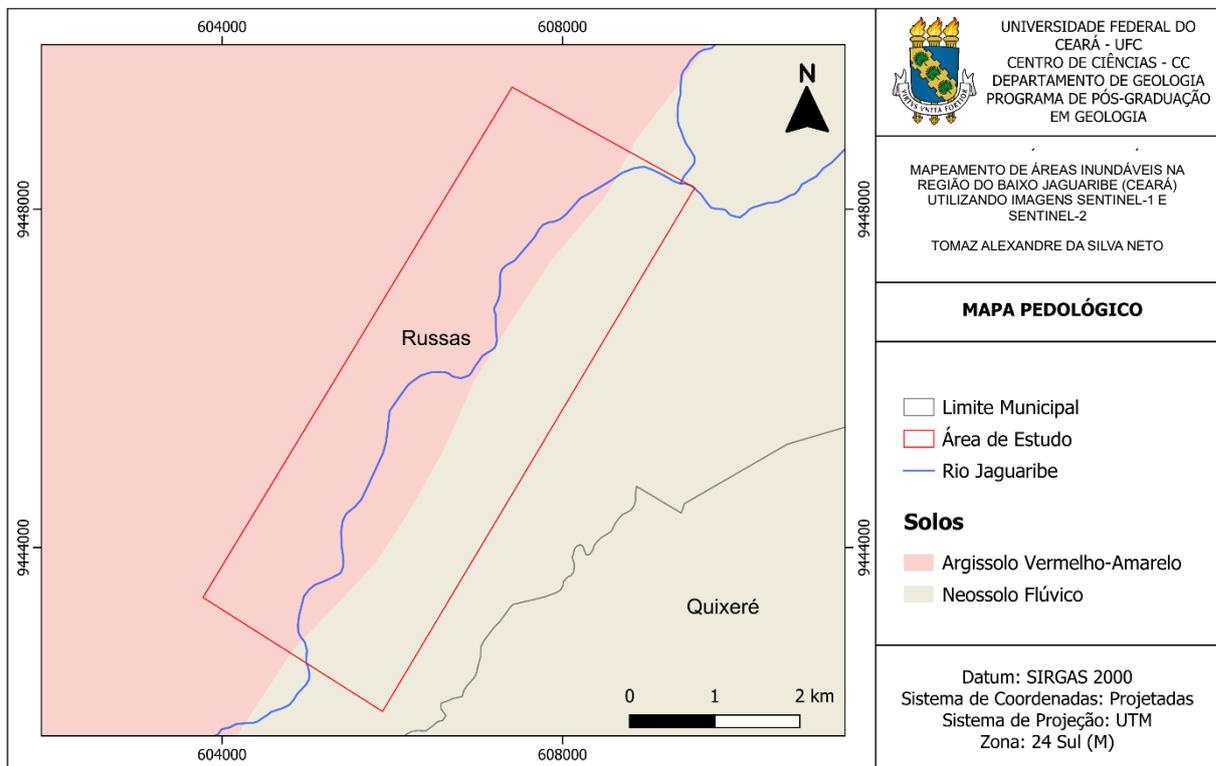
no tempo e no espaço. A estação chuvosa ocorre geralmente entre os meses de março a maio e a estação seca é observada de setembro a dezembro (MENDES *et al.*, 2021).

2.4 Aspectos morfopedológicos

Por se tratar de uma área de deposição, os aluviões do Baixo Jaguaribe funcionam como bons reservatórios, drenando a água, favorecendo maior armazenamento e menos escoamento dado à boa porosidade e suficiente permeabilidade. Sua recarga hídrica é assegurada pelas precipitações pluviométricas e pela contribuição da rede de drenagem no período de cheias. Portanto, predomina a presença de água subterrânea em toda sua extensão.

O mosaico de solos que compõem o recorte espacial em destaque pode ser definido pelos cambissolos, na chapada do Apodi (Bacia Potiguar), Neossolos Flúvicos (solos aluviais) e vertissolos na planície fluvial que margeia as rochas cretáceas do grupo Apodi, além da predominância dos Argissolos Vermelho-Amarelos (Figura 5).

Figura 5 – Mapa pedológico da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de EMBRAPA (2020).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sensoriamento Remoto por RADAR

O sistema RADAR corresponde os sensores ativos que trabalham na região espectral das micro-ondas. Este tipo de sistema é caracterizado como sendo aqueles que emitem seu próprio feixe de radiação eletromagnética e a partir daí recebem a resposta do alvo (WOODHOUSE, 2006; JENSEN, 2009; MORAES NOVO, 2009; MORAES NOVO, 2010; ZHANG *et al.*, 2013; PONZONI *et al.*, 2015). Segundo Moraes Novo (2010), o RADAR executa cinco funções básicas: transmissão do pulso de micro-ondas em direção ao alvo, recepção da porção refletida pelo alvo (energia retroespalhada), registro da potência, variação temporal e tempo de retorno da energia retroespalhada.

Os sensores RADAR possuem certas vantagens sobre os ópticos: (a) o imageamento pode ser no período diurno ou noturno, por conta de não depender da radiação eletromagnética provinda do Sol, e (b) opera quase sem interferência de nuvens, precipitação ou neblina, permitindo uma cobertura em condições climáticas adversas; essa propriedade está ligada ao comprimento de onda utilizado, na qual somente os fenômenos atmosféricos mais extremos que podem interferem no imageamento, tais intervalos de comprimento de onda estão representados na Tabela 2. Em fenômenos mais extremos essa interferência ocorre devido ao tamanho das moléculas de água e gelo que interagem com a onda emitida pelo sensor (WOODHOUSE, 2006; HENDERSON; LEWIS, 2008; JENSEN, 2009; MORAES NOVO, 2009; MORAES NOVO, 2010; FENG *et al.*, 2011; PONZONI *et al.*, 2015).

Tabela 2 - Bandas de radar e seus respectivos comprimentos de onda e frequência.

Banda	Comprimento de onda λ (cm)	Frequência f (MHz)
P	136-77	220-390
UHF	100-30	300-1.000
L	30-15	1.000-2.000
S	15-7,5	2.000-4.000
C	7,5-3,75	4.000-8.000
X	3,75-2,40	8.000-12.500
Ku	2,40-1,67	12.500-18.000
K	1,67-1,18	18.000-26.500
Ka	1,18-0,75	26.500-40.000

Fonte: Adaptado de Henderson; Lewis (2008).

Os primeiros instrumentos que funcionavam com o princípio do RADAR foram utilizados no contexto da Segunda Guerra Mundial, com aparelhos mais rudimentares que detectavam alvos utilizando pulsos de radiação em micro-ondas com um magnetron de cavidade, pois ainda não existiam os transmissores de antena, para detectar alvos inimigos (WOODHOUSE, 2006). Após um certo período, surgiram os primeiros Radares voltados para o imageamento, na década de 1950, chamados RADAR de Visada Lateral (SLAR), que eram do tipo RADAR de Abertura Real (RAR) e necessitavam de uma grande infraestrutura (especificamente uma antena de grandes dimensões) para obter imagens com resolução razoável. Então, com a crescente evolução tecnológica, foram introduzidos os Radares de Abertura Sintética (SAR), que simulam digitalmente o tamanho necessário da antena para se chegar à resolução esperada (WOODHOUSE, 2006; MORAES NOVO, 2009; MORAES NOVO, 2010; PONZONI *et al.*, 2015). Os SAR são largamente utilizados em estudos sobre fenômenos na superfície terrestre.

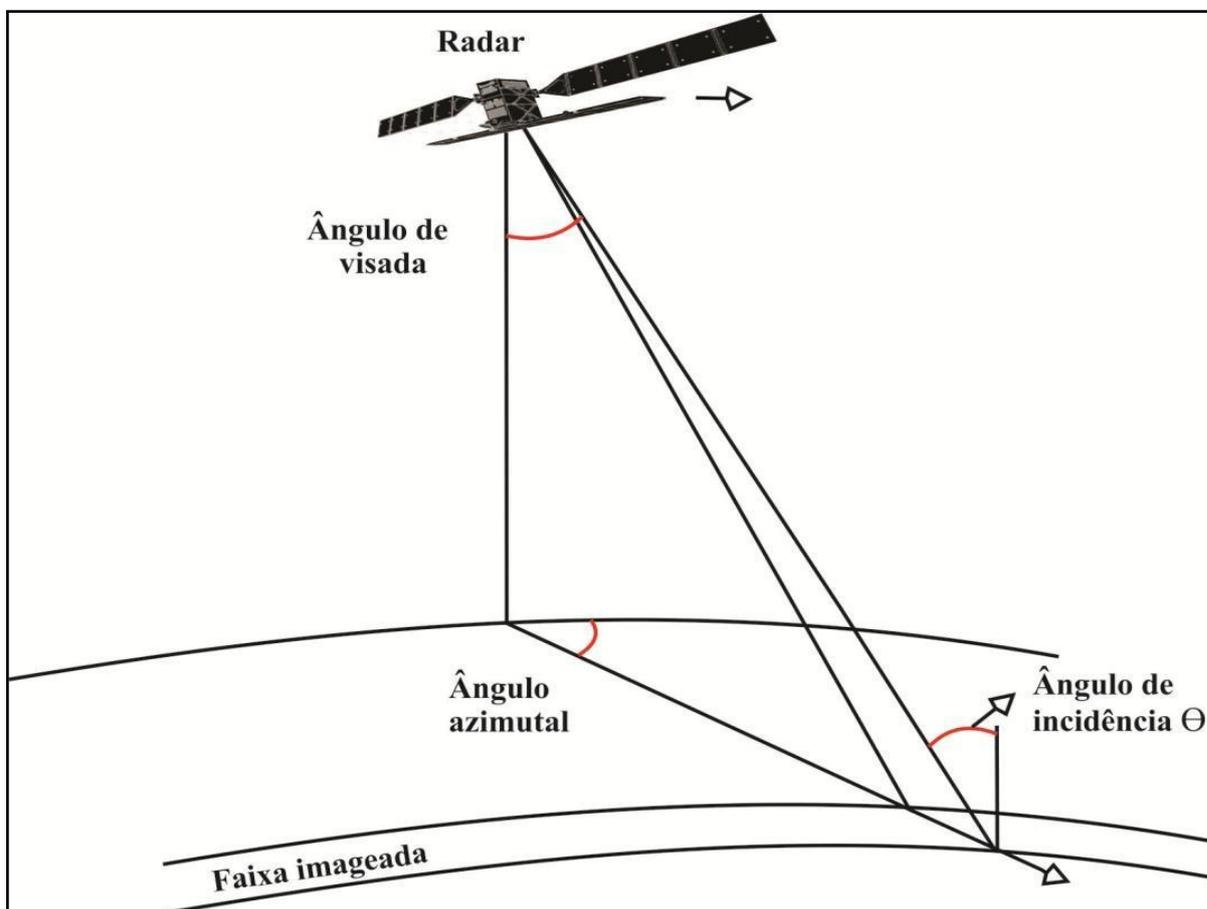
A classificação dos radares considera parâmetros particulares, que são, em geral, o comprimento de onda/frequência, ângulo de incidência e o tipo de polarização (HENDERSON; LEWIS, 1998; PONZONI *et al.*, 2015). O comprimento de onda está relacionado à banda em que o sistema é capaz de operar. Devido ao fato de o sistema gerar a sua própria energia, raramente se tem plataformas que operem em várias bandas (PONZONI *et al.*, 2015). A Tabela 2 elenca as principais bandas utilizadas pelos sistemas SAR, juntamente com os respectivos comprimentos de onda e frequência, cada uma das diferentes bandas permite uma penetração distinta da radiação nos alvos, que aumenta de acordo com o comprimento de onda (PONZONI *et al.*, 2015).

O ângulo de incidência (Θ) é o ângulo entre o pulso transmitido pelo RADAR e uma linha perpendicular à superfície. Ele é um dos principais parâmetros que determinam a aparência dos alvos nas imagens (WOODHOUSE, 2006; PONZONI *et al.*, 2015) (Figura 6). Assumindo que a radiação eletromagnética (REM) possui campos magnéticos e elétricos que se propagam em direções ortogonais entre si, a polarização é a trajetória do campo elétrico em um dado plano (PONZONI *et al.*, 2015). Assim, quando o campo elétrico se desloca paralelo à propagação, ocorre a polarização horizontal (H), quando se desloca perpendicularmente à propagação, tem-se polarização vertical (V).

Os sistemas RADAR por serem sensores ativos que possibilitam a polarização tanto da energia emitida quanto da energia captada ou medida, permitem quatro combinações de polarização, que tem relação direta na interação da radiação de micro-ondas com os alvos em superfície, são elas: HH que transmite e recebe o pulso horizontalmente, VV que transmite e

recebe verticalmente, VH que transmite verticalmente e recebe horizontalmente e HV, que transmite horizontalmente e recebe verticalmente.

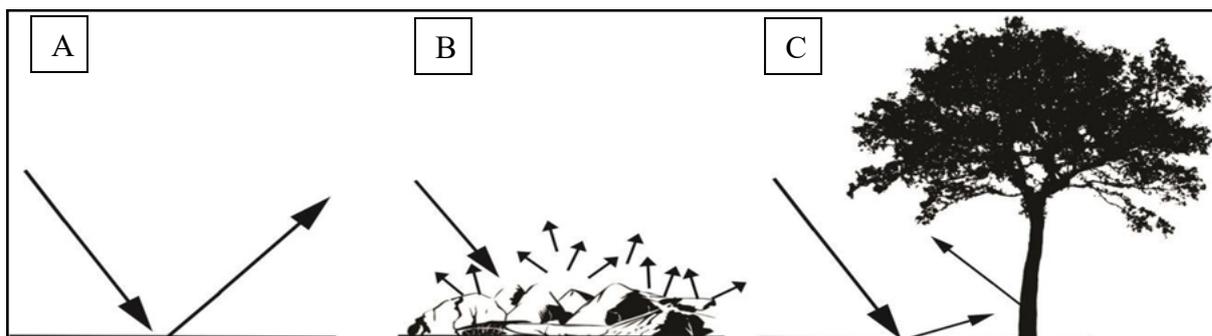
Figura 6 - Demonstração do ângulo de incidência.



Fonte: Adaptado de Henderson e Lewis (1998)

Ao imagear uma área na superfície o RADAR capta a amplitude/intensidade da energia retroespalhada pelo alvo após a sua interação com a radiação emitida. Tal energia é descrita pelo coeficiente de Retroespalhamento (σ^0) (PONZONI *et al.*, 2015), que é dado em decibéis (dB) em razão de sua grande variação para diferentes alvos (MORAES NOVO, 2010). O Retroespalhamento está ligado à rugosidade da superfície terrestre. Onde houver uma superfície lisa em relação ao comprimento de onda, o espalhamento ocorrerá na direção oposta ao sensor, sendo denominado do tipo especular. Em uma superfície rugosa, o espalhamento ocorrerá em várias direções, denominado do tipo difuso. Um terceiro tipo de espalhamento ocorre quando duas, ou mais, superfícies lisas são adjacentes, sendo denominado como reflexão de canto (Figura 7).

Figura 7 – Tipos de Retroespalhamento: (a) especular; (b) difuso; e (c) reflexão de canto.



Fonte: Adaptado de Ponzoni *et al.* (2015).

As imagens RADAR têm sido utilizadas para diversos estudos: mapeamento de uso e cobertura do solo (ERSAHIN *et al.*, 2010; KAYABOL; ZERUBIA, 2013; JAFARI *et al.*, 2015; MAJEDI *et al.*, 2016), monitoramento da cobertura de neve (RONDEAU-GENESSE *et al.*, 2016), movimentos de massa (DAI *et al.*, 2016), avalanches (MALNES *et al.*, 2015), detecção de embarcações marítimas (HLAVÁCOVÁ *et al.*, 2016), elaboração de modelos digitais de superfície (NIKOLAKOPOULOS; KYRIOU, 2015), inclusive mapeamento de áreas inundáveis, objeto de estudo desta pesquisa (FERREIRA, 2018; MESQUITA, 2019; SILVESTRE, 2019; FROTA, 2019; COSTA, 2020).

3.2 Classificação de imagens SAR

Os métodos de classificação de imagens SAR são tão diversos quanto os de classificação de outros tipos de dados, acompanham a evolução tecnológica que vem trazendo inovações na forma de segmentar e classificar os dados. A seguir listam-se algumas metodologias importantes para extração de feições em imagens SAR.

Uma técnica bastante conhecida, e simples a depender dos aspectos apresentados na imagem em que é aplicada, é a classificação por Limiar "*Threshold*" (OZESMI; BAUER, 2002; OLIVER; QUEGAN, 2004; COSTA; TELMER, 2006; DENG *et al.*, 2014; WHITE *et al.*, 2015). A classificação por *Threshold* consiste em atribuir a um *pixel*, ou um grupo deles, uma classe através de um limiar, selecionado do histograma da imagem, definido muitas vezes pelo usuário (OZESMI; BAUER, 2002; WHITE *et al.*, 2015). Para um bom resultado deste método, a imagem precisa estar com seus alvos mais aparentes, sem uma grande variedade entre os pixels (OLIVER; QUEGAN, 2004). Em suma, o limiar pode ser definido pela média acrescida do dobro do desvio padrão de cada classe em dB (COSTA; TELMER, 2006).

Este método não se restringe aos sensores ativos, Ozesmi e Bauer (2002) elencaram

diversos trabalhos utilizando imagens de sensores passivos. Deng *et al.* (2014) atentaram para a escolha de diferentes *Thresholds* para diferentes imagens, em um registro temporal, principalmente no caso dos sensores passivos. O *Threshold* é um método com boa eficácia para se mapear água superficial (WHITE *et al.*, 2015). Touzi *et al.* (2007) e Shmitt e Brisco (2013) incorporaram à sua classificação de áreas úmidas no Canadá com imagens RADARSAT-2 a decomposição de alvos, que consiste em dissolver a resposta polarimétrica de um espalhador distribuído, evitando a sobreposição de diferentes espalhamentos em um pixel (TOUZI *et al.*, 2007). Em seu trabalho, também com imagens RADARSAT-2, Marechal *et al.* (2012) utilizaram a decomposição polarimétrica pela entropia de Shannon para classificar áreas úmidas na França em um intervalo de um ano de cobertura do sensor.

Os métodos de classificação, que estão sendo mais largamente empregados nos últimos anos, são baseados em aprendizado de máquina “Machine Learning”, um ramo da área computacional que aborda a inteligência artificial, que estuda a classificação de dados através de modelos preditivos. O método de aprendizado de máquina mais difundido é o de Redes Neurais Artificiais (RNA), que consiste em um modelo de predição baseado no sistema nervoso central humano, ele possui nós (neurônios) que são unidades de processamento que recebem e transmitem informações entre si, totalmente interconectados (*Fully connected*), aprendendo e resolvendo problemas de classificação diversos (CIVCO, 1993; HUANG *et al.*, 1987; HEPNER *et al.*, 1990).

Existem outros métodos bastante relevantes e utilizados em *Machine Learning*, como o *Support Vector Machine* (SVM). Sendo empregado com sucesso nos trabalhos de Feng *et al.* (2011); Tu *et al.* (2012); Aytekin *et al.* (2013); Gou *et al.* (2014); Uhlmann e Kiranyaz (2014); Betbeder *et al.* (2015); e Masjedi *et al.* (2016). As SVM são utilizadas na computação desde a década de 1990, porém só na década de 2000 começaram a ser mais difundidas em sensoriamento remoto óptico e de RADAR. Trata-se de uma técnica complexa, onde o algoritmo “aprende” aspectos importantes da imagem para então poder classificá-la automaticamente, da melhor maneira. Através do reconhecimento de padrões e regras já descritos antes, como distância, conformidade, textura e contorno, o SVM lista os objetos a serem classificados com precisão, por meio da criação de um “hiperplano” que separa as classes de dados, com base nos padrões observados na fase de treinamento do algoritmo (BETBEDER *et al.*, 2015; MASJEDI *et al.*, 2016).

Existe também o algoritmo chamado *Randon Forest* (RF) que é capaz de criar um modelo preditivo através da indução com base em exemplos previamente considerados. O RF é um algoritmo de Breiman (2001), derivado do programa CART (*Classification and*

Regression Trees) de Breiman *et al.* (1993), que consiste em um tipo de aprendizado de máquina, também chamado de aprendizado de conjunto, Ensemble Learning (BREIMAN, 2001). O RF gera múltiplas árvores de decisão, criadas a partir de uma reamostragem aleatória do conjunto de treinamento original, que são utilizadas posteriormente para classificar novos objetos. As árvores geradas pelo algoritmo possuem baixa correlação, para evitar que o classificador fique tendencioso para determinada classe (BREIMAN, 2001).

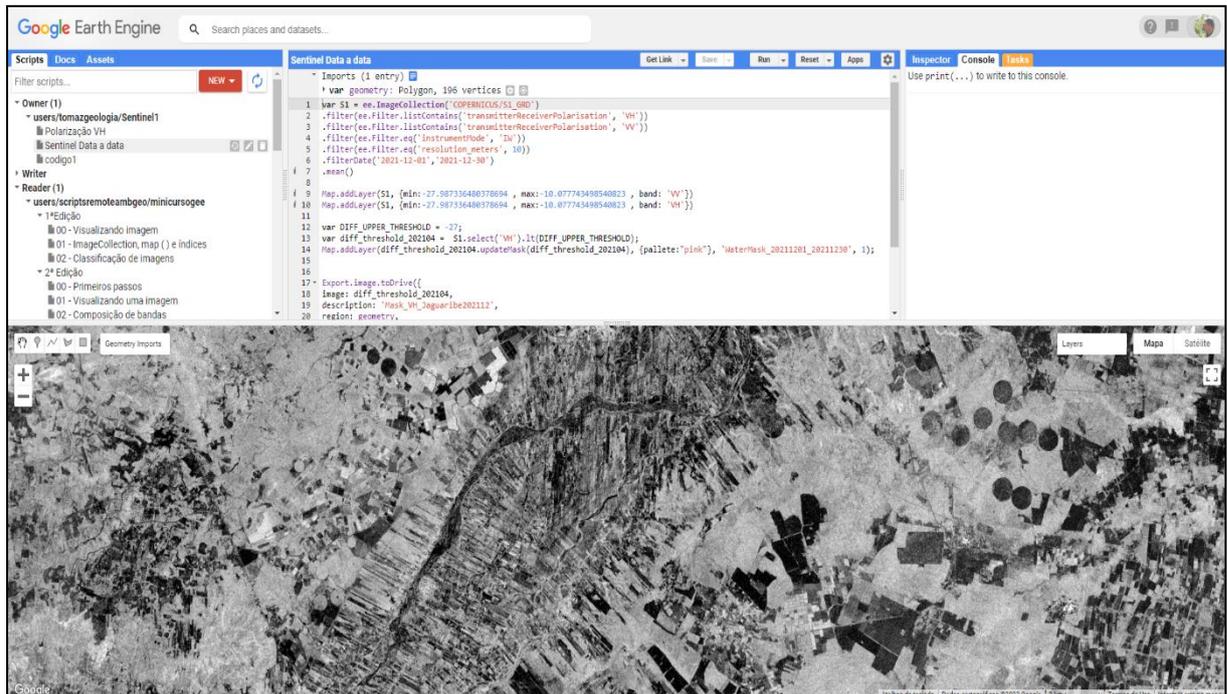
Para a divisão dos nós de cada árvore o RF seleciona os dados de entrada, fornecidos pelo usuário, de maneira aleatória, podendo ser utilizados várias vezes durante a construção da árvore (BREIMAN, 2001; WHITCOMB *et al.*, 2009; BELGIU; DRAGUT, 2016). O método de seleção dos dados de entrada é baseado na metodologia de reamostragem *Bootstrap*, que consiste em retirar da amostra original uma outra amostra de tamanho “n” com reposição, a chamada amostra *Bootstrap* (DA SILVA FILHO, 2015). O RF vem sendo muito utilizado por ser um classificador que apresenta excelentes resultados de classificação e processamento veloz.

3.3 Google Earth Engine

A plataforma do Google Earth Engine (GEE) é uma plataforma avançada de geoprocessamento espacial em nuvem, que vem sendo bastante utilizada em trabalhos de sensoriamento remoto em virtude da economia de tempo e de recursos. O uso dessa ferramenta proporciona acesso a uma vasta coleção de imagens de satélite de diversas partes do mundo, sem custos, com atualização e expansão diária. Esta capacidade de processamento instantâneo de milhares de imagens permite o desenvolvimento de trabalhos de observação da Terra.

O GEE consiste em um banco de dados em avançada escala, no qual estão catalogados grande parte dos produtos de sensoriamento remoto disponíveis gratuitamente, como por exemplo, toda a coleção de satélites Landsat e Sentinel. As principais vantagens do GEE são: o acesso ao banco de dados de maneira remota (através da nuvem); a redução do tempo de manipulação dos dados; não é necessário realizar o *download* de todos os dados utilizados; e permite um aumento na capacidade de processamento de séries temporais. Para acessar os dados do servidor do GEE e desenvolver os algoritmos que irão fazer parte do processamento é necessário o uso de linguagem computacional JavaScript ou Python. A Figura 8 apresenta um exemplo do *layout* de visualização do ambiente de edição de código do GEE.

Figura 8 – *Layout* de visualização do ambiente de edição de código do GEE.



Fonte: Google Earth Engine (2022)

O GEE é composto pelos seguintes componentes: I) *Code Edit*: uma IDE para escrever e executar scripts; II) *Explore*: Um aplicativo para explorar o catálogo de dados do GEE e executar análises simples; e III) uma biblioteca em Python e JavaScript para auxiliar no desenvolvimento e análises das imagens.

O *front-end* de fácil acesso fornece um ambiente adequado para a interação entre dados e algoritmos. Os usuários podem adicionar e selecionar seus próprios dados e desta forma utilizar os recursos da nuvem para realizar o processamento. A plataforma permite que uma grande quantidade de pessoas explore um enorme banco de dados para observação da terra. O GEE não exige computadores potentes para o processamento e nem *softwares* complexos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir, são descritos os materiais utilizados, bem como as técnicas e métodos adotados na elaboração e execução do mapeamento e análise das áreas inundáveis de um trecho do Rio Jaguaribe.

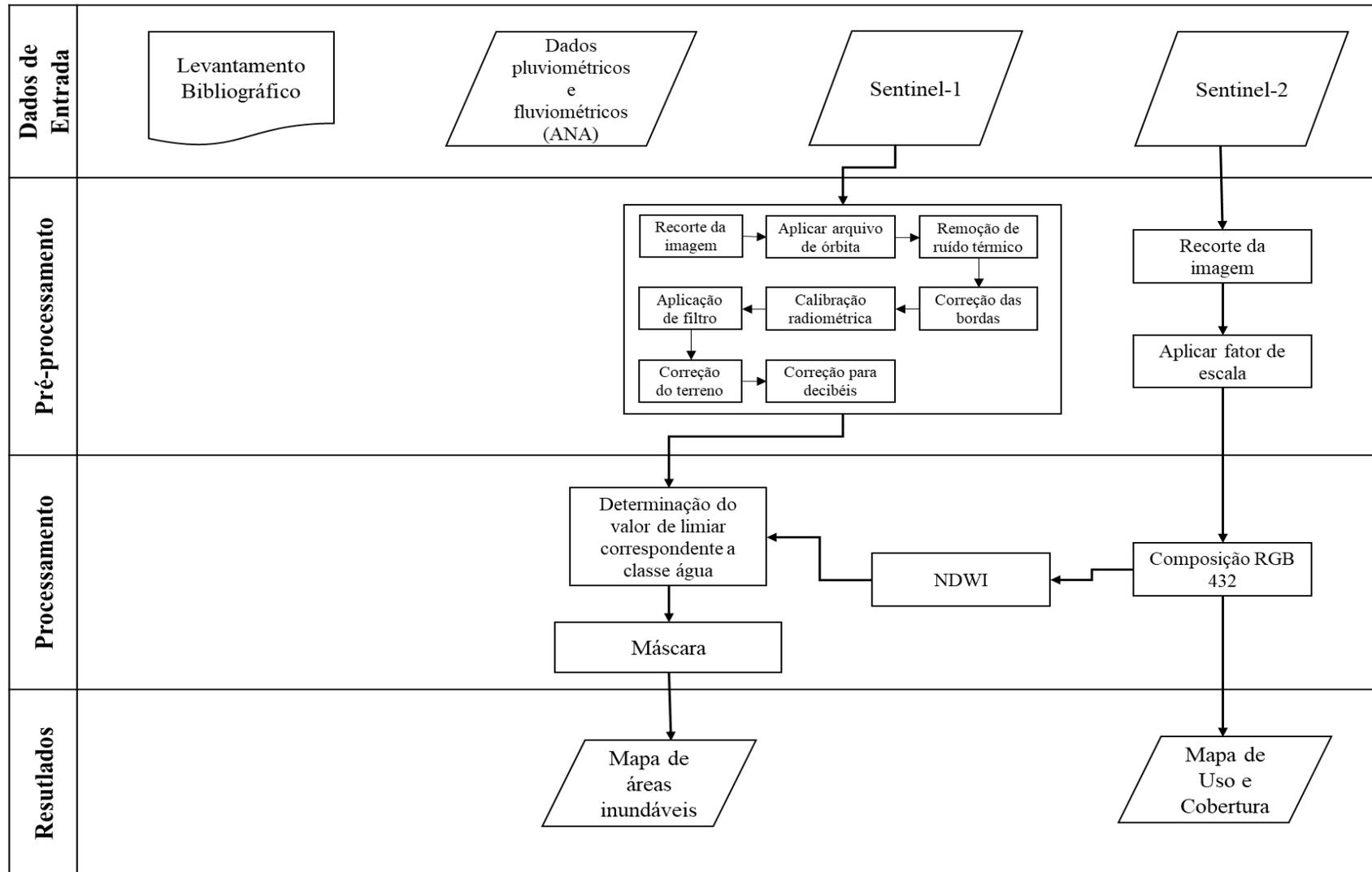
Os materiais e métodos utilizados para a realização desta pesquisa basearam-se em revisões do emprego de imagens RADAR para o mapeamento de corpos hídricos e áreas inundáveis, sendo destacados os seguintes: Hess *et al.* (1995), Kasischke *et al.* (1997), Ramsey (1998), Di Baldassarre *et al.* (2011), Schumann e Moller (2015). Tendo como método mais utilizado, a técnica de classificação pelo Valor de Limiar que é realizado após a etapa de filtragem da imagem (suavização dos ruídos).

A utilização do modelo proposto passou por adaptações a fim de realizar o mapeamento das áreas inundáveis em rios no semiárido, pois eles apresentam características diferentes dos rios da região Amazônica (região na qual se concentra grande parte dos trabalhos desenvolvidos com essa finalidade). No semiárido os rios são temporários ou perenizados, apresentam um fluxo irregular e migração lateral do canal durante as estações chuvosas. A metodologia empregada levou em consideração essas características, desta forma os parâmetros utilizados (filtros de redução de ruídos, valor de limiar e tipo de polarização) foram adaptados de acordo com as características ambientais, morfológicas e sazonais da região. O fluxograma a seguir sintetiza os passos metodológicos seguidos no trabalho (Figura 9).

Os dados de imagens SAR são eficazes no imageamento em diferentes condições climáticas. Mesmo assim, a utilização de dados complementares é recomendada com o objetivo de tornar a análise dos fenômenos mais completa e integrada. Servem também para dar uma validação primária para o comportamento observado no conjunto de dados principal. Compreender a distribuição pluviométrica, a variação altimétrica e a resposta espectral das unidades morfológicas ajudam na caracterização das áreas inundáveis quanto a sua dinâmica hidrológica.

Os dados auxiliares utilizados para a caracterização das áreas inundáveis foram: (a) os dados fluviométricos e pluviométricos fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), adquiridos na estação Passagem Russas, localizada ao longo do curso do Rio Jaguaribe; e (b) as imagens ópticas do Sentinel-2.

Figura 9 – Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Imagens Sentinel-1

A ESA lançou o satélite Sentinel-1A no dia 03 de abril de 2014 e o satélite gêmeo Sentinel-1B após 24 meses. Esses satélites fazem parte do programa Copernicus da ESA para a observação e monitoramento dos mais variados fenômenos na superfície terrestre a partir de dados de diferentes faixas espectrais. Além dos sensores RADAR, fazem parte do programa os satélites Sentinel-2A (lançado em 23/06/2015), Sentinel-2B (lançado em 07/03/2017), Sentinel-3A (lançamento em 16/02/2016) e Sentinel-3B (lançado em 25/04/2018), que operam na faixa do espectro visível e infravermelho.

Será lançado em 2024 o Sentinel-4 que fornecerá dados para monitoramento da composição atmosférica. Em 13/10/2017 foi lançado o Precursor Sentinel-5 que visa preencher a lacuna de dados de observações atmosféricas. O Sentinel-5 lançado em 2021 também tem o objetivo de fornecer dados de observações atmosféricas. Em novembro de 2020 foi lançado o Sentinel-6A e o Sentinel-6B está programado para ser lançado em novembro de 2025. Seus dados são distribuídos gratuitamente e podem ser baixados da internet por qualquer usuário cadastrado, em site específico mantido pela ESA (TORRES et al., 2012; SNOEIJ et al., 2009; SERVELLO et al., 2015).

O Sentinel-1 opera na faixa espectral das micro-ondas, correspondente a banda C (5,4 GHz), sendo capaz de atuar em diversas áreas de monitoramento terrestre e aquático. A resolução temporal é de 12 dias para um satélite e 6 dias para a constelação. Sua resolução espacial depende do modo de aquisição e do tipo de produto gerado por cada um deles.

O sistema imageador pode operar com dupla polarização (HH/HV ou VV/VH) e polarização única (HH ou VV) possuindo quatro modos de aquisição: SM (Strip Map Mode – Imagens com 80 km de largura), IW (Interferometric Wide Swath Mode – Imagens com 250 km de largura), EW (Extra Wide Swath Mode – Imagens com 400 km de largura) e WV (Wave Mode – Imagens com 20 km de largura) (Tabela 3).

Tabela 3 – Modos de imageamento do sensor e seus diferentes parâmetros.

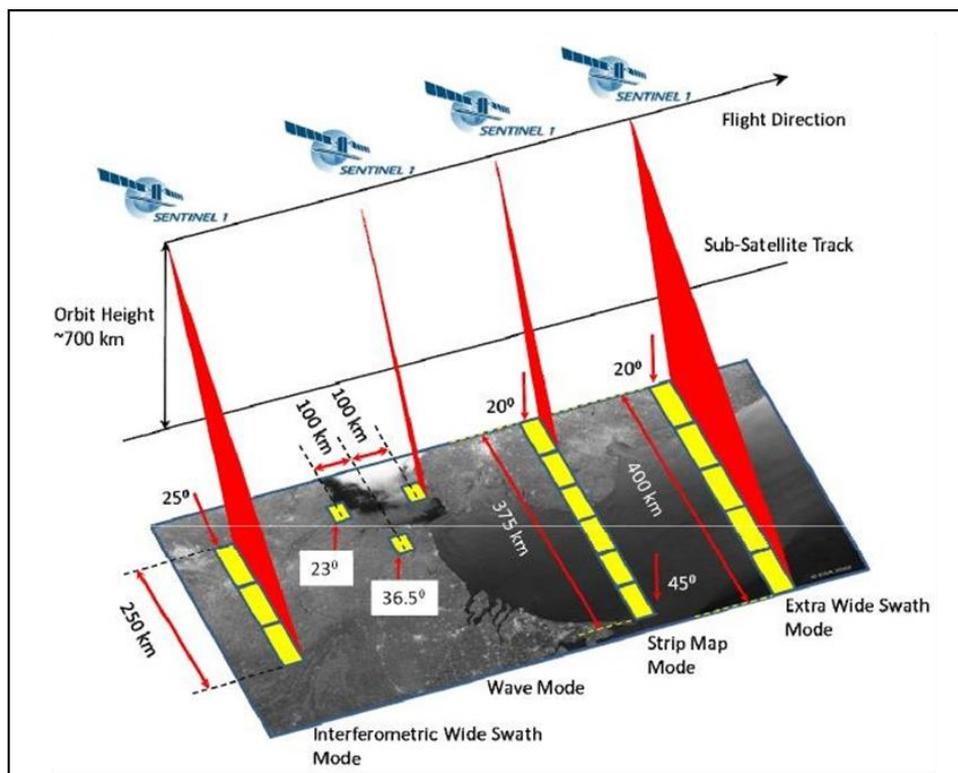
Parâmetro	Strip-Map Mode (SM)	Interferometric Wide Swath Mode (IW)	Extra Wide Swath Mode (EW)	Wave Mode (WV)
Polarização	HH+HV ou VV+VH	HH+HV ou VV+VH	HH+HV ou VV+VH	HH ou VV
Incidência mínima	20° - 45°	25°	20°	23° + 36.5°

Resolução Azimutal	<5m	<20m	<40m	<5m
Resolução de Terreno	<5m	<5m	<20m	<5m
Faixa imageada	>80km	>250km	>400km	20 x 20km

Fonte: Adaptado de Snoeij (2009).

No tipo de aplicação, os produtos Sentinel-1 são subdivididos em: I) SLC (*Single Look Complex*) que são imagens sem o procedimento de “*Multilooking*”. São imagens mais brutas, desfocadas); II) GRD (*Ground Range Detected*) são disponibilizados com pré-processamento “*Multilooking*”, é georreferenciada utilizando os parâmetros de órbita e altitude do satélite; III) OCN (*Ocean*) são destinados para estudos oceanográficos, incluindo informações espectrais e de ventos de superfície. A Figura 10 mostra a operação de cada modo de imageamento.

Figura 10 – Modos de aquisição dos diferentes produtos Sentinel-1.



Fonte: ESA (2022).

Ao total, foram adquiridas 29 cenas da área em estudo relativo ao ano de 2021 (Tabela 4). As imagens do satélite 1B não estavam disponíveis, bem como os produtos com a polarização dual H (HH, HV). A operação do Sentinel 1B ainda não se encontra em sua

totalidade, exceto para algumas áreas pontuais. O modo de imageamento escolhido para o trabalho foi o IW, principalmente por conta da largura da faixa imageada, que consegue comportar um pouco mais de 250 quilômetros com uma resolução espacial de 7x9m sem processamento de correção geométrica. Após o procedimento de correção, a resolução espacial assume o valor de 10x10m, permitindo mapeamentos em escala de até 1:50.000.

O nível do produto escolhido foi o GRDH por possuir um nível de pré-processamento que diminui a demanda computacional e preserva a resolução espacial (*High resolution*).

Tabela 4 – Imagens Sentinel-1 adquiridas para a área de estudo.

NOME DO PRODUTO	DATA
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210107T080930_20210107T080955_036029_0438C2_4104	07/01/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210119T080929_20210119T080954_036204_043EEA_9B30	19/01/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210131T080929_20210131T080954_036379_0444FA_0111	31/01/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210212T080929_20210212T080954_036554_044B11_8FE3	12/02/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210224T080928_20210224T080953_036729_045129_2653	24/02/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210308T080928_20210308T080953_036904_045741_579F	08/03/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210320T080928_20210320T080953_037079_045D5E_E2F7	20/03/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210401T080929_20210401T080954_037254_046366_CB8A	01/04/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210413T080929_20210413T080954_037429_046974_C7B9	13/04/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210425T080930_20210425T080955_037604_046F7E_C7FE	25/04/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210507T080930_20210507T080955_037779_047578_DE79	07/05/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210519T080931_20210519T080956_037954_047AC4_4E91	19/05/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210531T080932_20210531T080957_038129_048004_413C	31/05/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210612T080932_20210612T080957_038304_048534_44B8	12/06/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210624T080933_20210624T080958_038479_048A6B_B836	24/06/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210706T080934_20210706T080959_038654_048FB2_5CA7	06/07/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210718T080934_20210718T080959_038829_0494F1_ACF7	18/07/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210730T080935_20210730T081000_039004_049A24_FA9E	30/07/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210823T080936_20210823T081001_039354_04A5E4_1F6A	23/08/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210904T080937_20210904T081002_039529_04ABE7_39F1	04/09/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210916T080937_20210916T081002_039704_04B1E0_506B	16/09/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20210928T080938_20210928T081003_039879_04B7E3_0F59	28/09/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211010T080938_20211010T081003_040054_04BDEA_F030	10/10/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211022T080938_20211022T081003_040229_04C405_7398	22/10/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211103T080938_20211103T081003_040404_04CA1C_1B47	03/11/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211115T080938_20211115T081003_040579_04D03A_EF19	15/11/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211127T080937_20211127T081002_040754_04D63A_AD47	27/11/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211209T080937_20211209T081002_040929_04DC4B_1F81	09/12/2021
S1A_IW_GRDH_1SDV_20211221T080936_20211221T081001_041104_04E22B_5C2D	21/12/2021

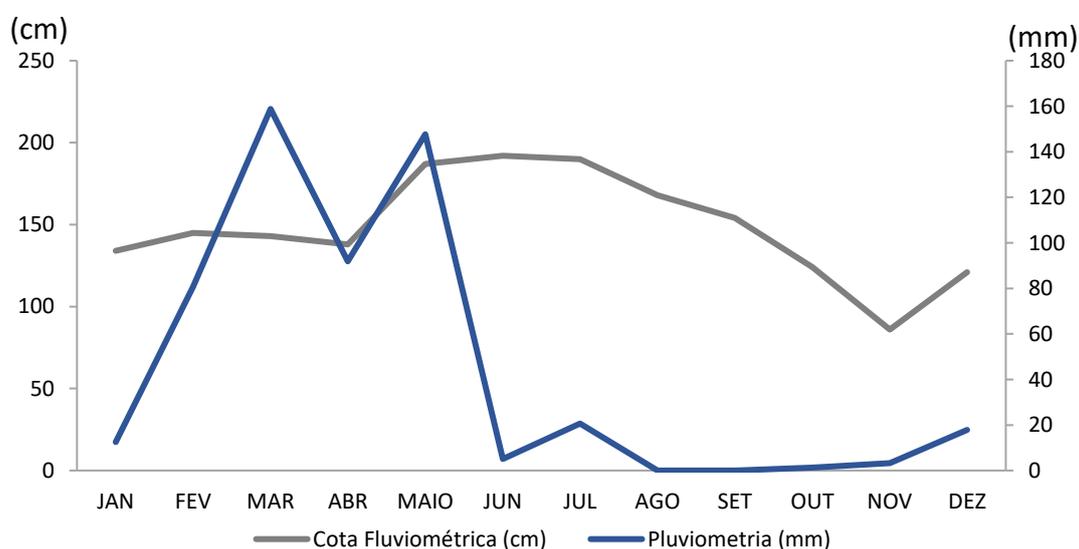
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Dados auxiliares

4.2.1 Dados fluviométricos e pluviométricos

A Figura 11 mostra os dados pluviométricos e fluviométricos mensais da estação Passagem Russas localizada no município de Russas. Ela foi escolhida por ser a estação mais próxima da área analisada com dados disponíveis.

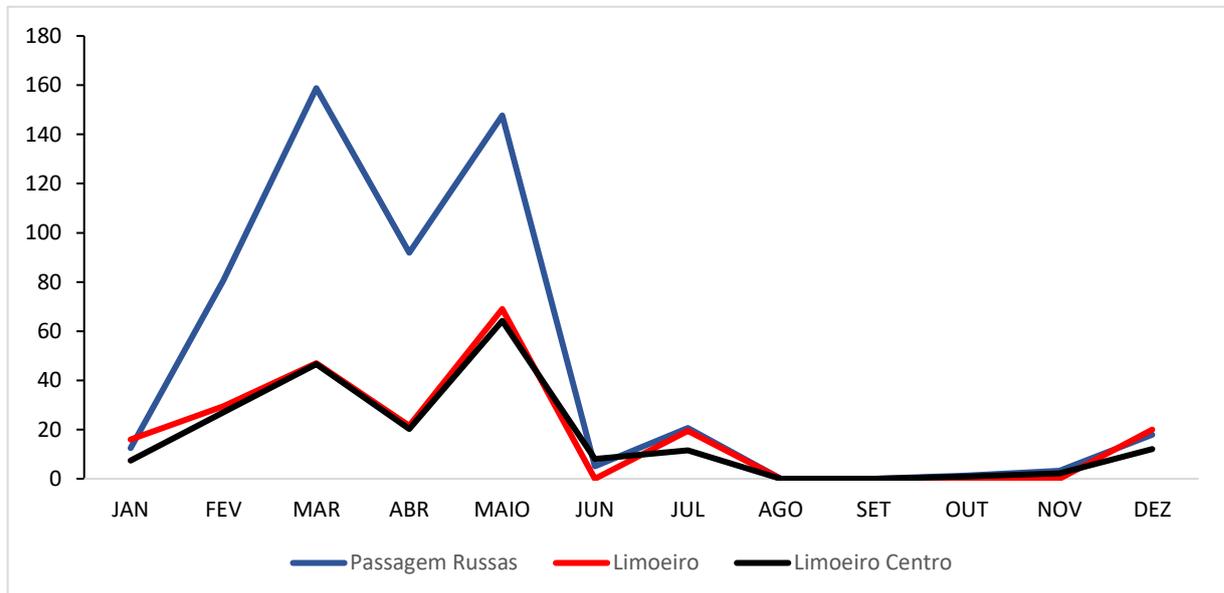
Figura 11 – Comportamento da precipitação e da cota altimétrica acumulada na estação Passagem Russas no ano de 2021



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da ANA (2021).

Os dados mostraram um padrão na cota altimétrica máxima mensal do Rio Jaguaribe, onde o período de cheia começou no mês de abril e tem seu pico no mês de junho. Em comparação com os dados pluviométricos observa-se que o pico de cheia ocorre dois meses após o pico de pluviosidade. É provável que este fato esteja relacionado com as propriedades do solo que demora aproximadamente dois meses para ficar saturado. Foram analisados os dados de outras duas estações a montante da estação Passagem Russas com o objetivo de confirmar essa informação. A Figura 12 mostra que nas duas estações a montante da estação utilizada como referência os dados são similares e os picos de chuva correspondem aos mesmos meses (março e maio). Essas informações auxiliam na análise das imagens correspondentes ao período de cheia e o período de seca que ocorre no mês de novembro.

Figura 12 - Comportamento da precipitação na estação Passagem Russas e nas estações Limoeiro e Limoeiro Centro, que ficam a montante da estação Passagem Russas, no ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da ANA (2021).

4.3 Pré-Processamento e tratamento de ruídos

A etapa de pré-processamento foi realizada através da plataforma Google Earth Engine (GEE). O Earth Engine usa as seguintes etapas de pré-processamento para identificar o coeficiente de Retroespalhamento em cada pixel:

4.3.1 Aplicar arquivo de órbita

O arquivo de órbita fornece informações precisas sobre a posição e velocidade do satélite. As informações de órbita fornecidos nos metadados de um produto SAR geralmente não são precisos e podem ser refinados. Isso é realizado com os arquivos de órbita disponibilizados dias ou semanas após a geração do produto.

4.3.2 Remoção do ruído térmico

A intensidade de imagem SAR é perturbada por adição de ruído térmico, especificamente no canal de polarização cruzada. Embora a Agência Espacial Europeia (ESA) forneça vetores de ruído calibrados para subtração da potência do ruído, as contribuições de

ruído residual são significativas quando se considera a distribuição de retroespalhamento relativamente estreita do canal de polarização cruzada.

4.3.3 Correção das bordas

Os produtos Sentinel-1 *Level-1* e *Level-2* são produzidos pelo Sentinel-1 *Instrument Processing Facility*. Durante esse processo diferentes tipos de ruídos aparecem nas bordas da imagem do produto *Level-1*. Esses efeitos aparecem principalmente durante o deslocamento de tempo entre o horário do pulso transmitido e o horário de início da atual janela de amostragem recebida. Com isso, *pixels* “sem valor” ou com valores muito baixos são introduzidos nas bordas dos produtos gerados e podem atrapalhar na criação de séries temporais gerando dados inconsistentes.

4.3.4 Calibração radiométrica

A calibração é o procedimento que converte valores de número digital dos pixels para valores de retroespalhamento por unidade de área no alcance do terreno (σ^0) (Figura 13 B). A calibração radiométrica para as imagens Sentinel-1A, no nível 1 de processamento é realizada a partir da Equação 1:

$$\sigma_i^0 = \frac{DN_i^2}{A_i^2} \quad (\text{Equação 1})$$

onde σ_i^0 são os valores de retroespalhamento por unidade de área no alcance do terreno; DN são os valores de números digitais dos pixels e A_i são o coeficiente de calibração obtido em tabelas de pesquisa de calibração (LUTs).

4.3.5 Correção do terreno

Esse procedimento reorganiza os pixels da imagem de acordo com um Sistema de Projeção Cartográfica e estabelece os padrões altimétricos e de orientação. Esse processo visa corrigir distorções por conta da topografia (Figura 13 D). A correção do terreno é necessária devido as variações topográficas e distorções *off-nadir* que ocorrem nas imagens durante a aquisição (WANG *et al.*, 2013).

4.3.6 Conversão para decibéis (dB)

Para se analisar um mapeamento de águas superficiais ou delimitar sua área é necessário converter os valores de retro dispersão dos pixels para decibéis. Desta forma é possível identificar os valores em decibéis que correspondem aos recursos hídricos e assim realizar delimitação desses alvos.

4.3.7 Aplicação de filtro

As imagens RADAR apresentam um efeito pontilhado característico que se parece com o ruído “sal e pimenta”. Essa aparência granulada é chamada de *Speckle* e é proveniente da propriedade de coerência do sistema SAR que emite sinais na mesma frequência, comprimento de onda e fase (WOODHOUSE, 2006).

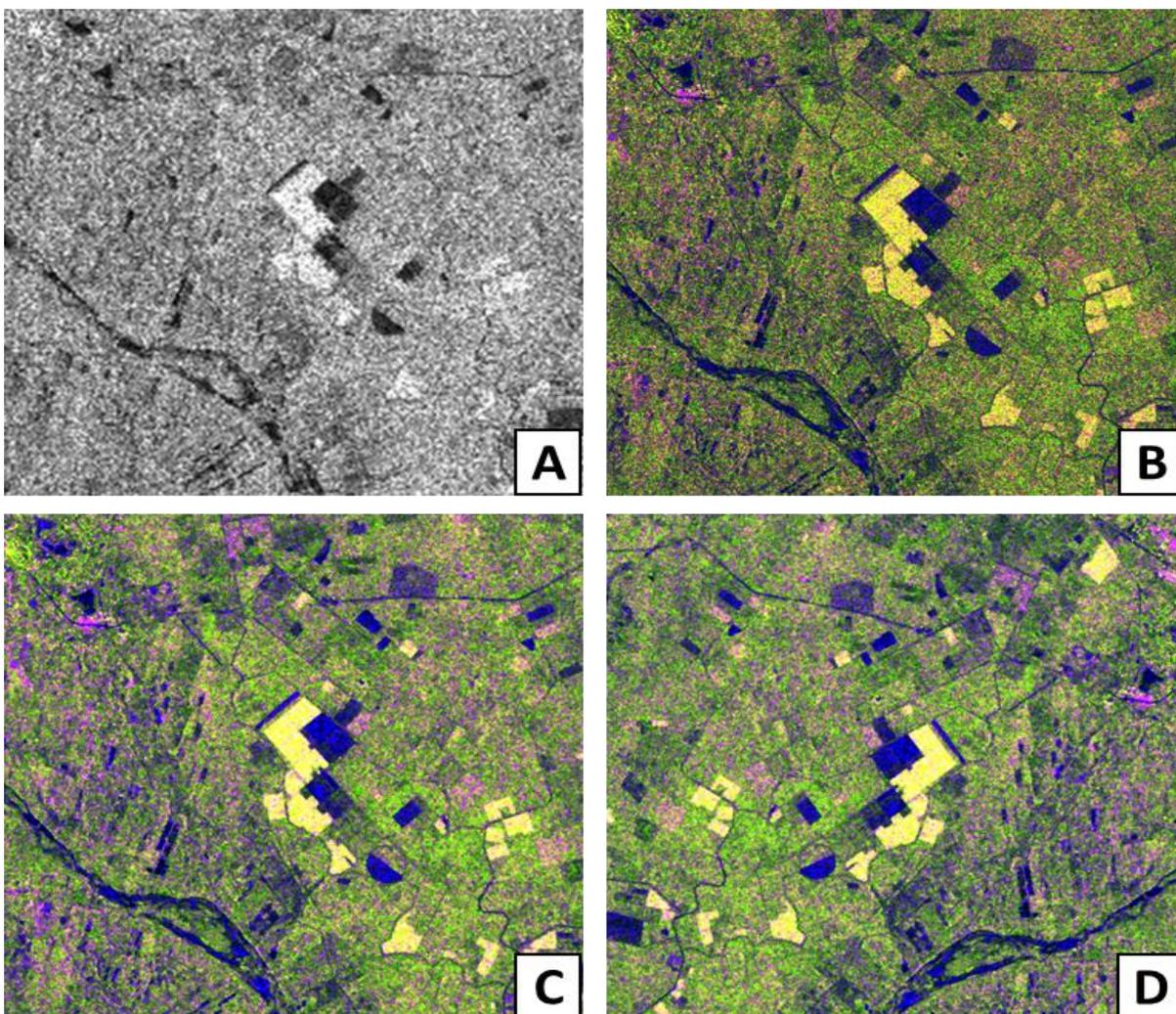
O *Speckle* é considerado um ruído multiplicativo, ou seja, quanto maior for a intensidade do sinal maior será o ruído. O sensor não tem resolução suficiente para resolver os espalhamentos de maneira individual gerando interferência entre os feixes que são propagados. Desta forma, dentro de uma área coberta por um *pixel* podem existir diversos tipos de alvo que irão retroespalhar a energia de maneira diferente. Essa interferência pode ser construtiva ou destrutiva originando *pixels* mais claros (construtiva) ou mais escuros (destrutiva), gerando um espalhamento complexo de cada *pixel*. A saída final de cada *pixel* é o resultado da soma aleatória de todos os retroespalhamentos em cada célula, por conta da limitação de resolução espacial, distribuídos no plano complexo (HENDERSON; LEWIS, 1998; SHITOLE *et al.*, 2014; MENESES; SANO, 2011; FREITAS *et al.*, 2007).

O efeito *Speckle* pode afetar significativamente a obtenção de informações dificultando o processamento das imagens e a sua interpretação visual (Figura 13C). Para resolver os efeitos causados por essa interferência utilizam-se técnicas de *Multilooking* ou filtragem adaptativa. Os métodos de filtragem ajudam a identificar os recursos mais relevantes independente do classificador e removem as variáveis irrelevantes para o usuário (BELGIU; DRĂGU, 2016). A técnica *Multilooking* consiste na redução do tamanho da abertura sintética por um fator que seria o número de visadas (*looks*) do mesmo *pixel* (Figura 13A). No entanto, quanto maior o número de *looks* empregados, maior será a perda na resolução em azimute (LEE *et al.*, 1991).

Os filtros adaptativos usam estatísticas obtidas com o retroespalhamento de cada pixel para modificar a imagem. Existem diversos tipos de filtro adaptativos: *Frost*, *Gamma Map*,

Lee, *Lee refinado* (Figura 13C), *Lee Sigma* e *Median*. A escolha do filtro a ser utilizado deve ser determinada de acordo com o objetivo de cada análise. A melhor maneira para comparação entre os filtros é através da relação sinal-ruído.

Figura 13 - Pré-processamento da Imagem Sentinel-1: (A) Imagem bruta que recebeu apenas o processamento *Multilooking*; (B) Correção radiométrica; (C) Remoção do ruído *Speckle* (Filtro *Lee Refinado*); (D) Correção geométrica. Composição RGB utilizada nas imagens coloridas: Polarização sigma R-VV, G-VH e B-VV/VH



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o tratamento de ruídos no cubo multitemporal e nas análises das imagens data a data foi utilizada uma ferramenta do Google Earth Engine chamada redutor. Um redutor é um objeto do Earth Engine que representa uma maneira de agregar dados ou calcular uma estatística. Ao chamar uma coleção de imagens, cada *pixel* no mapa é derivado de uma pilha de *pixels*. O comportamento padrão do GEE é selecionar o *pixel* disponível mais recente (da cena mais

recente na pilha). É usado então um redutor para alterar esse comportamento. Eles funcionam como um caminho para agregar dados ao longo do tempo, espaço, faixas, matrizes e outras estruturas de dados no Earth Engine. As reduções da coleção de imagens ocorrem com o tempo. Por exemplo: o redutor de mediana tem o benefício de remover nuvens (que têm um valor alto) e sombras (que têm um valor baixo) no caso das imagens ópticas. Para as imagens RADAR o redutor funciona como um filtro que reduz o sinal ruído.

4.4 Processamento

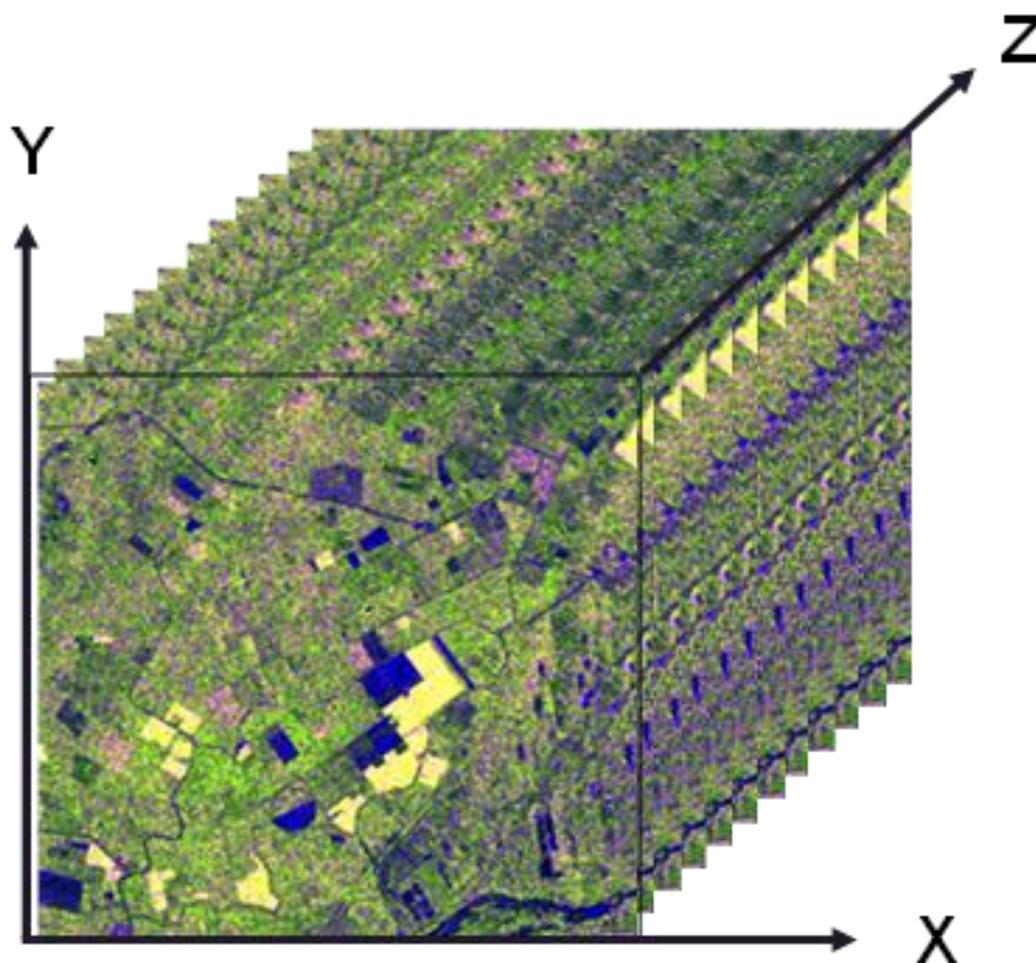
4.4.1 Classificação

O procedimento de classificação das imagens foi composto por 2 cenários: I) Classificação dos *pixels* levando em consideração seu comportamento espectral ao longo do tempo, gerando uma única imagem classificada no período de um ano (Polarizações VV e VH) através de uma máscara criada a partir da limiarização dos valores de retroespalhamento; II) Classificação individual de cada cena (data a data), onde foi observado o comportamento sazonal das áreas inundáveis através de uma máscara criada a partir da limiarização dos valores de retroespalhamento (*Threshold*).

Para a classificação do cenário I as imagens foram empilhadas na plataforma Google Earth Engine através da construção de um cubo multitemporal onde os eixos X e Y correspondem as coordenadas e o eixo Z corresponde ao comportamento dos alvos ao longo da linha temporal (Figura 14). Foram construídos dois cubos multitemporais (Polarização VV e Polarização VH) para as análises.

A organização de imagens de satélite em forma cubos de dados tem se mostrado bastante promissora no processamento e análise de grandes volumes de dados, bem como para o desenvolvimento de novas aplicações de observação da Terra. Estes cubos de dados facilitam a análise e o processamento de imagens de satélite devido ao seu alinhamento multidimensional no tempo e no espaço. Um dos problemas ao se trabalhar com uma grande quantidade de dados é a exigência de computadores com alto poder de processamento. Essa é uma dificuldade geral para os usuários de dados de Observação da Terra (EO). Uma saída é trabalhar com cubos de dados prontos para análises hospedados em nuvens.

Figura 14 – Cubo multitemporal elaborado para análise sazonal.



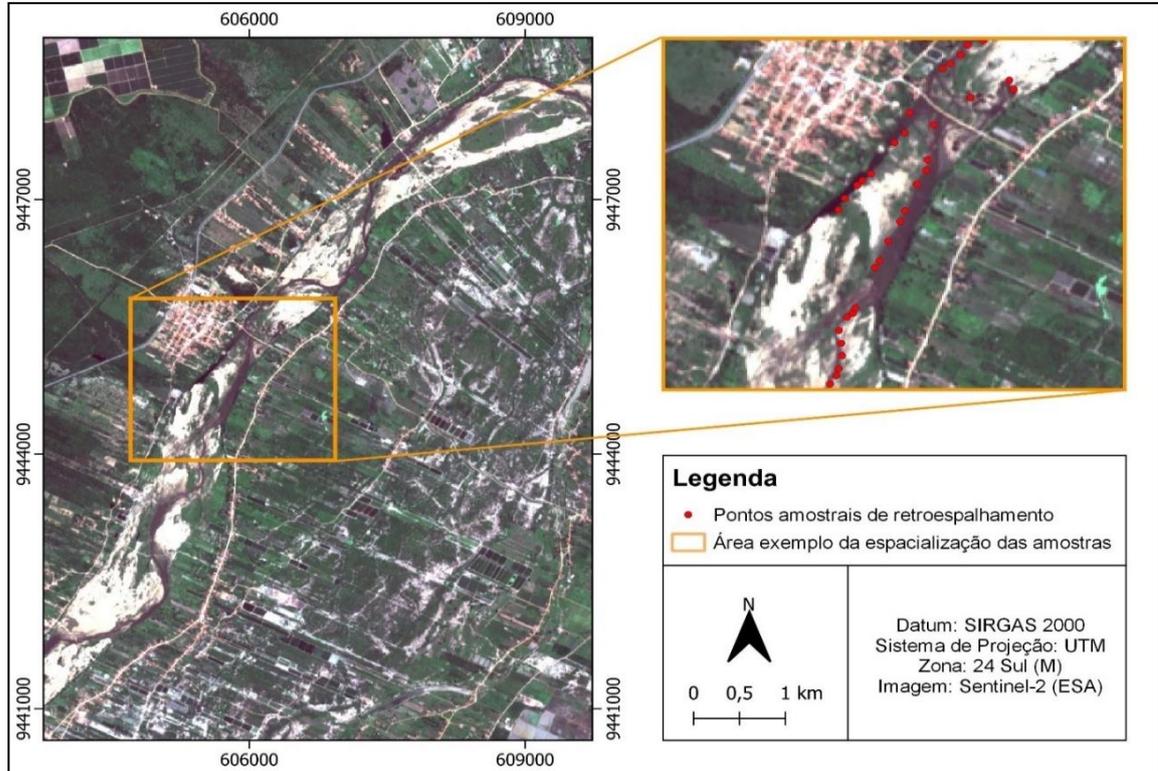
Fonte: Elaborado pelo autor.

A identificação das áreas inundáveis utilizou a técnica *Threshold* (valor limite) (e.g. MATGEN *et al.*, 2011). Esse método gera ótimos resultados na identificação da dinâmica de inundação sendo bastante utilizada nas imagens de radar (HENDERSON; LEWIS 2008).

A determinação do melhor valor limite foi realizada através da amostragem de valores de Retroespalhamento correspondentes a água. A coleta dessas amostras teve como validação uma imagem óptica Sentinel-2 (RGB-432) do dia 23/05/2021, sendo a única imagem disponível para a área sem a presença de nuvens (Figura 15). Todas as demais imagens apresentaram interferência atmosférica tornando inviável a sua utilização.

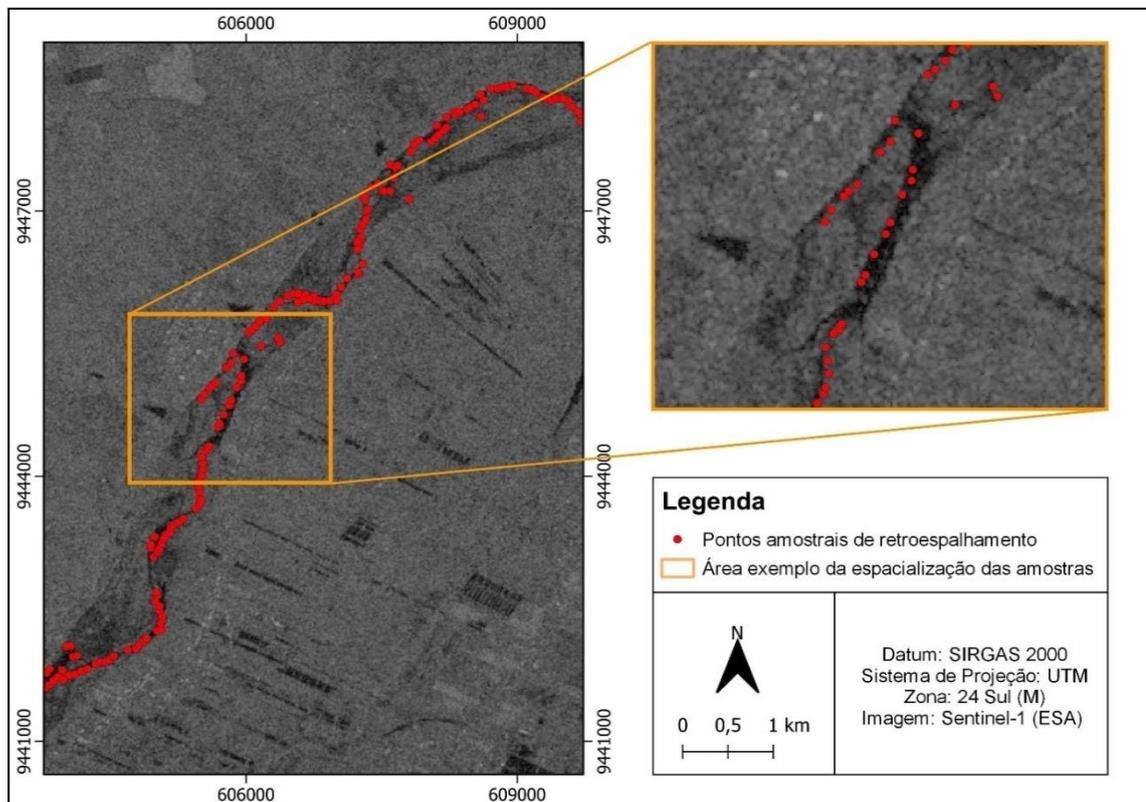
Um total de 80 amostras foram distribuídas na calha principal do Rio Jaguaribe, próximas a interface água/não água. Após a coleta, os pontos foram identificados na imagem Sentinel-1 do dia 19/05/2021 e os valores de Retroespalhamento correspondente a cada amostra foram coletados (Figura 16).

Figura 15 – Pontos coletados na imagem Sentinel-2 para validação do melhor valor de limiar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Espacialização dos pontos coletados na imagem Sentinel-2 na imagem Sentinel-1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 mostra os valores estatísticos (máximo, mínimo, média e desvio padrão) dos valores de Retroespalhamento da água. Os valores mínimo e máximo foram respectivamente: -26,36 dB e -22,25 dB.

Tabela 5 – Valores máximo, mínimo, média e desvio padrão do Retroespalhamento.

Data	25/04/2021
Mínimo	-26,36
Máximo	-22,25
Média	-23,42
Desvio Padrão	1,1605

Fonte: Elaborado pelo autor.

No cenário 2 foi utilizado o método *Threshold* levando em consideração o valor limite que foi utilizado no cenário 1. Através de uma análise visual verificou-se a viabilidade de uso desse limiar na análise individual.

4.5 Identificação das áreas inundáveis

Conforme mostrado no item anterior, a identificação das áreas inundáveis ocorreu de forma temporal (contínua), período seco e chuvoso (sazonal) e data a data (discreta). O que vai definir as áreas inundáveis vai ser o comportamento pulsativo das regiões com um conteúdo de água. Esse comportamento é ditado principalmente pela variável pluviométrica e pode ser observado pelo aumento ou diminuição das áreas com valores de limiar que foram definidos para classificar os corpos hídricos. Então, à medida que os valores pluviométricos aumentam espera-se que as áreas com presença de água aumentem também. A partir de julho com o início do período seco é notório que ocorra a diminuição das áreas cobertas por água.

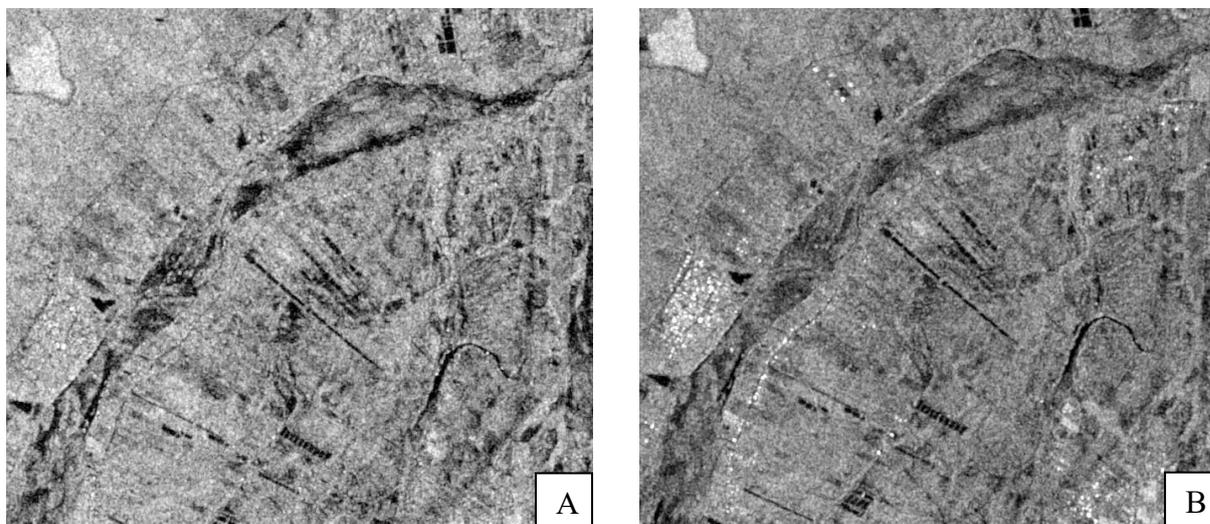
No caso dos cenários I e II, onde o procedimento de classificação será pelo limiar, o êxito do processo de filtragem é importante para a delimitação correta dos pulsos de inundação. Para tal foram atribuídos três valores de limiar e observado aquele que foi capaz de realizar a separação correta dos corpos d'água. Essa delimitação foi realizada através da criação de uma máscara no Google Earth Engine que classifica como água todos os pixels que possuem valor de Retroespalhamento menor que -23 dB.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Polarização

As polarizações VH e VV apresentaram relevantes diferenças em relação ao conteúdo hídrico. Para a escolha da melhor polarização foi necessário levar em consideração a sazonalidade da área estudada. Para o período chuvoso observou-se que a polarização VH permite uma maior distinção das águas superficiais do que a polarização VV. A polarização VV é mais sensível as mudanças. A Figura 17 apresenta duas imagens do início do período chuvoso (maio/2021) correspondente as polarizações VH e VV. Quando a polarização de retorno é horizontal a interação com o conteúdo hídrico, que se encontra mais raso e com presença de sedimentos, é do tipo especular ocasionando uma maior discriminação das feições úmidas.

Figura 17 – Imagem Sentinel-1 período chuvoso (maio/2021): (a) Polarização VH; (b) Polarização VV.

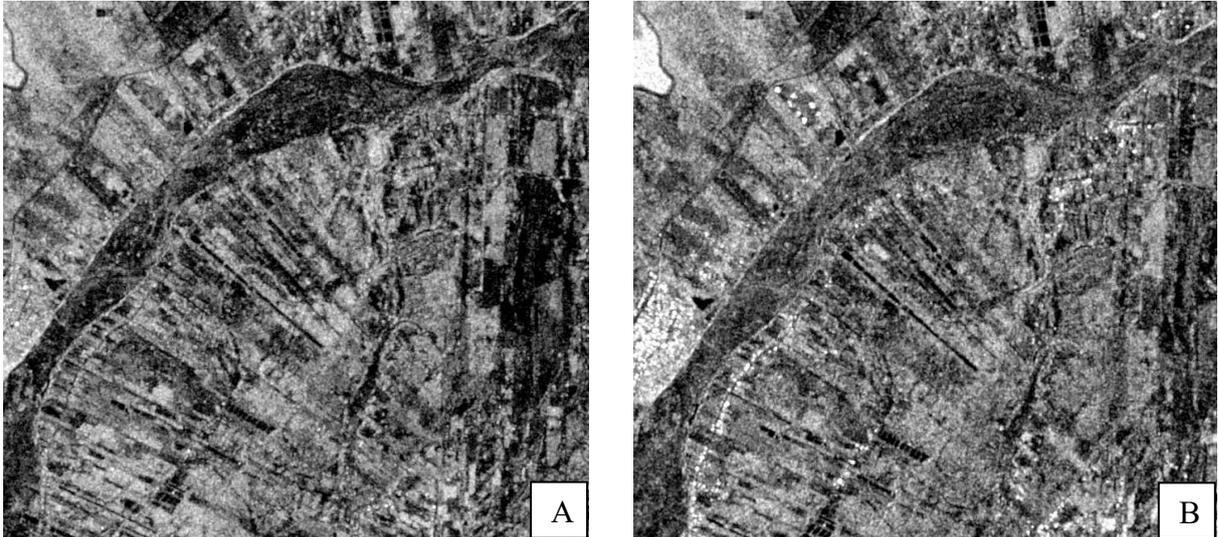


Fonte: Elaborado pelo autor.

No período seco observou-se que muitos alvos diferentes de água apresentaram também comportamento especular. Os bancos de areia presentes no Rio Jaguaribe no período seco confundem-se com os corpos d'água por apresentarem um baixo retorno de sinal. Esse comportamento pode gerar uma confusão na identificação dessas duas classes. A Figura 18 mostra as duas polarizações (VH e VV) no período seco (novembro/2021). Na imagem com a polarização VH (Figura 18A) pode-se observar uma grande quantidade de alvos escuros na área do Rio Jaguaribe. Esses alvos representam tanto os corpos hídricos com os bancos de areia. Na

imagem com a polarização VV (Figura 18B) é possível diferenciar essas duas classes. Isso ocorre por conta da sensibilidade maior que essa polarização apresenta.

Figura 18 - Imagem Sentinel-1 período seco (novembro/2021): (a) Polarização VH; (b) Polarização VV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período chuvoso os bancos de areia do rio ficam cobertos pela vegetação, por isso o Retroespalhamento não ocorre de forma especular e sim de forma difusa (Figura 19).

Figura 19 – Fotografia aérea do dia 05/05/2022 mostrando bancos de areia cobertos por vegetação no período chuvoso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Já no período seco esses bancos de areia ficam descobertos e o Retroespalhamento é do tipo especular (Figura 20). A polarização VH permite uma maior discriminação das áreas não vegetadas do que a polarização VV.

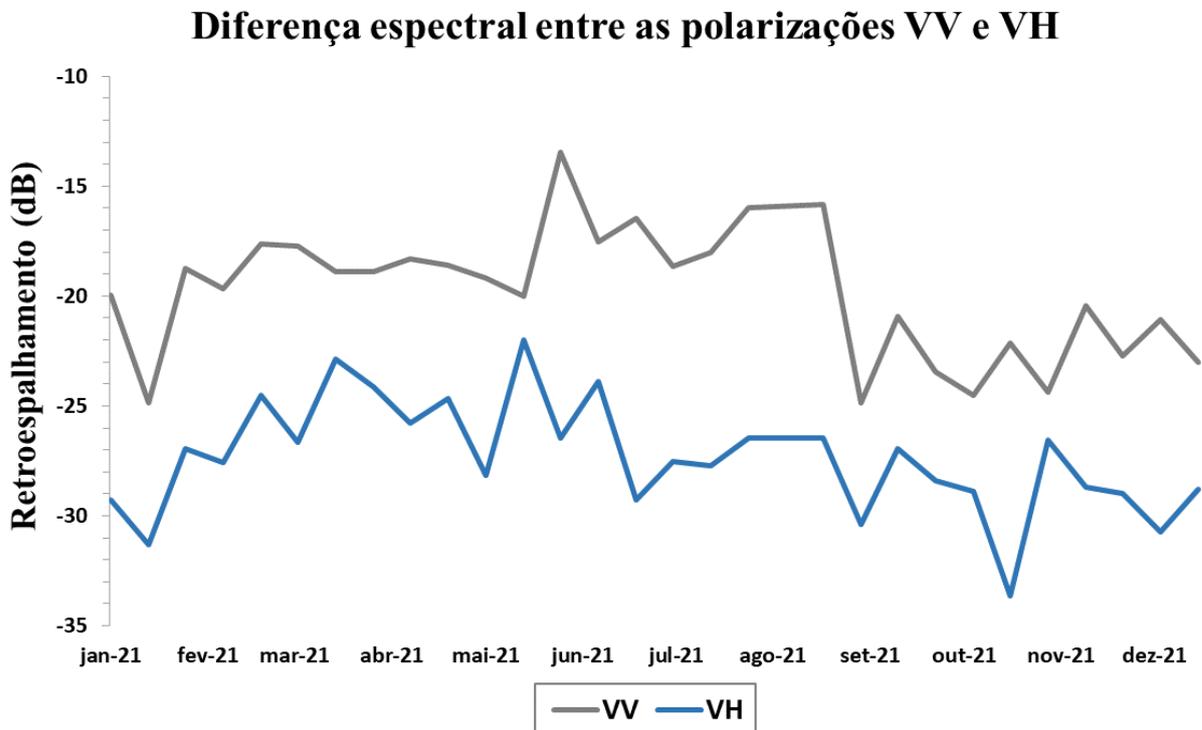
Figura 20 – Bancos de areia descobertos (sem vegetação) no período seco.



Fonte: Google Earth (2021).

A Figura 21 mostra a diferença espectral entre as polarizações VH e VV. A diferença de Retroespalhamento chega a 10 dB para o mesmo *pixel*. Essa diferença no comportamento das feições é explicada pelo tipo de conjunto da polarização utilizada. Por exemplo, na polarização VV, no período chuvoso, os sedimentos existentes na água são mais visíveis. Isso acontece por conta do Retroespalhamento em polarizações paralelas (HH ou VV) serem mais fortes que em polarizações cruzadas (HV ou VH) (LEWIS *et al.*, 1998). Para este estudo as imagens com polarização VH foram utilizadas para o período chuvoso e as imagens com polarização VV para o período seco.

Figura 21 – Diferença espectral entre as polarizações VV e VH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Tratamento de ruídos (Filtro)

Para o tratamento de ruídos no cubo multitemporal, a utilização do Redutor Média se mostrou bastante satisfatória. Essa operação foi realizada calculando-se a média de todos os valores em cada pixel da pilha de imagens (Figura 22B).

Na Figura 22 pode-se notar o aspecto sem ruídos da imagem, evidenciando melhor as feições úmidas. Para efeito de validação do processo de filtragem do GEE, foi realizada uma comparação visual com uma técnica bastante utilizada na literatura, a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) (GREEN *et al.*, 1988). A técnica MNF é um método análogo à Análise de Principais Componentes (APC) que diminui a dimensionalidade dos dados e ordena as componentes em termos de qualidade de imagem, melhorando a relação sinal-ruído (Figura 22A) (RAJENDRAN *et al.*, 2016; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2014; MACIEL, 2012; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2002).

Figura 22 – Comparação visual e qualitativa da redução de ruídos entre as técnicas: (a) MNF e (b) redutor média do GEE.



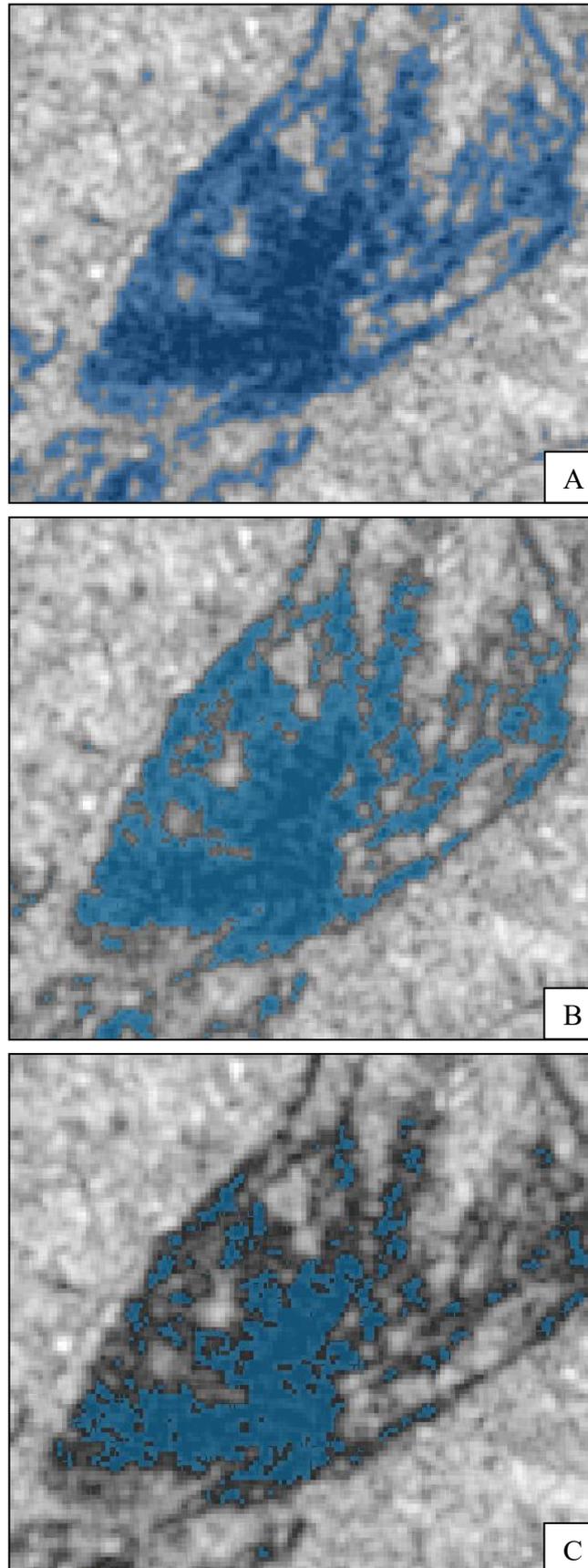
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Valor de Limiar

Para a classificação sazonal para o ano de 2021, a escolha do limiar que melhor representa os alvos com conteúdo hídrico é bastante relevante para o sucesso do processo. A escolha do limiar ocorreu baseada numa verificação comparativa com dados de imagem do satélite Sentinel-2. Após a identificação desse limiar foi feita uma verificação visual por tentativa e erro entre os valores próximos ao valor encontrado que foi de -24 dB. De acordo com a literatura consultada a água aberta possui um Retroespalhamento de até -20 dB (JENSEN 2009; MORAES NOVO, 2010).

A partir da tentativa e erro foram definidos três limiares que identificavam água aberta (-23 dB, -24 dB e -25 dB). Os três limiares apresentaram diferenças entre si o que foi decisivo para a escolha do limiar mais adequado. Essas diferenças podem ser notadas na Figura 23. O maior valor de limiar (-23 dB) superestima as áreas inundáveis, ou seja, inclui aquelas regiões que possivelmente encontravam-se úmidas no momento da passagem do sensor. Já o limiar -25 dB subestima áreas alagadas não sendo compatível para o objetivo dessa pesquisa. Desta forma, confirmou-se o que foi observado na comparação com a imagem óptica. O limiar -23 dB foi o que melhor resguarda alvos inundáveis (Figura 23).

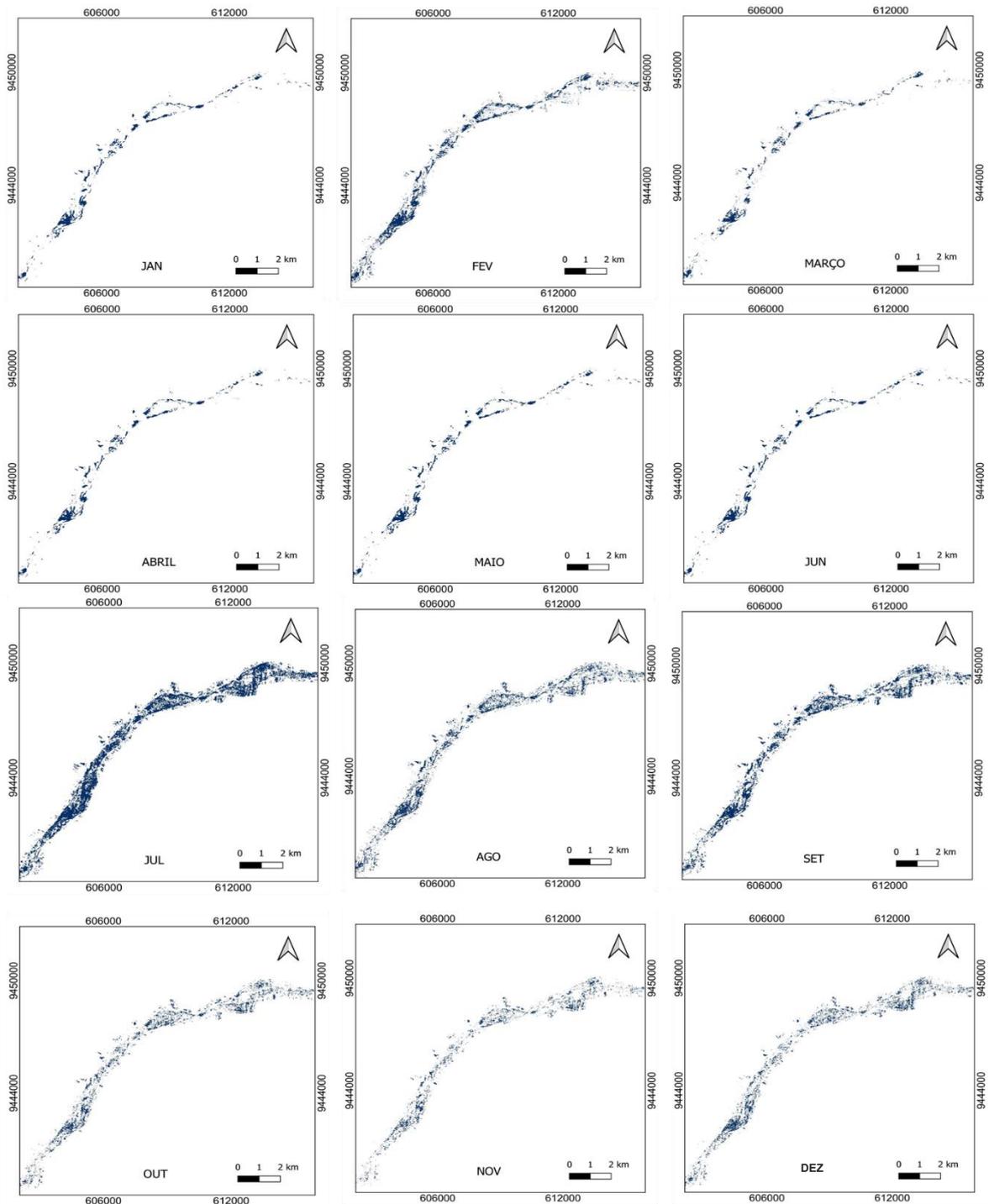
Figura 23 – Diferença visual entre os valores de limiar: (a) -23 dB, (b) -24 dB e (c) -25 dB.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 24 conta com a imagem das médias simples da área ocupada pela classe água, em hectares, de cada mês, evidenciando o comportamento pulsante da água sobre a área de estudo, delimitando visualmente a sua extensão ao longo no ano e caracterizando, por fim, esta porção do Baixo Jaguaribe e suas áreas inundáveis.

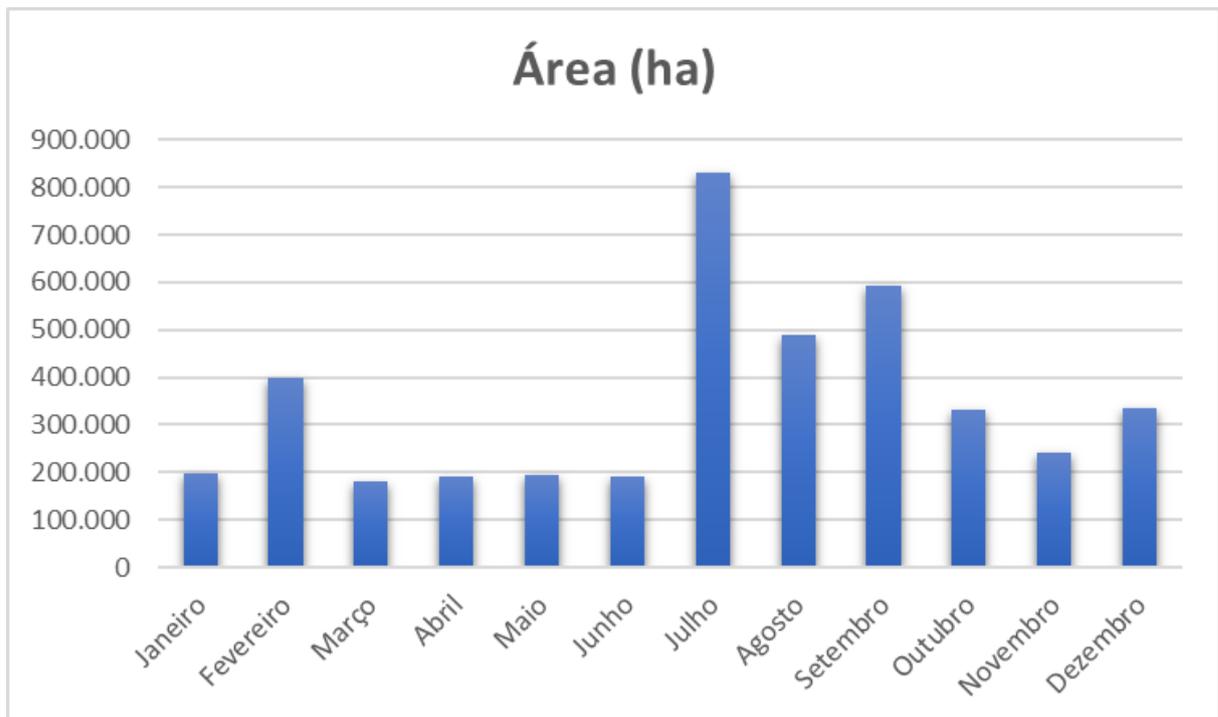
Figura 24 – Média dos meses classificados pelo limiar de -23 dB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 25 demonstra o gráfico temporal da classe água ao longo do ano de 2021, observa-se o comportamento comum da região. O período de cheia tem seu pico no mês de julho e término em setembro. Alguns dias registraram valores fora da normalidade, como verificado no mês de fevereiro. Este aumento considerável pode ter sido responsável pelos valores registrados nas imagens de 31 de janeiro e 12 de fevereiro. É necessária uma avaliação mais profunda para entender os motivos desses valores de forma isolada.

Figura 25 – Distribuição em gráfico da área coberta pela classe água ao longo de 2021.



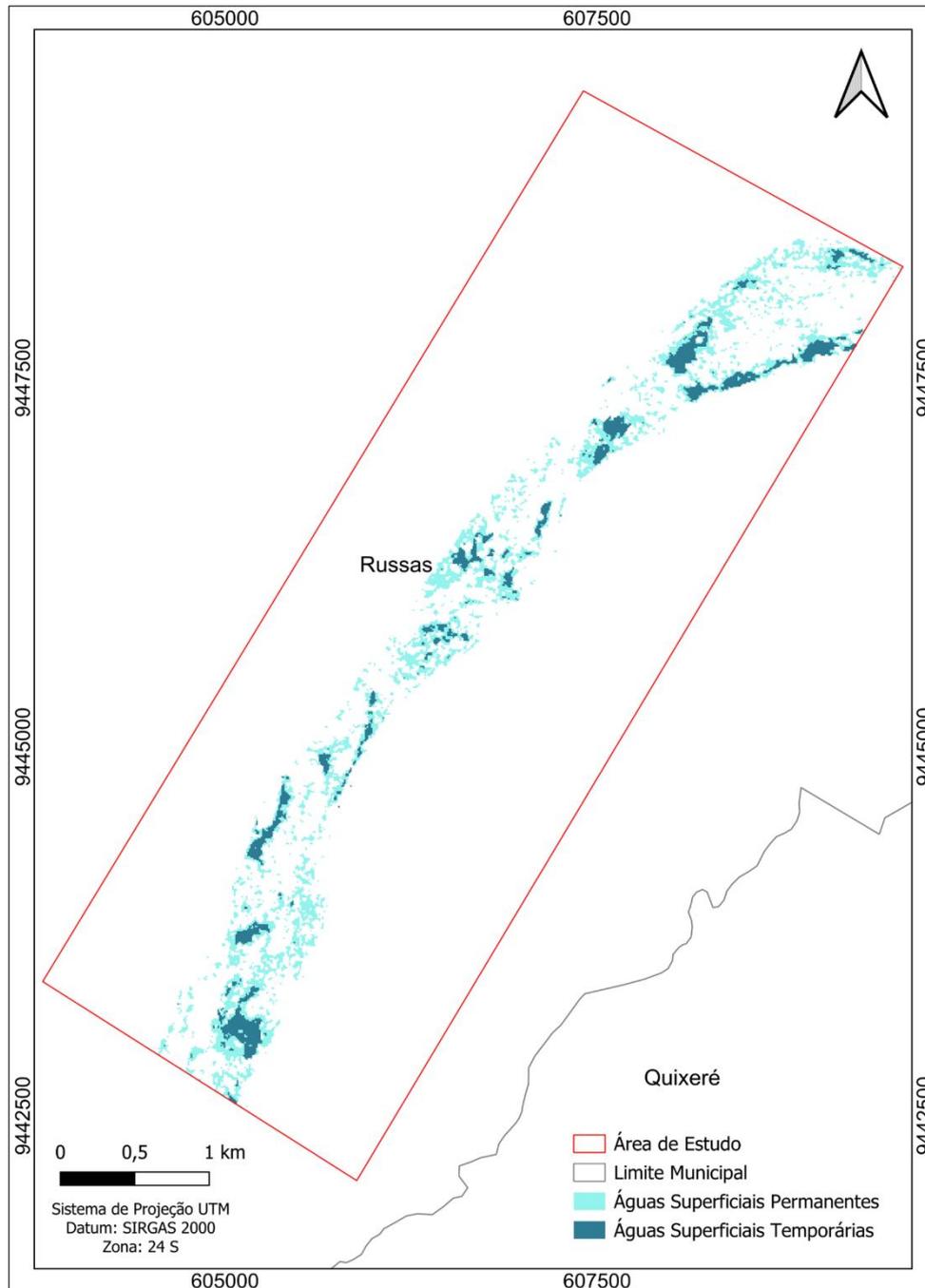
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise multitemporal para o ano de 2021 demonstra a correlação entre os valores das cotas e a variação espacial do rio. Existe uma relação diretamente proporcional entre essas duas variáveis. Observa-se uma extensão maior da área inundada na imagem do mês de julho quando a cota do rio foi de 190 cm.

A classificação temporal ou sazonal das áreas inundáveis, representa o comportamento da classe ao longo do ano (Figura 26), demonstrando uma significativa extensão de áreas inundadas durante o período analisado. A área ocupada pelas águas no período de cheia foi de 831.930 ha e no período seco foi 241.080 ha. Aproximadamente 60% da área do leito do rio ficou exposta no período seco. Através dos dados gerados foi possível ter uma estimativa real da distribuição espacial das áreas inundáveis. Em azul escuro temos

aquelas regiões nas quais ocorrem pulsos de inundação. Podemos chamar também de águas superficiais temporárias, pois permanecem alagadas em determinados períodos do ano. E em azul claro aquelas regiões que permanecem alagadas por quase o ano todo.

Figura 26 – Diferença do nível do Rio Jaguaribe entre os períodos de seca e cheia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com um certo nível de tratamento prévio, as imagens adquiridas do modo GRD ainda apresentam uma quantidade considerável de ruído *Speckle* que encobre muitas

feições da imagem que pode ser resolvida com as técnicas de filtragem. Como esses dados já receberam um certo tratamento, não foi preciso realizar um ajuste mais complexo nos parâmetros básicos da média. Deste modo, os parâmetros utilizados já apresentam excelentes resultados.

Ao classificar as imagens data a data, observa-se que a data em que ocorreu o maior volume de pixels com elevado conteúdo hídrico foi na imagem do mês de julho no qual a maior cota fluviométrica foi de 190 cm sendo considerado o mês de maior cheia. O mês com maior seca foi o mês de novembro com cota de 70 cm.

5.4 Impactos socioeconômicos e ambientais

As áreas inundáveis ficam submersas em períodos de chuvas intensas ou cheias de rios e desempenham um papel importante na regulação do ciclo hidrológico, na manutenção da biodiversidade e na proteção contra inundações. No entanto, essas áreas são alvo de ocupação humana, principalmente para uso urbano e agrícola. A urbanização, por exemplo, pode resultar em mudanças na capacidade do solo em absorver e reter a água, aumentando a eficiência e a quantidade de escoamento superficial, o que pode levar a enchentes e inundações.

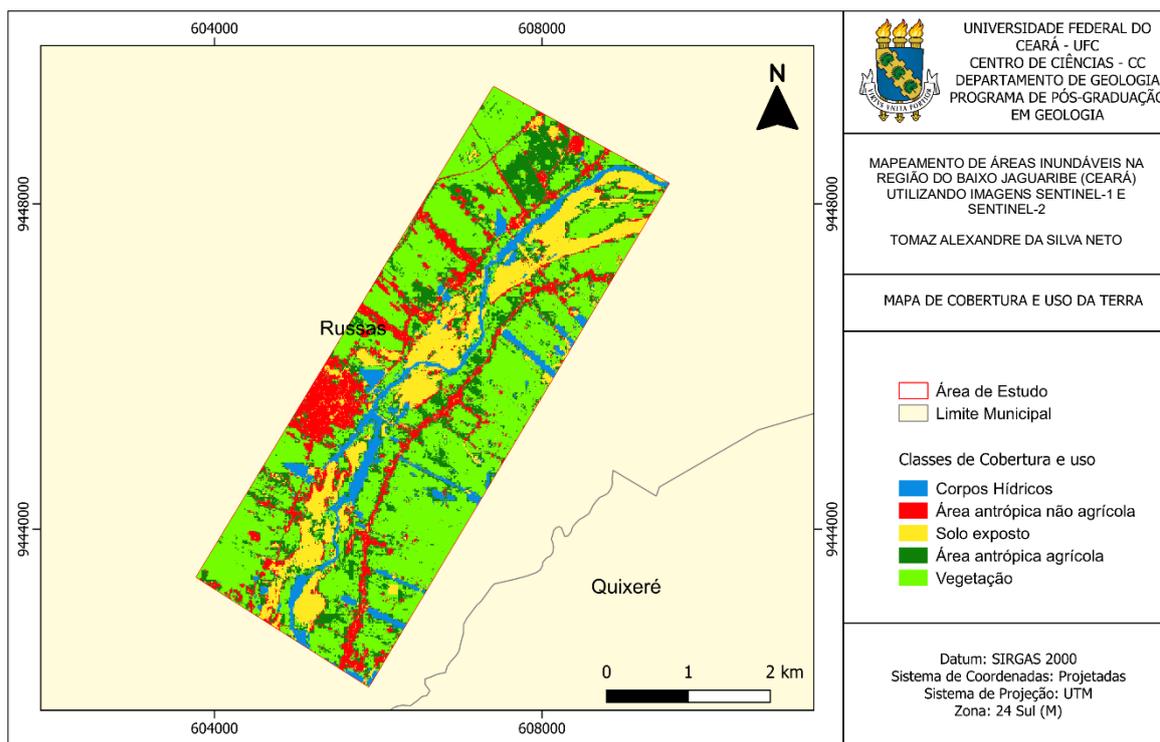
Além disso, o desmatamento e a substituição de áreas naturais por culturas agrícolas ou pastagens podem reduzir a capacidade do solo em reter água, aumentando o fluxo do solo. Por isso, é importante considerar a relação entre áreas inundáveis e uso e cobertura do solo na gestão territorial. É preciso buscar um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação das áreas naturais, garantindo a sustentabilidade ambiental e a segurança da população em relação a eventos climáticos extremos.

O mapa de Cobertura e uso da terra é uma ferramenta essencial para a identificação e mapeamento das áreas inundáveis, pois permite identificar áreas de vegetação natural, que possuem maior capacidade de absorção e retenção de água, assim como as áreas urbanas, que apresentam menor capacidade de infiltração e maior escoamento superficial.

A partir dessas informações é possível elaborar estratégias de gestão territorial que visam minimizar os riscos de ocorrência de eventos extremos, como ações de conservação de áreas naturais, zoneamento urbano adequado, instalação de sistema de drenagem e monitoramento das áreas de risco.

O mapa de Cobertura e uso da terra está apresentado na Figura 27. Para possibilitar uma análise quantitativa, os dados métricos das classes foram demonstrados na Tabela 6.

Figura 27 – Mapa de uso e cobertura da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Classes de uso e cobertura do solo e suas respectivas áreas.

Uso	Área (ha)	Área (%)
Corpo hídricos	131,09	7,43
Ocupação antrópica	226,30	12,82
Solo exposto	237,81	13,47
Área agrícola	304,53	17,26
Vegetação	864,94	49,02
Total	1.764,50	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 27 e da Tabela 6, pode-se observar que na área em questão existe o predomínio da classe vegetação (regiões que ainda não foram utilizadas para agricultura ou ocupação urbana). Essa classe foi a que apresentou maior percentual representando quase 50% da área total.

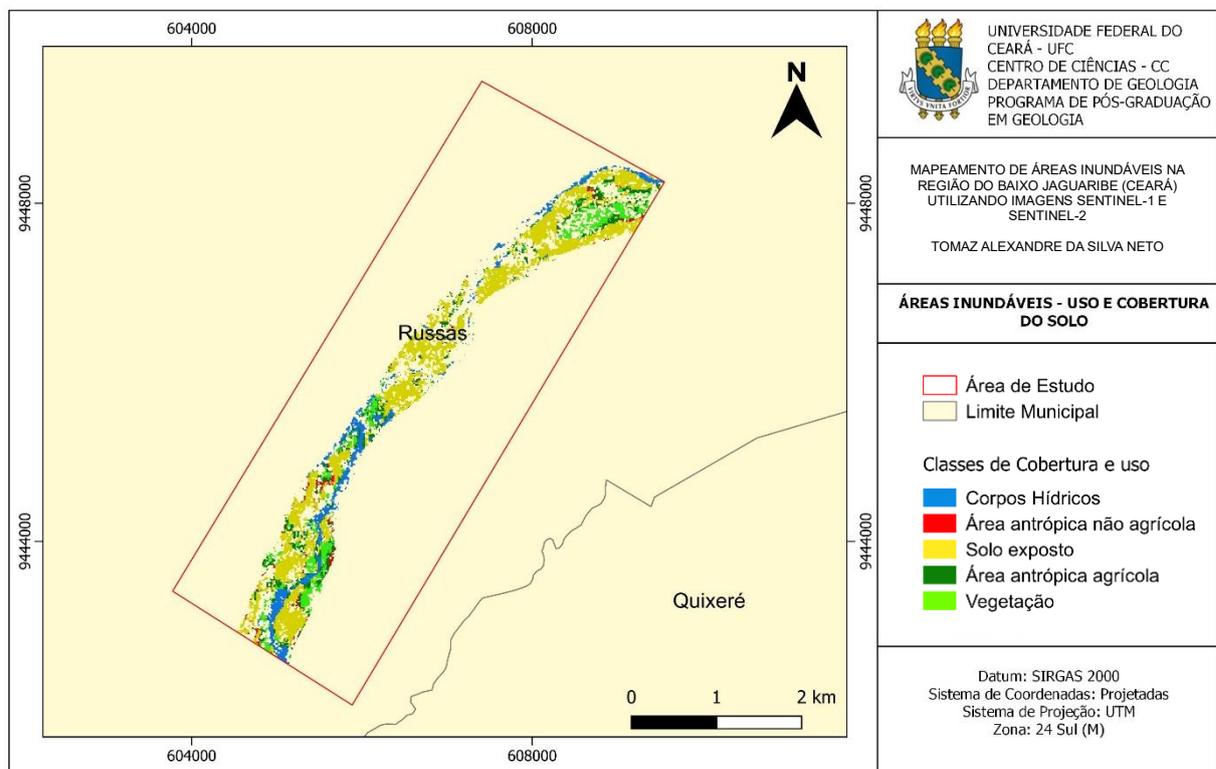
As regiões identificadas como áreas agrícolas correspondem a 17,26% da área. Esse setor consome bastante água, além de gerar outras formas de degradação dos recursos hídricos, como o uso intensivo do solo, aliado a um manejo inadequado, potencializando processo de erosão e assoreamento dos cursos d'água, além do uso de agrotóxicos de maneira irregular.

Observa-se que essa área é predominantemente rural, pois as ocupações não ocupam mais que 13% de toda superfície. Apesar disso, percebe-se uma tendência à expansão dessas áreas urbanas principalmente na margem direita do rio Jaguaribe, no qual existe uma mancha em crescimento. Esse crescimento está associado à substituição de ambientes naturais por ambientes construídos, onde realiza-se o direcionamento das águas pluviais e dos esgotos para os corpos hídricos adjacentes. Essa substituição diminui a capacidade de infiltração dos solos, aumentando o escoamento superficial, além disso, os corpos d'água tornam-se receptores de grandes cargas de poluentes, o que compromete sua qualidade.

É importante ressaltar que os tipos de uso do solo podem influenciar diretamente na qualidade e na quantidade dos recursos hídricos, seja pelo alto consumo de água associado às culturas agrícolas, seja pela possível diminuição da precipitação anual média ou até mesmo pela expansão da malha urbana gerando a impermeabilização dos solos, a geração de efluentes domésticos e sua descarga nos recursos hídricos. Desta forma é importante o uso consciente dessas áreas para que não comprometa ainda mais os recursos hídricos.

A Figura 28 mostra as classes de uso e ocupação correspondentes a área de inundação no período chuvoso.

Figura 28 – Classe de uso e ocupação correspondentes a área de inundação no período chuvoso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 mostra a área e a porcentagem das classes de Cobertura e Uso da Terra nas áreas inundáveis do período chuvoso do ano de 2021 (maior cheia). Essas informações são de relevante importância para o planejamento e fiscalização dessas regiões. Para o ano de 2021 as áreas de inundação no período de cheia atingiu aproximadamente 3% da classe ocupação antrópica. Essa informação pode auxiliar, por exemplo, os órgãos responsáveis na tomada de decisão para evitar risco e auxilia no planejamento para disponibilização de recursos para reparação de danos.

Tabela 7 – Área das classes de uso e cobertura do solo correspondentes as áreas inundáveis.

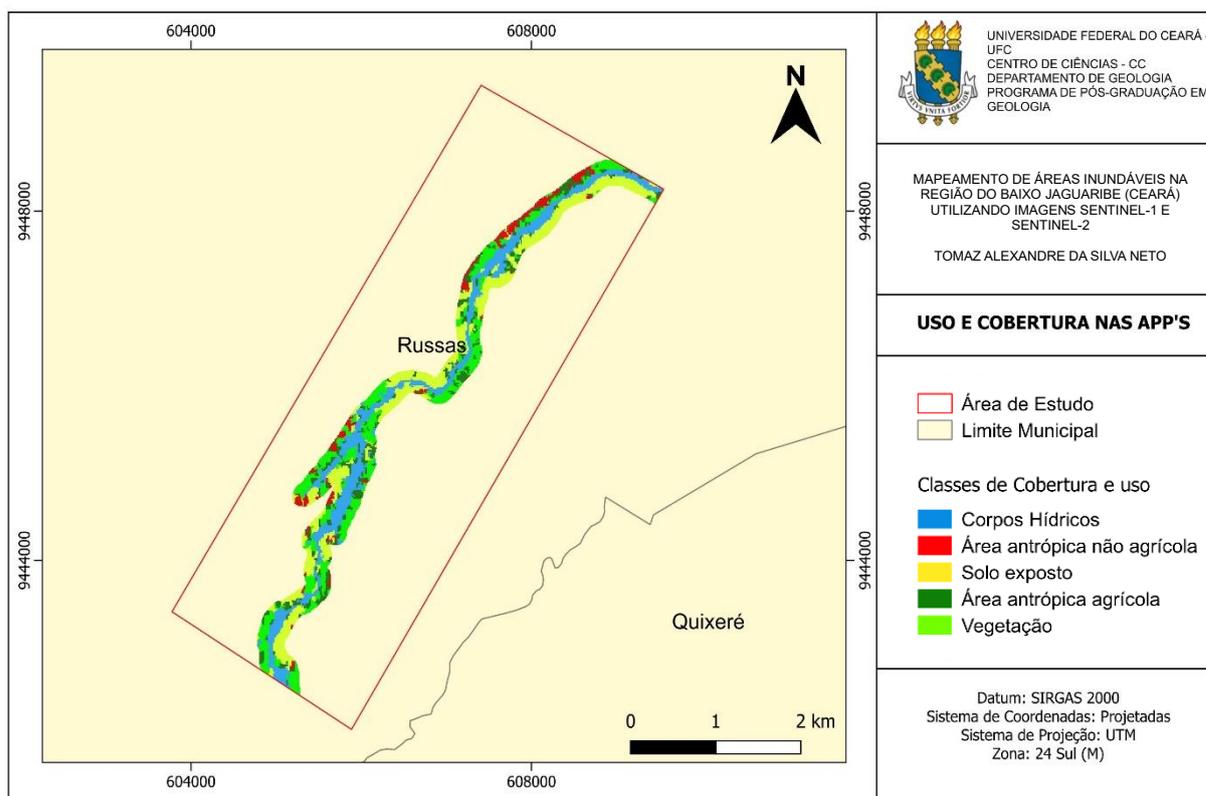
Uso	Área (ha)	Área (%)
Corpo hídricos	35,43	14,30
Ocupação antrópica	6,49	2,62
Solo exposto	141,04	56,95
Área agrícola	31,32	12,64
Vegetação	33,39	13,49
Total	247,67	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um dos problemas socioambientais de maior relevância na área de estudo está relacionado à degradação e aos usos irregulares das APP e das áreas inundáveis do rio Jaguaribe. As formas de uso do solo vêm comprometendo de forma intensa a integridade das áreas de APP, especialmente nas regiões dentro ou próximas a ocupação antrópica, onde ficam evidentes os conflitos existentes em relação a aplicação dos limites e preservação dessas áreas. Esse problema decorre principalmente das intervenções antrópicas e a falta de fiscalização ambiental.

As áreas de APP juntas representam um total de 300,68 ha, o que corresponde a 17% da área total. Para compreender a situação atual das APP, o limite das APP foi extraído do mapa de uso e cobertura do solo considerando o leito regular do rio, conforme demonstrado na Figura 29. Para facilitar a análise quantitativa, calculou-se a área de cada classe de uso nas Áreas de Preservação Permanente, conforme demonstrado na Tabela 8.

Figura 29 – Uso e cobertura do solo nas APP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Classes de uso e cobertura identificadas nas APP da área de estudo.

Classe de Uso	Área (ha)	Área (%)
Corpos Hídricos	81,49	27,11
Ocupação antrópica	17,79	5,91
Solo exposto	89,11	29,63
Área agrícola	39,49	13,14
Vegetação	72,80	24,21
Total	300,68	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A vegetação, o solo exposto e os corpos hídricos ocupam maior parte das APP, correspondendo a 81% do total de APP. Em segundo lugar estão os cultivos agrícolas, identificados principalmente na região próxima ao leito do rio. Após identificar os usos nas APP foi realizada uma classificação para a definição do melhor tipo de gerenciamento a ser adotado pelos órgãos responsáveis.

Para os tipos de uso Recursos Hídricos e Área Agrícola o tipo de gerenciamento a ser adotado é o de Eliminação e/ou redução dos riscos. Dentro desse tipo de uso são realizadas atividades econômicas (aquicultura e cultivo) que geram impactos ambientais e necessitam de fiscalização. Para os usos solo exposto e vegetação, o ideal é evitar a formação de novas áreas de risco. É necessária uma fiscalização para evitar a extração ilegal e excessiva de areia do leito do rio e o desmatamento da mata ciliar. Por fim, para a classe Ocupação Antrópica é necessário desenvolver a convivência com os riscos presentes através da elaboração e operação de planos preventivos de defesa civil, envolvendo um conjunto de ações coordenadas.

A definição das áreas mais suscetíveis aos impactos teve em vista a análise conjunta da classificação de uso e cobertura do solo, análise visual das imagens Sentinel-2 e o levantamento pontual de impactos ambientais identificados *in loco*. Consideraram-se como críticas as áreas degradadas adjacentes e correspondentes a APP, onde a classificação digital apontou conflitos com a legislação ambiental (Código Florestal): solo exposto, ocupação antrópica, atividades de carcinicultura e agricultura, onde deveria estar presente a mata ciliar.

Os principais impactos negativos de origem antrópica identificados nas áreas de APP na área de estudo foram: disposição de resíduos sólidos diversos (plásticos, pneus, resíduos da construção civil e de demolição, latas de tintas, papéis), presença de bovinos/ equinos, lançamento de efluentes domésticos e industriais, ausência de dissipadores fluviais, assoreamento do rio e pesca.

Uma outra questão que deve ser observada é a delimitação das Áreas de Proteção Permanente (APP) de rios conforme a Lei nº 4.771/65 (antigo Código Florestal) que se baseava na largura do nível mais alto do rio em faixa marginal, ou seja, no seu leito maior periódico ou sazonal que é aquele que regularmente é ocupado pelas cheias, pelo menos uma vez cada ano. A Lei Nº 12. 651, de maio de 2012, altera a delimitação das APP das margens dos rios, que passa a ser contabilizada a partir do leito regular do rio. O leito regular é entendido como sendo o canal por onde correm regularmente as águas de seu durante o ano.

Para os rios semiáridos esta mudança reduz significativamente suas APP, pois o leito regular apresenta um tamanho consideravelmente menor em relação ao leito maior, além do que em alguns casos a APP do rio poderá ficar dentro do canal maior, dependendo da localização do leito regular dentro deste. Sugere-se que os órgãos ambientais contabilizem as áreas de APP a partir da largura do nível mais alto do rio. Desta forma, fica garantido que áreas de relevantes importância para a dinâmica hidrológica sejam preservadas.

6 CONCLUSÃO

A delimitação e o mapeamento de áreas inundáveis na região do Baixo Jaguaribe, a partir do processamento das imagens de satélite da constelação Sentinel-1, no ambiente da Plataforma Google Earth Engine, mostrou-se bastante satisfatória e promissora, pois permitiu atingir o objetivo proposto nesta pesquisa, sem a utilização de um equipamento robusto.

O método de filtragem, utilizado no GEE, de redução de ruídos pela média, mostrou-se bastante eficiente na melhoria da razão sinal/ruído. Para fins comparativos, o método MNF auxiliou na validação das respostas obtidas, gerando resultados similares. Para a escolha do melhor valor de limiar para separação da interface água/não água foram analisadas imagens do satélite Sentinel-2 baseada nas cotas fluviométricas adquiridas através do site da ANA para validar a presença dos corpos hídricos. O uso dessas informações garantiu uma maior precisão na delimitação do valor de limiar mais adequado para a identificação dos corpos hídricos.

Para o mapeamento das áreas inundáveis na região do Baixo Jaguaribe, utilizando RADAR, percebeu-se a falta de uma padronização quanto ao processamento dessas imagens, isto principalmente em função da presença do ruído *speckle*. O processo de redução do ruído dependerá principalmente da finalidade do estudo, dessa forma, para a região de estudo, a aparência granular da imagem pode gerar pontos considerados como inundação/alagamento que não passam de ruído. Apesar dessa condição, as imagens de radar apresentam uma boa saída para o mapeamento das áreas alagadas e inundadas em rios no semiárido.

Além do ruído, deve ser levada em consideração a interpretação da máscara que apresenta resposta similar entre corpos d'água e solo exposto. Isto se deve à baixa rugosidade de ambas as feições quando comparadas ao seu entorno. No entanto, são necessárias mais informações locais que possam confirmar essa resposta na máscara de inundação. A escolha do limiar talvez possa apresentar critérios mais definidos após uma análise temporal exaustiva de imagens locais, pois pequenas variações adotadas acarretam diferenças de áreas consideradas, ou não, alagadas. Porém, o método adotado apresenta uma boa resposta qualitativa, no qual se verifica lugares de maior ou menor incidência de alagamentos. É importante levar em consideração os períodos seco e chuvoso, característica inerente aos rios no semiárido, pois existem diferenças significativas dos alvos para cada período.

No mês de julho, observou-se que ocorreu o maior volume de *pixels* com elevado conteúdo hídrico, cuja maior cota pluviométrica foi de 190 cm sendo considerado o mês de maior cheia. Por outro lado, o período mais seco ocorreu no mês de novembro com cota de 70

cm. Logo teve uma diferença significativa, na qual ocorreu um aumento de 57,7% das áreas inundadas entre a imagem com maior e menor cota fluviométrica.

Ficou evidente o potencial das imagens Sentinel-1 para mapeamento de corpos hídricos, pois apresentam uma resposta específica que pode ser facilmente identificada. Outro fator que facilita no mapeamento, é ausência de vegetação densa e alta que possa mascarar esses alvos. Essas características podem ser usadas para monitoramento da expansão da aquicultura, que é uma atividade bastante desenvolvida na região.

As imagens Sentinel-1 em função da sua resolução espacial e temporal apresentam grande potencial para esta lacuna que é o monitoramento remoto das áreas de inundação, os quais vem sendo feitos, em sua maioria, por imagens multiespectrais no visível, infravermelho próximo e médio. A grande dificuldade da forma atual é a cobertura de nuvens, uma vez que eventos de inundação normalmente estão associados a grandes precipitações e consequentemente a uma densa cobertura de nuvens, além disso, em função de sistemas de drenagem planejados, as lâminas de água formadas são muito mais efêmeras do que as inundações em planícies naturais de inundação. Essa efemeridade implica no desaparecimento das lâminas de água antes da revisita dos sensores em um dia com menor cobertura de nuvens.

Portanto, sugere-se a continuação da investigação do correto uso das imagens RADAR, do programa Sentinel 1, como ferramenta para o mapeamento das áreas inundáveis através de análise e escolha de limiares de separação da classe de água em unidades comparáveis para diferentes imagens a fim de padronizar o método para regiões semiáridas.

As áreas inundáveis da região são importantes para o equilíbrio ecológico do ambiente e devem ser preservadas principalmente por serem áreas atrativas para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas. O uso de séries temporais de imagens ajuda na análise do comportamento dos alvos ao longo do tempo permitindo o monitoramento da dinâmica sazonal e sua relação com os ecossistemas vizinhos. Além de ser uma medida mitigadora permitindo o desenvolvimento de ações que visem restaurar e conservar esses ambientes.

A gestão dos recursos hídricos da região é um tema crucial para garantir a segurança hídrica da população e o desenvolvimento socioeconômico sustentável da região. No contexto do Rio Jaguaribe, que é uma importante fonte hídrica para o estado do Ceará, a sua gestão e monitoramento do uso e cobertura do solo são de extrema importância na preservação das áreas inundáveis. O uso do RADAR fornece informações importantes que podem ser usadas para gerir esses recursos. Com a identificação precisa das áreas propensas a inundações, é possível tomar medidas preventivas e de mitigação, como a construção de infraestrutura para o controle

de cheias, o desenvolvimento de planos de evacuação e implementação de programas de gestão integrada de recursos hídricos. Além de contribuir na elaboração de políticas públicas que visem, por exemplo, uma identificação de áreas prioritárias para a implementação de práticas de conservação do solo e de recuperação de áreas degradadas pode ajudar a reduzir o impacto das inundações e melhorar a qualidade da água do Rio Jaguaribe.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.S., COTA, A.L.S., RODRIGUES, D.F., 2020. Saneamento, Arboviroses e Determinantes Ambientais: impactos na saúde urbana. **Revista Ciência & Saúde Coletiva** 25(10). 3857-3868.
- AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326–5350, 2020.
- AYTEKIN, O.; KOC, M.; ULUSOY, I. Local primitive pattern for the classification of SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.51, p.2431–2441. 2013.
- BARGIEI D., HERRMANN S. Multi-temporal land-cover classification of agricultural areas in two European regions with high resolution spotlight Terra SAR-X data. **Remote Sensing**, v. 3, n. 5, p. 859-877, 2011. DOI: 10.3390/rs3050859
- BARTSCH, A.; WAGNER, W.; SCIPAL, K.; PATHE, C.; SABEL, D.; WOLSKI, P. Global monitoring of wetlands – the value of ENVISAT ASAR **Global mode**. **J. Environ. Manage.** v. 90(7) p.2226-33, 2009.
- BELGIU, M; DRĂGUȚ, L. Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 24-31, 2016.
- BETBEDER, J.; RAPINEL, S.; CORGNE, S.; POTTIER, E.; HUBERT-MOY, L. TerraSAR-X dual-pol time-series for mapping of wetland vegetation. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.**, v.107, p.90–98. 2015.
- BORGES, F. O.; FERREIRA, V. De O. Planícies de inundação e áreas inundáveis: análise comparativa dos conceitos mediante aplicação nas bacias hidrográficas do ribeirão Bom Jardim e rio das Pedras, Triângulo Mineiro. **Revista Cerrados**, v. 17, n. 01, p. 114–130, 30 abr. 2019.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Institui o novo código florestal brasileiro**.
- BRASIL. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.
- BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v.45(1), p.5-32. 2001.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSHEN, R.A., and STONE, C.J. Classification and regression trees. **Chapman and Hall**, New York. 1993.
- BRISCO, B., BROWN, R.J. Multidate SAR/TM synergism for crop classification in Western Canada. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 8, p. 1009-1014, 1995.

BRUZZONE, L., MARCONCINI, M., WEGMULLER, U., WIESMANN, A. An advanced system for the automatic classification of multitemporal SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 6, p. 1321-1334, 2004.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; DE CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F. Classificação e Eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20 (1), 2002.

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MACIEL, L.M.M.; DE CARVALHO, A.P.F.; GUIMARÃES, R.F.; SILVA, C.R.; GOMES, R.A.T; SILVA, N.C. Probability Density Components Analysis: A New Approach to Treatment and Classification on SAR Images. **Remote Sensing**, v. 6, p. 2989-3019, 2014. doi: 10.3390/rs6042989.

CHRISTOFOLETTI, A. In GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. org. **Geomorfologia uma Atualização de Bases e Conceitos**. 4ª edição Bertrand Brasil, 2001. Rio de Janeiro.

CIVCO, D., L. Artificial neural networks for land-cover classification and mapping. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 7, n. 2, p. 173-186, 1993.

COSTA, M. P., & TELMER, K. H. Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetland. **Remote sensing of Environment**, v.105(3), p.204-213, 2006.

COSTA, D. H. **Uso de Séries Temporais Sentinel 1 na identificação de Culturas Agrícolas Utilizando Modelos de Machine Learning**, 51 p., (UnB-CDS, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2020).

DA SILVA FILHO, A. S. Inferência em amostras pequenas: Método Bootstrap. **Revista de Ciências exatas e tecnologia**, v. 5, n. 5, p. 115-126, 2015.

DAI, K., LI, Z., TOMÁS, R., LIU, G., YU, B., WANG, X., ... & STOCKAMP, J. Monitoring activity at the Daguang bao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. **Remote Sensing of Environment**, v.186, p.501-513. 2016.

DENG, F., WANG, X., CAI, X., LI, E., JIANG, L., LI, H., & YAN, R. Analysis of the relationship between inundation frequency and wetland vegetation in Dongting Lake using remote sensing data. **Ecohydrology**, v.7(2), p.717-726, 2014.

DI BALDASSARRE, G.; SCHUMANN, G.; BRANDIMARTE, L.; BATES, P. Timely low resolution SAR imagery to support floodplain modelling: a case study review. **Surv. Geophys.**, v. 32, n. 3, p. 255-269, 2011.

ERSAHIN, K., CUMMING, I. G., WARD, R. K. Segmentation and classification on polarimetric SAR data using spectral graph partitioning. **IEEE Trans Geosci Remote Sens.** v.48 (1), p.164-74. 2010.

FENG, J., JIAO, L., ZHANG, X., YANG, D.: Bag-of-Visual-Words Based on Clonal Selection Algorithm for SAR Image Classification. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. 2011.

FERREIRA, G. H. S. **Identificação de áreas inundáveis na porção sul de Roraima com auxílio de imagens de Radar**, 75p. (UnB-GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2018).

FREITAS, C. R.; SANT'ANNA, S. J. S.; RENNÓ, C. D.; CORREIA, A. H. **Utilização de imagens de Radar de abertura sintética na classificação de uso e ocupação do solo**. São José dos Campos: INPE, 2007.

FROTA, S. M. N. **Relação entre área de inundação e cota fluviométrica na sub-bacia do Alto Rio Negro: uma análise baseada em dados de radar (Sentinel-1A)** – Brasília, 2019.

GOU, S., QIAO, X., ZHANG, X., WANG, W., DU, F. An Eigenvalue Analysis Based Approach for POL-SAR Image Classification. **IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing**, v.52, No.2, p. 805-818, 2014.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 26 n. 1, 1988.

HENDERSON, F. M., LEWIS, A. J. Radar detection of wetland ecosystems: a review. **International Journal of Remote Sensing**. v. 29, N. 20, p.5809–5835, 2008.

HEPNER, G.; LOGAN, T., RITTER, N., BRYANT, N. Artificial neural network classification using a minimal training set- Comparison to conventional supervised classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 4, p. 469-473,1990.

HESS, L. L., MELACK, J. M., FILOSO, S., & WANG, Y. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33(4), p.896-904. 1995.

HLAVÁCOVÁ, I., HALOUNOVÁ, L., & STANISLAV, P. SENTINEL-1 Insar Processing of Corner Reflector Information in the Northern-Bohemian Coal Basin. **ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, p.763-767. 2016.

HUANG, W. Y.; LIPPMANN, R., P. Comparisons between neural net and conventional classifiers. In: **IEEE First International Conference on Neural Networks**. p. 485-493. 1987.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia do Estado do Ceará. **Perfil básico municipal de Russas**. 2017. Site: <www.ipece.gov.ce.br>. Acesso em 12/07/2022

JAFARI, M., MAGHSOUDI, Y., ZOEJ, M. J. V. A new method for land cover characterization and classification of polarimetric SAR data using polarimetric signatures. **IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.**, v. 8, n. 7, p. 3595-3607, 2015.

JENSEN, R. J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 598 p. 2009.

KASISCHKE, E.; MELACK, J. and DOBSON, M. The use of radars for ecological applications: a review. **Remote Sens. Environ.**, v. 59, p. 141–156, 1997.

KAYABOL, K., ZERUBIA, J. Unsupervised amplitude and texture classification of SAR images with multinomial latent model. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.22(2), p.561–572, 2013.

LEE, K.J., FREEMAN, M., STELLER, H. Expression of the disconnected gene during development of *Drosophila melanogaster*. **EMBO J.** 10: 817—826, 1991

LEWIS, A. J.; HENDERSON, F.M.; HOLCOMB, D. W. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: F.M. HENDERSON& A.J. LEWIS (eds.). Principles & Applications of Imaging Radar. **Manual of remote sensing**. 3rd ed., .2, John Willey, New York, 1998. p.131 - 181.

LIN, Y., SHEN, M., LIU, B., & YE, Q. Remote Sensing Classification Method of Wetland Based on AN Improved Svm. **ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.1(1), p.179-183. 2013.

MACIEL, L.M.M. **Processamento de imagens ALOS/PALSAR aplicado à regularização fundiária na Amazônia**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília-UnB, Brasília, 2012.

MASJEDI, A., ZOEJ, M. J. V., MAGHSOUDI, Y. Classification of Polarimetric SAR Images Based on Modeling Contextual Information and Using Texture Features. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, Vol. 54, no. 2, 2016.

MALENOVSKÝ, Z., ROTT, H., CIHLAR, J., SCHAEPMAN, M. E., GARCÍA-SANTOS, G., FERNANDES, R., & BERGER, M. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. **Remote Sensing of Environment**, v.120, p.91-101. 2012.

MALNES, E., ECKERSTORFER, M., & VICKERS, H. First Sentinel-1 detections of avalanche debris. **The Cryosphere Discussions**, v.9(2), p.1943-1963. 2015.

MARECHAL, C., POTTIER, E., HUBERT-MOY, L., RAPINEL, S. One year wetland survey investigations from quad-pol RADARSAT-2 time-series SAR images. **Can. J. Remote Sensing**, v. 38, n. 3, p. 240_252, 2012.

MASJEDI, A., ZOEJ, M. J. V., MAGHSOUDI, Y. Classification of Polarimetric SAR Images Based on Modeling Contextual Information and Using Texture Features. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, Vol. 54, no. 2, 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, p. 241–252, 2011.

MESQUITA, F. N. **Mapeamento das áreas inundáveis do Médio São Francisco utilizando técnicas de processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto e modelo HAND**. p.43. (UnB-IH-GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2019).

MENDES, L. S. A. S.; SILVA NETO T. A.; SOUSA, J. S. F. O; SILVA NETO, C. A.; VASCONCELOS, M. B.; SALGUEIRO, A. R. G. N. L.; BRAGA, E. A. S.; GIRÃO, F. A. L. Diagnóstico da oferta hídrica do município de Russas (CE): Uma análise descritiva como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1612, 20 jul. 2021.

MENESES, P., R; SANO, E., E. **Sensor Radar de abertura sintética**. IN: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 2011.

MORAES NOVO, E. M. L. de. Fundamentos e Aplicações de Radar no Estudo de Áreas Alagáveis. IN: DE SOUZA, R. B. (Ed.). **Oceanografia por satélites**. Oficina de Textos. 2009.

MORAES NOVO, Evlyn Márcia Leão de. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª Edição-São Paulo, Blucher, 363p. 2010.

NIKOLAKOPOULOS, K., KYRIOU, A. Preliminary results of using Sentinel-1 SAR data for DSM generation. **European Journal of Geography**, v.6, n.3, p.52 -68, September 2015.

OLIVEIRA, G. G. DE . **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do Rio Caí, RS**. 2010. Dissertação—Universidade Federal do Rio Grande do Sul : [s.n.].

OLIVER, C., & QUEGAN, S. **Understanding synthetic aperture radar images**, 1st ed MA: Artech House, Inc. 478 pp. 2004.

OZESMI, S. L., BAUER, M. E. Satellite remote sensing of wetlands. **Wetlands Ecology and Management**, v.10, p.381–402, 2002.

PANTALENA, A. F., PARENTE, M. L. Marcas da ação antrópica na história ambiental do Rio Jaguaribe, Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management** [en linea]. 2014, 14(3), 459-469

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., & KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo, Oficina de Textos. 2ª ed. 2015.

RAJENDRAN, S.; AL-SAYIGH, A.R.; AL-AWADHI, T. Vegetation analysis study in and around Sultan Qaboos University, Oman, using Geoeye-1 satellite data. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 19, p. 297-311, 2016.

RONDEAU GENESSE, G., TRUDEL, M., & LECONTE, R. Monitoring snow wetness in na Alpine Basin using combined C-band SAR and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v.183, p.304-317. 2016.

SCHUMANN, G. J.-P.; MOLLER, D. K. Microwave remote sensing of flood inundation. **Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C**, v. 83, p. 84-95, 2015.

SERVELLO, E. L., SANO, E. E., & PANTOJA, N. V. Sentinel-1 SAR:efeito de filtros espaciais no estudo do uso do solo amazônico. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, INPE, 25 a 29 de abril de 2015.

SHITOLE, S., SHARMA, M., De, S., BHATTACHARYA, A., RAO, Y. S., & MOHAN, B. K. Local contrast based adaptive SAR speckle filter. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, p.1-12. 2014.

SILVA, M. B. DA; MAIA, R. P. Caracterização morfoestrutural do alto curso da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, ceará-brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 3, 11 ago. 2017.

SILVESTRE, K. S. **Mapeamento da dinâmica fluvial na Volta Grande do Xingu por meio de imagens multitemporais do satélite Sentinel-1**, 52p. (UnB-GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2019).

SOUZA, M. J. N., OLIVEIRA, V. P.V., GRANJEIRO, C. M. M. **Análise Geoambiental do Baixo Jaguaribe**. In: O novo espaço da produção globalizada. Org: Elias, D. Funece, Fortaleza – Ceará. 2002.

SNOEIJ, P., ATTEMA, E., DAVIDSON, M., DUESMANN, B., FLOURY, N., LEVRINI, G., & ROSICH, B. **The Sentinel-1 radar mission: Status and performance**. In 2009 International Radar Conference" Surveillance for a Safer World"(RADAR 2009) (pp. 1-6). IEEE. 2009

TOUZI, R., DESCHAMPS, A., ROTHER, G. Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. **Can. J. Remote Sensing**, v.33, n.1, p.56-67, 2007.

TUCCI, C. E. M. et al. **Gestão das inundações urbanas**. Global Water Partnership. Edição em arquivo digital. Brasília, 2005.

UHLMANN, S., KIRANYAZ, S. Integrating Color Features in Polarimetric SAR Image Classification. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 52, n. 4, p. 2197-2216, 2014.

WANG, S., LIU, K., PEI, J., GONG, M., LIU, Y. Unsupervised Classification of Fully Polarimetric SAR Images Based on Scattering Power Entropy and Copolarized Ratio. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 3, p. 622-626, 2013.

WHITCOMB, J., MOGHADDAM, M., MCDONALD, K., KELLNDORFER J., PODEST, E. Mapping vegetated wetlands of Alaska using L-band radar satellite imagery. **Can. J. Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 54–72, 2009.

WHITE, L., BRISCO, B., DABBOOR, M., SCHMITT, A., & PRATT, A. A collection of SAR methodologies for monitoring wetlands. **Remote Sensing**, v.7(6), p.7615-7645. 2015.

WOODHOUSE, I.H. **Introduction to Microwave Remote Sensing**; Taylor Francis: Boca Raton, FL, USA, 379p. 2006

TORRES, R., SNOEIJ, P., GEUDTNER, D., BIBBY, D., DAVIDSON, M., ATTEMA, E., ... & TRAVER, I. N. GMES Sentinel-1 mission. **Remote Sensing of Environment**, v.120, p.9-24. 2012.

ZHANG, X., QIN, J., LI, Q. G. SAR Target classification using bayesian compressive sensing with scattering centers features. **Progress In Eletromagnetics Research**, v. 136, p.385-407, 2013.