

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

MAYCON MURILO LOURENÇO SOARES

**MODELAGEM DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM IMAGENS DE RADAR
DO SENTINEL-1**

Monte Carmelo MG

2023

MAYCON MURILO LOURENÇO SOARES

**MODELAGEM DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM IMAGENS DE RADAR
DO SENTINEL-1**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia campus de Monte Carmelo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa

Monte Carmelo MG

2023

MAYCON MURILO LOURENÇO SOARES

**MODELAGEM DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COM IMAGENS DE RADAR
DO SENTINEL-1**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia campus Monte Carmelo.

Monte Carmelo MG, 27 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa–UFU (Orientador)
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis–UFU (Examinador)
Universidade Federal de Uberlândia

Me. Marcelo Araújo de Faria–UFU (Examinador)
Universidade Federal de Uberlândia

Monte Carmelo MG

2023

Dedico este trabalho aos meus pais e meu irmão e a minha esposa e principalmente aos meus filhos Theo e Davi, que são a minha maior motivação para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por ter me dado força, vontade, coragem e persistência para conseguir concluir cada etapa do curso.

A minha família, meus pais Beto e Claudia, meu irmão Gustavo por todo apoio que tive para essa fase da minha vida. Em especial, aos meus dois filhos Theo e Davi que foram a maior motivação para de fato concluir o curso. Em especial minha esposa e companheira Elisângela pelo apoio, paciência e por esta sempre ao meu lado.

Agradeço a minha avó Maria que sempre me apoiou, a todos meus familiares, tios e primos que contribuíram com incentivos e apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa, por ter me orientado e me ajudado com grande dedicação na realização desse trabalho.

Aos colegas do curso, quero agradecer o apoio, pelas trocas de conhecimento pelas amizades que fiz ao longo desses anos, pelas experiências que agregaram na vida não só como formando, mas também como pessoa.

Agradeço também a instituição e todos os professores que passaram seus conhecimentos e me motivarão a chegar ao fim do curso.

RESUMO

A quantificação da matéria orgânica do solo é fundamental na sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais, contribuindo para os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com impacto na estabilidade e produtividade dos agros ecossistemas, assim a metodologia mais utilizada para isso é a amostragem em campo, que para ter efetividade, precisa ser muito densa e com um custo financeiro relativamente alto. Com a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, se torna possível fazer estimativas sem essa amostragem em campo. Os sistemas de radar possibilitam a estimativa da matéria orgânica do solo, cujos dados são obtidos através do sistema do Sentinel 1, pertencente a Agência Espacial Europeia (ESA), com sensores de Radar de Abertura Sintética (SAR), e os produtos são distribuídos gratuitamente e operam na banda C da faixa espectral das micro-ondas possibilitando essa estimativa. Nesse trabalho, foram utilizadas imagens de radar para a estimativa da matéria orgânica do solo, a área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio Una, localizada na região sudeste do estado de São Paulo. Foram utilizados dados da cena do Sentinel-1 no período de janeiro de 2016 a dezembro 2016. Como resultado os valores dos dados de retroespalhamento nas polarizações Vertical/Vertical (VV), Vertical/Horizontal (VH), produto VV*VH e VV/VH, foi usado no modelo de Regressão Linear Múltipla com estratégia stepwise para seleção das variáveis. O resultado mostra o valor de $R^2 = 0,32$ e significância de $p < 0,001$, com o modelo ajustado, fez-se o teste t e a correlação de Pearson, a adequação do modelo de regressão mostra que as diferenças observadas não são significativas ao nível de 5%, o que garante a validação do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Ambiental, Matéria Orgânica do Solo (MOS), Radar de Abertura Sintética (SAR), Sentinel 1.

ABSTRACT

The quantification of soil organic matter is essential for the sustainability of agricultural and forestry systems, contributing to the physical, chemical and biological attributes of the soil, with an impact on the stability and productivity of agro-ecosystems. field, which to be effective, needs to be very dense and with a relatively high financial cost. With the use of Remote Sensing and Geoprocessing techniques, it becomes possible to make estimates without sampling in the field. Radar systems make it possible to estimate soil organic matter, whose data are obtained through the Sentinel 1 system, belonging to the European Space Agency (ESA), with Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors, whose products are distributed free of charge and operate in the C-band of the microwave spectral range, making this estimation possible. In this work, radar images were used to estimate soil organic matter, the study area was the watershed of the river Una, located in the southeastern region of the state of São Paulo. Data from the Sentinel-1 scene from January 2016 to December 2016 were used. As a result, the values of the backscatter data in the Vertical/Vertical (VV), Vertical/Horizontal (VH) polarizations, VVxVH and VV/VH product, was used in the Multiple Linear Regression model with stepwise strategy. The result shows the value of $R^2 = 0.32$ and significance of $p < 0.002$, with the adjusted model, the t test and Pearson's correlation were performed, the adequacy of the regression model shows that the observed differences are not significant at the level of 5%, which guarantees model validation.

Keywords: *Environmental Modeling, Soil Organic Matter (SOM), Synthetic Aperture Radar (SAR), Sentinel 1.*

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

| | |
|---|----|
| Figura 1- Obtenção de imagens por sensoriamento remoto | 15 |
| Figura 2- Comprimento de onda e frequência | 17 |
| Figura 3- Configurações básicas de um sistema Radar..... | 19 |
| Figura 4- Elementos geométricos da configuração de imageamento por radar..... | 20 |
| Figura 5- Polarização do sinal de radar enviado pela antena nos planos horizontal (a) e vertical(b)..... | 21 |
| Figura 6- Tipos de superfície – espalhamento associado: (a) lisa - especular, (b) rugosa – difuso, (c) lisas – reflexão de canto..... | 22 |
| Figura 7- Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Una | 24 |
| Figura 8- Fluxograma metodológico | 26 |
| Figura 9- Definição de projeção para a camada e reprojeção de camada..... | 28 |
| Figura 10- Recorte do MDE (Modelo Digital de Elevação) para a área de estudo. | 28 |
| Figura 11- Ferramenta raster/ r.fill.dir para o preenchimento, remoção das falhas do raster de superfície..... | 29 |
| Figura 12- Ferramenta raster/ r.watershed / direção de drenagens..... | 29 |
| Figura 13- Ferramenta raster/ r.watershed / seguimento de fluxo..... | 30 |
| Figura 14- Ferramenta ‘raster/ r.water.outlet’ para indicação do ponto exutório..... | 30 |
| Figura 15- Ferramenta ‘vetor/ geoprocessamento/ recortar’ para recortar a hidrografia dentro do limite da bacia. | 31 |
| Figura 16- Mapa de localização da cena sentinel-1A. | 32 |
| Figura 17- Nomenclatura da pasta do produto Sentinel-1A de nível superior | 33 |
| Figura 18- Spatial Subset, “recorte da imagem nas polarizações VH e VV..... | 34 |
| Figura 19- Apply Orbit File atualização de órbita nas polarizações VH e VV. | 34 |
| Figura 20- Calibração das polarizações VH e VV..... | 35 |
| Figura 21- Multilooking / remove manchas e suavizando as imagens..... | 35 |
| Figura 22- Speckle Filtering de Lee Sigma / reduz os aspectos desfocados da imagem. | 36 |
| Figura 23- Resultado das operações de divisão (σ^0/σ^0) e multiplicação ($\sigma^0*\sigma^0$) das polarizações. | 37 |
| Figura 24- Ferramenta RGB Image Window | 37 |
| Figura 25- Ferramenta Vector- Introdução da área de estudo..... | 38 |
| Figura 26- Exportação dos dados na região de interesse. | 38 |
| Figura 27- Pontos amostrados de calibração e validação..... | 39 |
| Figura 28- Coeficientes de retroespalhamento VH (db) interpolado. | 41 |
| Figura 29- Gráfico de dispersão | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Bandas de radar e seus respectivos comprimentos de onda e frequência..... | 17 |
| Tabela 2- Cenas utilizadas do sentinel-1A para obtenção dos coeficientes de retroespelhamento. | 33 |
| Tabela 3- Valores médios dos coeficientes de retroespalhamento do ano de 2016..... | 40 |
| Tabela 4- Estatísticas descritivas das duas amostras. | 41 |
| Tabela 6- Teste t para amostras pareadas | 42 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| ANA | Agência Nacional de Água |
| dB | Decibéis |
| ESA | <i>European Space Agency</i> |
| GRASS | <i>Geographic Resources Analysis Support System</i> |
| GIS | Geographic Information System |
| GRD | <i>Ground Ranger Detected</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDW | <i>Inverse Distance Weighting</i> |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| DSM | Mapeamento Digital do Solo |
| MOS | Matéria Orgânica do Solo |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| ND | Número Digital |
| SAR | <i>Synthetic Aperture Radar</i> |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| SNAP | <i>Sentinel Applications Platform</i> |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO..... | 15 |
| 2.2 SENSORIAMENTO REMOTO: FONTES DE ENERGIA | 16 |
| 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA - SAR | 18 |
| 2.4 RETROESPALHAMENTO | 21 |
| 2.5 APLICAÇÕES DE IMAGENS DE RADAR (SAR) | 22 |
| 3 OBJETIVO | 23 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO | 24 |
| 4.2 MATERIAIS | 25 |
| 4.3 METODOLOGIA | 25 |
| 4.4 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UNA | 27 |
| 4.5 IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)..... | 31 |
| 4.6 MODELAGEM COM REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA..... | 39 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 40 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 43 |
| REFERÊNCIAS | 44 |

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é um dos principais assuntos que vem sendo discutidos na área ambiental, isso porque esse conceito está ligado diretamente com a vida na Terra. O solo possui um sistema bem complexo que rege e determina seu potencial e sua capacidade de produção, isso se dá por conta de suas características físicas e químicas, que quando somadas podem ser chamadas de qualidade do solo, que também pode ser definida como o desempenho na produção de culturas sustentáveis, buscando beneficiar os homens, os animais e principalmente o meio ambiente (PARR et al. 1992).

A saúde do solo está ligada diretamente com a sua potencialidade, ou seja, quanto mais rico em nutrientes naturais, mais produtivo o solo se torna. Assim a fertilidade do solo aumenta, sendo capaz de fornecer nutrientes essenciais para plantas e culturas específicas na medida e quantidade adequada, embora a saúde do solo sofra alterações devido a acontecimentos naturais e ações do homem (FAGERIA et al. 2006).

Um das variáveis pedológicas mais importantes para o solo é a Matéria Orgânica (MOS), principal componente de estudos nas áreas ambientais. A MOS tem um grande papel nos processos fundamentais do solo, que estão ligados a estrutura dos nutrientes, ciclagem, agregações e as ações da água, se tornando umas principais bases para atividades biológicas. (MIELNICZUK, 1999).

Segundo Lorenz e Lal (2009) um dos principais agentes que impactam na qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), é o tipo de agente aplicado na superfície, que se agrega ao perfil do solo. Assim com a mudança da cobertura do solo, conseqüentemente também irá alterar a qualidade da MOS. Portanto a busca por mais dados sobre o solo é crescente, todas as características agregadas a parte físico-química são de grande importância para o meio agroambiental (ONDRASEK et al. 2019).

Neste cenário, a busca por conhecimento mais profundo nessa área vem ganhando destaque constante nos meios científicos. Com diversas técnicas e meios desenvolvidas hoje em dia para o estudo dessas variáveis pedológicas, o sensoriamento remoto também vem ganhando destaque por conta da sua constante evolução tecnológica e do seu custo financeiro relativamente baixo, principalmente na parte operacional, assim se tornando uma das principais fontes de dados, com grandes progressos nas análises de estimação de

atributos e Mapeamento Digital do Solo (MDS). Portanto avanços tecnológicos na área de sensoriamento remoto aumenta exponencialmente a eficiência na coleta de dados do solo fornecendo mais informações, o que não acontece com os métodos tradicionais, que possuem algumas limitações como demanda de tempo e custo, principalmente considerando grandes áreas territoriais (VISCARRA; WALTER, 2004).

Segundo Mulder et al. (2018) para estudos da segmentação da paisagem em unidades morfopedológicas do tipo mais homogêneas, imagens obtidas por sensoriamento remoto têm sido usadas com maior frequência, principalmente usadas como fonte de dados secundários, dando suporte a métodos de interpolação de dados do solo. Neste contexto a agricultura também utiliza técnicas de sensoriamento remoto como a espectroscopia de reflectância difusa na região do visível e Infravermelho Próximo (Vis-NIR), ferramenta usada para prever atributos do solo como a matéria orgânica, operando com variáveis topográficas (ARROUAYS, LAGACHERIE, HARTEMINK 2017, ROMAGNOLI et al, 2014).

Contudo, há pontos limitantes em relação aos métodos adotados por sensores ópticos que utilizam o espectro do visível e do infravermelho próximo necessitando da luz solar, portanto não podem fornecer imagens a noite (YUZUGULLU et al. 2020). Outro fato se dá por conta das situações climáticas como cobertura de nuvens extensas, problema esse, muito comum em determinadas regiões e períodos do ano e alta sensibilidade da vegetação (WALI, TASUMI, MORIYAMA 2020).

A saída para esse problema são as imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR), que possuem sensores ativos de comprimento de onda maior do que 1cm, que carregam dados de intensidade em relação aos aspectos físicos da cena, e dados de fase de ondas que refletem o terreno rugoso e altura do terreno, assim fornecem dados independentes da hora do dia e não sofrem com condições climáticas, portanto as imagens SAR possuem um grande potencial para estudos na estimação dos atributos dos solo além de possuir algumas vantagens sobre os sensores ópticos que operam no VIS-NIR (YUZUGULLU et al. 2020).

Portanto com o avanço das tecnologias do sensoriamento remoto em equipamentos para obtenção de dados da superfície terrestre, melhorias constantes nos softwares e modelos matemáticos existentes para estudos nas análises espaciais, os

programas de imagens de radar se tornam uma excelente ferramenta nos estudos relacionados as propriedades do solo como a matéria orgânica.

Outra ferramenta fundamental que integra o sensoriamento remoto é o SIG (Sistema de Informação Geográfica) ferramenta fundamental que auxilia nos estudos e análises para obtenção de dados espaciais, muito utilizados em processos que envolvem bacias hidrográficas.

O conceito de bacia hidrográfica segundo (SCHIAVETTI, CAMARGO, 2015) também chamada de bacia de drenagem, constituem na captação de água, que quando se juntam na forma de precipitação, escorrem por redes de rios menores, drenando águas de diferentes pontos da bacia que tendem a seguir o fluxo para um rio principal, lago ou oceano.

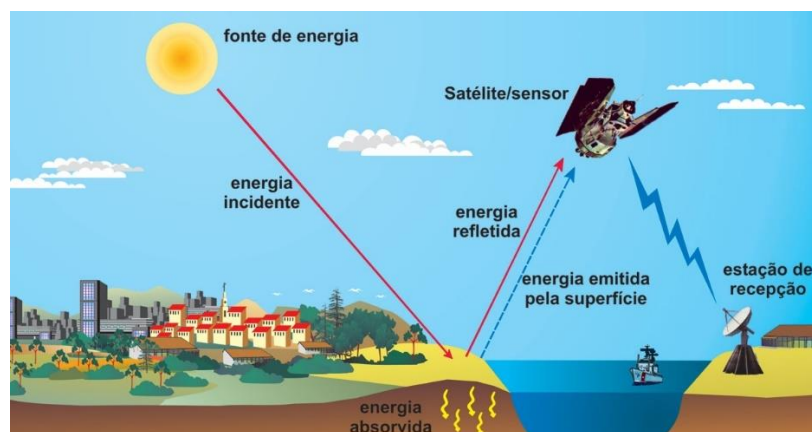
As bacias hidrográficas possuem sistemas correlacionados, que variam entre subdivisões de grandes bacias a pequenas bacias chamadas de sub-bacias, portanto isso simplifica para entendimento em diagnósticos para monitoramento ambiental, abrangendo a capacidade de análises dos recursos naturais como a água, a destinação da ocupação do solo identificando possíveis áreas críticas de processos que impactam o meio ambiente (MORAES, LORANDI 2016).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensoriamento remoto

Pode se dizer que para conceituar uma definição única para sensoriamento remoto seria “impossível”, isso porque cada autor apresenta pontos conceituais que convergem e divergem (NOVO, 2010). Para Elachi (1983), sensoriamento remoto está associado a coleta de informações a partir de percepção e mensuração das mudanças impostas de um objeto aos Campos de força que estão em seu entorno sendo esses Campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais. Ainda segundo Novo (2010) essa definição para sensoriamento remoto segue sendo umas das mais adequadas, isso porque os sensores que trabalham com ondas sonoras conseguem captar informações dos objetos, sem ter a necessidade de tocar diretamente no alvo, isso acontece devido as forças atuantes envolta do objeto que são captadas e mensuradas. Portanto o termo sensoriamento está associado a coleta de informações obtidas por sensores, e remoto quer dizer “distante”, termo usado para justificar que a obtenção de informação é feita a distância, sem o contato do sensor com o objeto como mostrado na Figura 1 (FLORENZANO, 2007).

Figura 1- Obtenção de imagens por sensoriamento remoto



Fonte: (FLORENZANO, 2007).

Outro conceito bastante questionado é a origem do sensoriamento remoto, que segundo alguns autores Novo (2010), Meneses e Almeida (2012), Florenzano (2007),

Melo et al. (2021) associam o sensoriamento remoto a sensores fotográficos que realizam fotografias aéreas, técnica usada inicialmente por uso militar em tempos de conflitos, para estudos e reconhecimento terrestre. Ainda segundo Florenzo (2007), esse vínculo com a fotografia aérea possui dois períodos, um em 1860 onde o sensoriamento remoto se baseava em fotografias e em 1960 que se baseia nas tecnologias que se desenvolveram até os tempos atuais trazendo mais potencial na construção dos próprios sensores, na capacidade de transmissão, armazenamento e processamento.

O sensoriamento remoto também pode ser considerado como um sistema de coleta de informações, divididos em dois grupos sendo um como aquisição de dados formados por fontes de radiações, plataformas como satélites e aeronaves, sensores, estações de recepções e processamento de dados e produção de informações que consistem em coleta de dados do solo para calibragem do sensoriamento remoto, processamento de imagens e geoprocessamento (NOVO, 2010).

2.2 Sensoriamento remoto: Fontes de energia

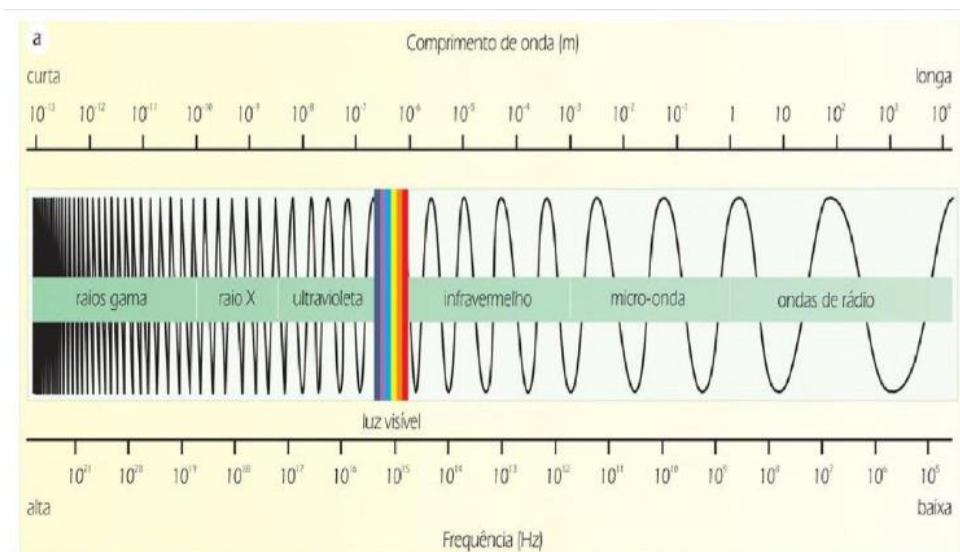
Toda atividade relacionada com aquisição de dados requer energia e sensoriamento remoto não é diferente. A energia utilizada no processo de sensoriamento remoto vem de diferentes fontes como a própria luz solar, calor da superfície da Terra ou por própria fonte “construída/própria” como sinal produzido por sensores de radar (FLORENZANO, 2007).

Segundo Novo (2010) o sensoriamento remoto utiliza a energia de radiação eletromagnética como fonte, e o define como um sistema que interage de forma coordenada entre energia e matéria. Algumas formas derivam da radiação eletromagnética como a luz visível, o calor radiante e as ondas de rádio, tendo como variável chave a frequência ou comprimento de onda correlacionando os dois conceitos e toda a gama de possíveis ondas como: raio x a raios gama, luz ultravioleta a luz visível e infravermelho a ondas de rádio chamados de espectro eletromagnético (WOODHOUSE, 2006).

A radiação eletromagnética se mede em frequência e comprimento de onda (Figura 2), a frequência é expressa em hertz (Hz), e calculada de acordo com quantidade de vezes que a onda se repete em um determinado intervalo de tempo, quanto maior o comprimento de onda maior a frequência, e o comprimento de onda (λ) é medido e

expresso em metro, o comprimento de onda é medido pela distância entre os picos de onda, assim quanto maior a distância maior o comprimento (FLORENZANO, 2007).

Figura 2- Comprimento de onda e frequência



Fonte:(Meneses e Almeida, 2012)

O sistema de radar opera por bandas que estão relacionadas ao comprimento de ondas, o relacionamento entre alvos da superfície e a radiação emitida é dependente da banda utilizada, devido ao fato que o sistema gera a própria energia assim as plataformas raramente operam em várias bandas (PONZONI, SHIMABUKURO, KUPLICH 2015).

A tabela 1 mostra quais bandas são as mais usadas em radares para estudos de sensoriamento remoto como aplicações em estimativa de biomassa, monitoramento de agricultura, mapeamento de solo e vegetação, oceano, gelo; e seus comprimentos de ondas e frequência (MOREIRA et al. 2013).

Tabela 1- Bandas de radar e seus respectivos comprimentos de onda e frequência.

| Banda | Comprimento de onda λ (cm) | Frequência f (GHz) |
|--------------|--|--|
| P | 60-120 | 0.25-0.5 |
| L | 15-30 | 1-2 |
| S | 8-15 | 2-3.75 |
| C | 4-8 | 3.75-7.5 |
| X | 2.5-4 | 7.5-12 |
| Ku | 1.7-2.5 | 17.6-12 |

| | | |
|-----------|----------|-------|
| Ka | 0.75-1.2 | 25-40 |
|-----------|----------|-------|

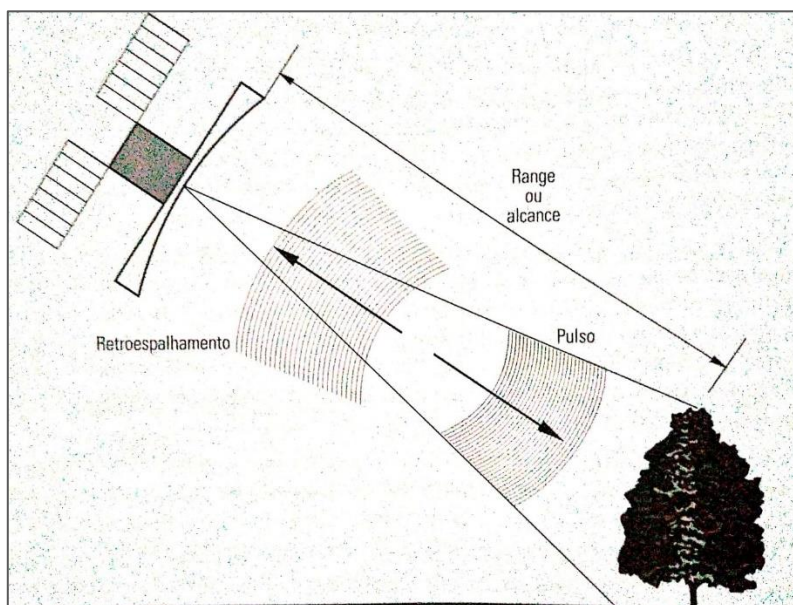
Fonte: Adaptado de (Moreira et al. 2013).

2.3 Sensoriamento remoto por radar de abertura sintética - SAR

Em 1978 foi lançado o primeiro sistema de radar de abertura sintética (SAR) no espaço, pelo satélite SEASAT sobre o comando da NASA, com o sucesso das missões espaciais em 1990, mais satélites foram lançados no espaço que operavam com polarizações e frequências únicas, devido ao grande volume de dados que os produtos SAR geravam, porém só a partir de 2005 novas gerações de satélites foram lançados, agora com polarizações duplas que melhoravam o potencial de discriminar e mapear alvos minimizando a influência de outros parâmetros biofísicos (SANO, MATRICARDI, CAMARGO 2020).

Os sistemas de RADAR operam de forma diferente na obtenção de informação entre a radiação eletromagnética e os objetos da superfície, são sistemas ativos que operam na região das micro-ondas, que possuem seu próprio feixe de radiação, isso permite a obtenção das respostas recebida pelos alvos (NOVO 2010; WOODHOUSE 2006; JENSEN 2009). O sistema de radar consiste em algumas funções básicas como a transmissão do pulso de ondas na direção dos alvos, interação do alvo e do pulso transmitido obtendo assim a porção refletida chamada de energia retroespalhada, variação temporal, tempo de retorno e registro de potência (NOVO 2010). As funções básicas podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3- Configurações básicas de um sistema Radar



Fonte: Adaptado de (Novo 2010).

O sistema de radar possui algumas vantagens que se destacam em relação aos sistemas ópticos como por exemplo, nas regiões do espectro podem avistar interações que outros sistemas não conseguem por conta dos sensores ativos, o imageamento pode ser dia ou a noite, porque usam energia própria nos sensores não depende de energia externa como a radiação da luz solar, operando nas regiões das micro-ondas as imagens não sofrem interferência de nuvens, precipitações ou neblinas, permitindo assim obter informações com condições climáticas adversas (NOVO, 2010; WOODHOUSE 2006, FLORENZANO 2007; MENESES, ALMEIDA 2012).

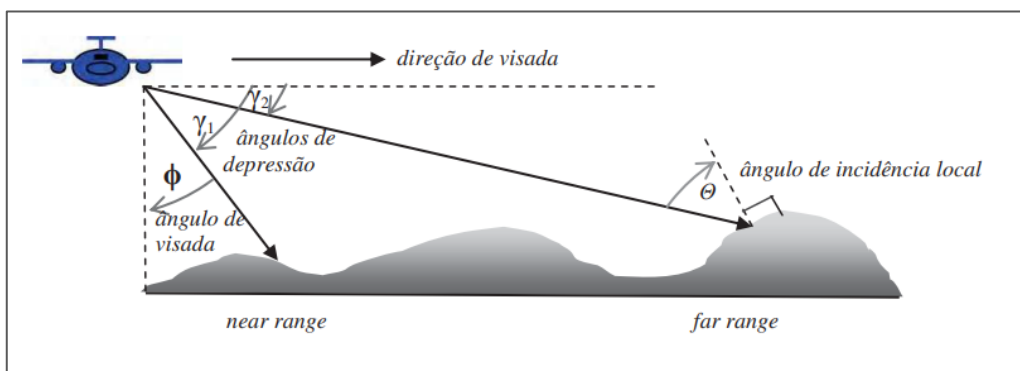
Os radares de abertura real foram os primeiros radares imageadores, que possuem limitações na resolução espacial das imagens por conta das antenas serem menores, já com a criação posteriormente dos radares de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*), esse problema foi resolvido com a simulação de uma antena centenas de vezes maior para registro do eco de cada objeto (KUPLICH, 2022). Os radares possuem parâmetros particulares como direção de azimute, alcance de radar (range) ou direção de visada, ângulos de depressões, ângulos de visadas, ângulo de incidência e polarização (JENSEN 2009; PONZONI et al, 2015; MENESES, ALMEIDA 2012; NOVO 2010).

No apontamento de azimute também chamado de direção azimutal, consiste na propagação do pulso lançado no terreno, tendo como área inicial próximo a antena

chamada de *near range*, e no segundo momento mais distante *far range* (MENESES, ALMEIDA 2012).

A direção de visada é o percurso que o pulso de radar se propaga sendo um dos principais parâmetro para sensores de visada lateral para melhor detecção dos alvos, por conta da relação direta entre a direção do alvo, orientação do terreno, relevos, e a direção lateral que o pulso é emitido (JENSEN, 2009). O ângulo de depressão é formado entre a linha de horizonte e a linha de visada, já o ângulo de visada é medido entre linha vertical da antena a superfície e linha de visada e o ângulo de incidência é formado entre o pulso de radar e a vertical ao plano que capta do terreno, sendo dependente da declividade do terreno e principal elemento determinante na aparência dos alvos (MENESES, ALMEIDA, 2012). A Figura 4 mostra o uso de um sistema de radar aerotransportado, mas o conceito também se aplica a um sistema orbital.

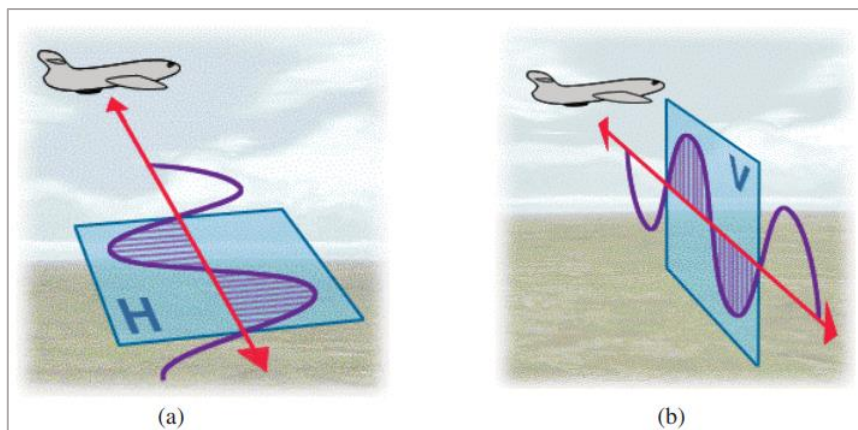
Figura 4- Elementos geométricos da configuração de imageamento por radar.



Fonte: Adaptado de (Meneses, Almeida, 2012).

Outro parâmetro dos radares são as polarizações (Figura 5), que acontecem quando um pulso de energia é lançado pela antena que se propagam em direções transversais, controlado por um sistema que faz a onda vibrar na direção horizontal (H) ou vertical (V), e quando o pulso é emitido na direção (H) e retorna na direção (H) chama-se de polarização HH assim também se aplica na direção VV (MENESES, ALMEIDA, 2012).

Figura 5- Polarização do sinal de radar enviado pela antena nos planos horizontal (a) e vertical(b)



Fonte: Adaptado de (Meneses, Almeida 2012).

Quando o sinal enviado pelos sensores atinge o alvo e retorna com uma intensidade maior e numa diferente direção de polarização, esse processo chama-se polarização cruzada, ou seja, se o sinal transmitido for em V e retorna na direção em H tem-se a polarização VH, assim muitos sensores operam com combinações de polarização cruzada e paralela permitindo a aquisição das imagens em quatro modos: HH, HV, VV e VH (WOODHOUSE 2006; MENESES, ALMEIDA 2012; JENSEN 2009).

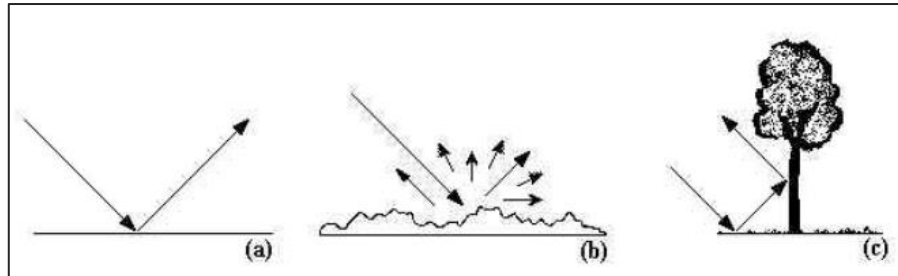
2.4 Retroespalhamento

Os radares trabalham com diferentes bandas, que integram com os comprimentos de ondas e frequências que são transmitidas e recebidas sobre a superfície como eco, também conhecido como retroespalhamento captando a amplitude/intensidade do alvo retroespalhada, processo esse que se dá por conta da radiação emitida e espalhada na direção do radar (KUPLICH, 2022). Como o retroespalhamento trabalha com diversas ordens de magnitude, é representado em logaritmo de unidades de decibéis (dB) que pode variar entre -5 a +40 dB em estudos em funções de áreas imageadas (JENSEN, 2009).

Os processos responsáveis pelo espalhamento das micro-ondas podem ocorrer na superfície dos objetos, no interior como no caso de galhos e folhas que incluem o espalhamento entre os elementos do objeto e a despolarização da onda incidente chamado de espalhamento volumétrico (KUPLICH, 2022). Esses processos de retroespalhamento estão ligados diretamente com a rugosidade das superfícies e ao comprimento de onda e ao ângulo de incidência, assim em superfícies rugosa em relação ao comprimento de onda, ocorrerá em várias direções chamado espalhamento difuso, em superfície lisa ocorrerá na

direção oposta do sensor chamado de especular e no tipo especial, corre quando mais de uma superfície é lisa e são adjacente assim chamado de espalhamento de reflexão de canto representados na Figura 6 (KUPLICH, 2022; JENSEN, 2009; WOODHOUSE, 2006).

Figura 6- Tipos de superfície – espalhamento associado: (a) lisa - especular, (b) rugosa – difuso, (c) lisas – reflexão de canto.



FONTE: Adaptado de (KUPLICH, 2022)

2.5 Aplicações de imagens de radar (SAR)

As imagens SAR vêm sendo utilizadas para diversos estudos como: mapeamento de cobertura vegetal e uso do solo (KAYABOL, ZERUBIA 2013; COSTA et al. 2011; SILVA 2021; TEIXEIRA, SILVA, KUX, 2013), monitoramento de gelo e aplicações oceanográficas (HILLEBRAND et al 2019; Andrade et al 2019) movimento de massas (Mura et al 2015; Oliveira 2013)

Vários trabalhos adotam imagens SAR para estimar propriedades e características do solo em diversas regiões do mundo (LIMA 2021; PROENÇA et al. 2012; GOMES 2006; NUNES, UAGODA, 2020).

3 OBJETIVO

Geral: Modelar a matéria orgânica do solo com imagens de radar do Sentinel-1, em uma bacia hidrográfica.

Objetivo específico: verificar a possível adequação do modelo de regressão linear múltipla para a estimativa da matéria orgânica do solo com diferentes polarizações.

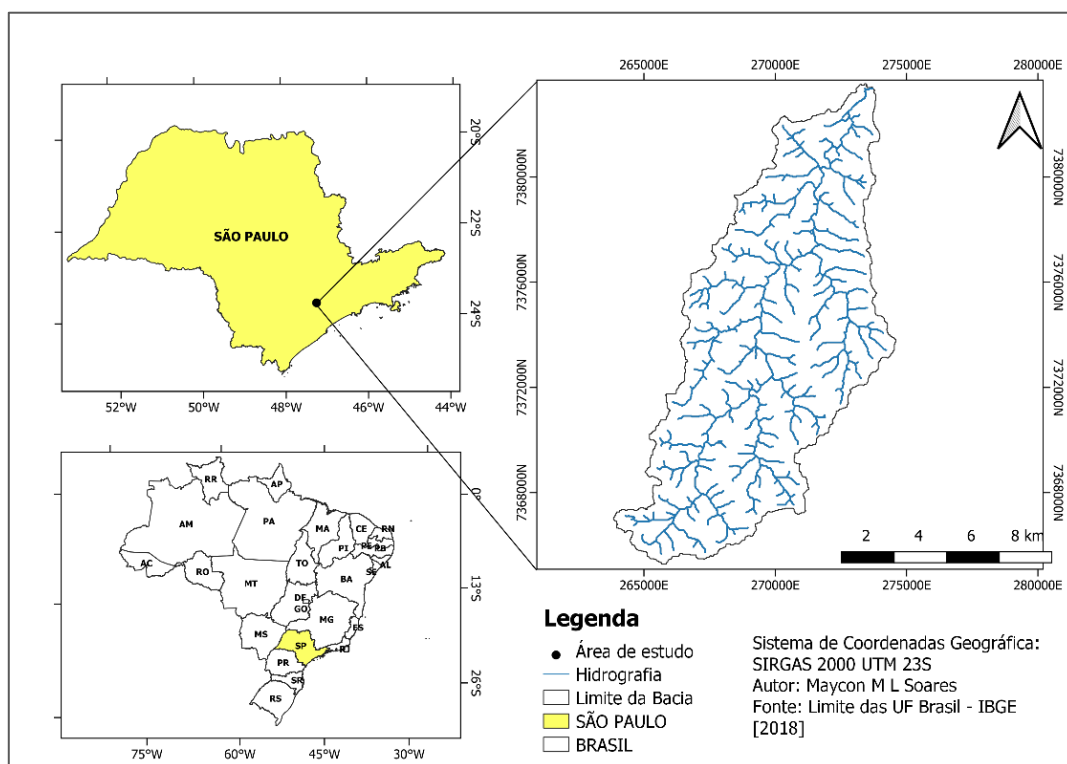
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área escolhida para o desenvolvimento da pesquisa foi a Bacia Hidrográfica do rio Una, localizada na região adjacente a cidade de Ibiúna, na região sudeste do Estado de São Paulo, representado pela Figura 7. O rio Una possui três afluentes sendo o córrego do Cupim, ribeirão do Leopoldo e ribeirão do Salto, desembocando no rio Sorocabuçu que juntamente com o rio Sorocamirim são os principais responsáveis na formação do reservatório de Itupararanga (LOPES et al. 2018).

A área da bacia hidrográfica possui aproximadamente mais de 96 km², com clima predominante Cwb definido de acordo com a classificação de Köppen, sendo janeiro (verão) mais chuvoso e agosto (inverno) estiagem. Em janeiro apresenta-se o período mais úmido com precipitação média de 218,51 mm e com média de 40,7 mm para o mês de agosto, por consequência do período de estiagem (DAEE, 2020).

Figura 7- Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: o Autor (2023).

4.2 Materiais

Os dados da matéria orgânica do solo (MOS) extraídas em campo, foram disponibilizadas pelo Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Sorocaba SP. Foram usadas amostras de solo do período de outubro de 2014 a julho de 2016, referentes a áreas de fragmentos florestais, agricultura, silviculturas, pastagens e campos sujos, com profundidade de 0 -10 cm.

Os materiais utilizados para a elaboração foram:

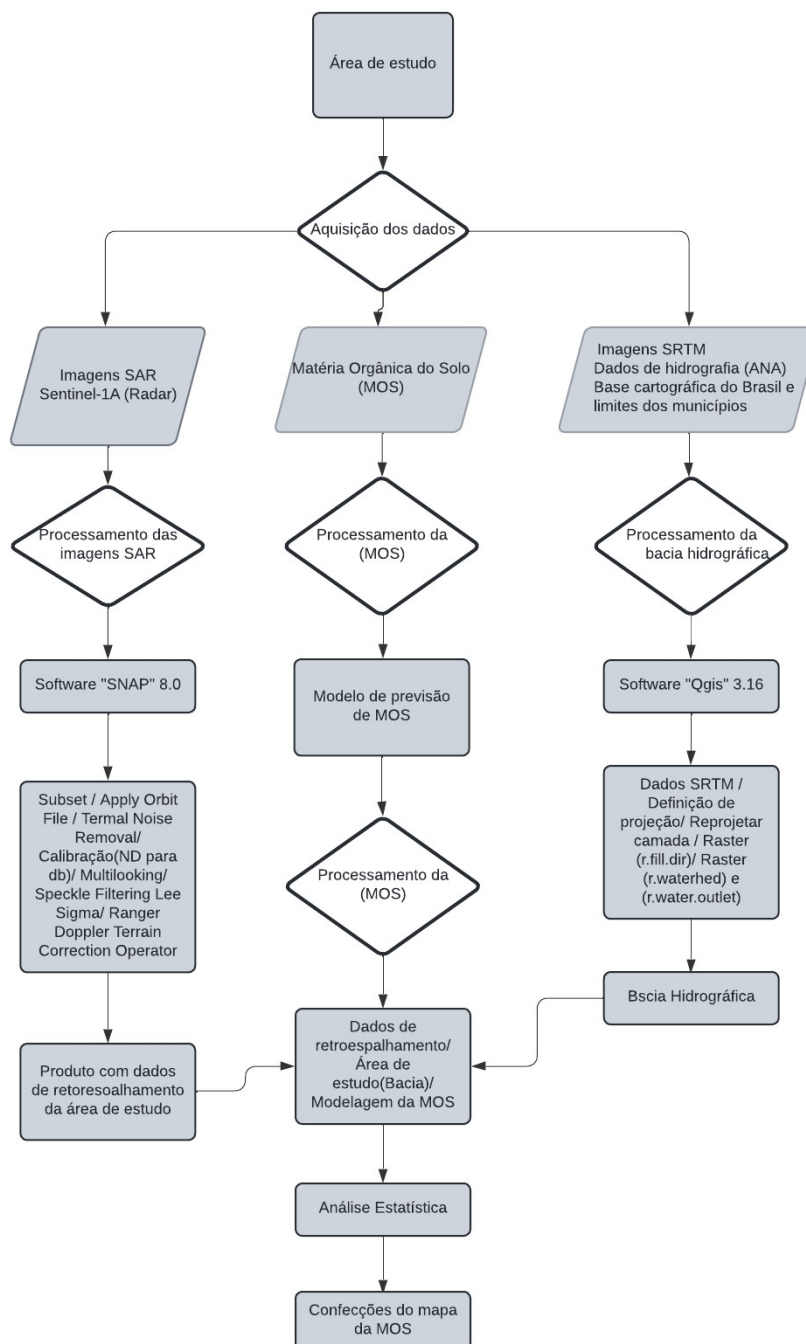
- Imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) da missão do Sentinel-1, fornecidas pelo site da *European Space Agency* (ESA, 2023);
- Software *SNAP Desktop* 8.0 fornecido pelo site *European Space Agency* (ESA, 2023);
- Base Cartográfica do Brasil e dos limites dos municípios de São Paulo disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2023);
- Dados SRTM da carta topográfica 24S48 com informações de altitude com resolução espacial de 90 m disponibilizados pelo *Topodata* (INPE, 2023);
- Dados de amostra de coleta de MOS retiradas da bacia hidrográfica;
- Softwares *QGIS* 3.16.11 e *ArcMap* 10.8;
- Software *SNAP* 8.0, fornecido pelo site *European Space Agency* (ESA, 2023);

4.3 Metodologia

A metodologia da pesquisa está representada no fluxograma da Figura 8, organizada de acordo com cada etapa:

- Aquisição de dados para realização dos processamentos
- Tomadas de decisão
- Processamento dos dados
- Interpolação entre os produtos
- Análise estatística
- Confecção dos mapas

Figura 8- Fluxograma metodológico



Fonte: o Autor (2023).

4.4 Delimitação da área de estudo: Bacia Hidrográfica do rio Una

Para o desenvolvimento na gestão de bacias hidrográficas, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) se torna uma ferramenta fundamental no auxílio na criação e nas medidas de análises para o manuseio ambiental. Assim o SIG se tornar cada vez mais presente nas execuções de desenvolvimento das bacias, por conta da praticidade e flexibilidade que traz a tecnologias computadorizadas, que conseguem armazenar uma grande quantidade de informações de dados geocodificados, estatísticas, características de estudos dos elementos naturais, que podem ser expressos graficamente ou visualmente formando um sistema de dados das bacias (SCHIAVETTI, CAMARGO, 2015).

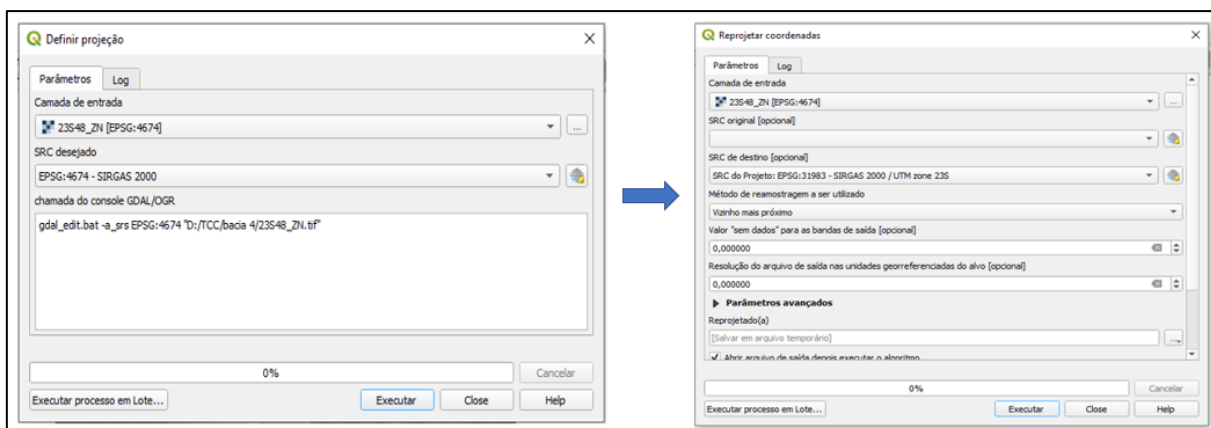
Portanto por essas razões a pesquisa se baseia nesses conceitos e usa um SIG para a elaboração da pesquisa que segue as etapas mostradas a seguir:

Inicialmente fez-se o uso dos dados SRTM, com resolução espacial de 90 m contendo o Modelo Digital de Elevação (MDE) das imagens através do site *Topodata*, que contém informações originais de altitude, referente a carta 23S48 na região de Ibiúna SP (TOPODATA, 2008).

Utilizando o software livre QGIS 3.16.11 para delimitação automática da bacia hidrográfica, foi utilizado dados de imagens SRTM, *shapfiles* dos rios do Brasil extraídos do site metadados Agência Nacional de Água - ANA (ANA, 2023), e mapas da organização territorial do Brasil, contendo malhas territoriais dos municípios e da federação, extraídos do portal de mapas do IBGE. Serão utilizadas também as ferramentas do *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS GIS) que oferecem mecanismos de processamento raster, vetorial e geoespacial integrado no software (GRASS, 2023).

O primeiro passo foi definir um sistema de projeção para a camada raster já que a imagem raster não contém sistema de coordenadas definido, assim utilizando a ferramenta '*raster/ projeções/ definir projeções*' atribui-se o sistema de coordenadas SIRGAS 2000. Em seguida foi reprojetoado as coordenadas para SIRGAS2000 UTM ZONA 23S, onde se situa a região de estudo como mostrado na Figura 9.

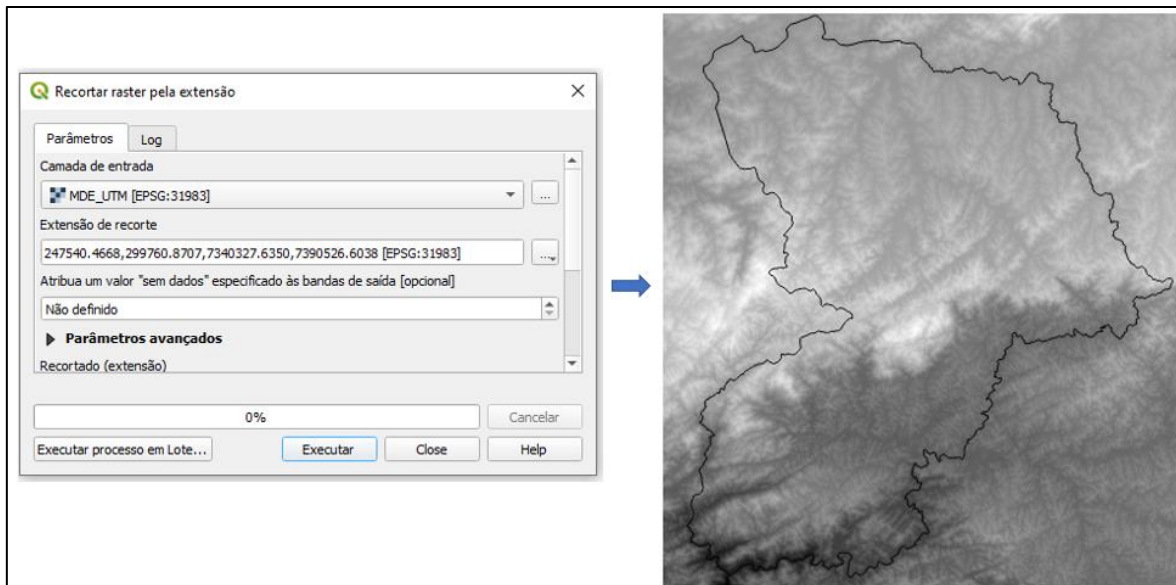
Figura 9- Definição de projeção para a camada e reprojeção de camada.



Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

O próximo passo, foi realizar o refinamento do raster com a ferramenta *'raster / extrair / recortar raster pela extensão'*, (Figura 10), para recortar o MDE (Modelo Digital de Elevação) para a área de estudo, através da *shapfile* do limite da cidade de Ibiúna SP, onde está localizada a região da bacia hidrográfica do rio Una.

Figura 10- Recorte do MDE (Modelo Digital de Elevação) para a área de estudo.

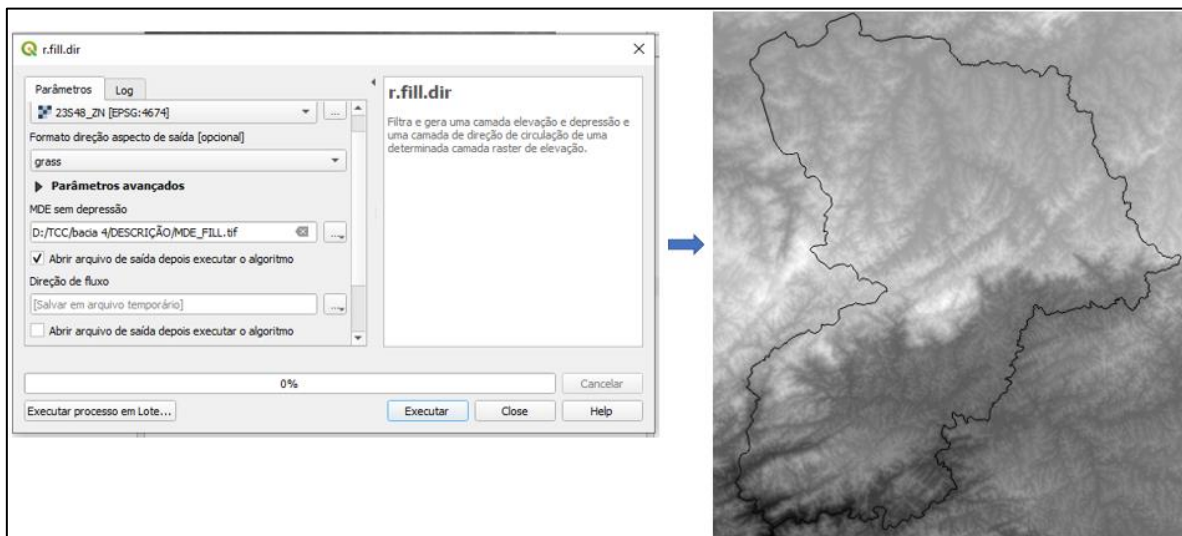


Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

Para o preenchimento e remoção das falhas do raster de superfície, foi preciso utilizar as ferramentas *'GRASS/ raster/ r.fill.dir'* (Figura 11), que tem a função de

preencher as camadas com depressões, encontrando um fluxo de direção, usando técnicas de vizinhança, resultando em uma camada sem depressões (GRASS, 2023).

Figura 11- Ferramenta raster/ r.fill.dir para o preenchimento, remoção das falhas do raster de superfície.

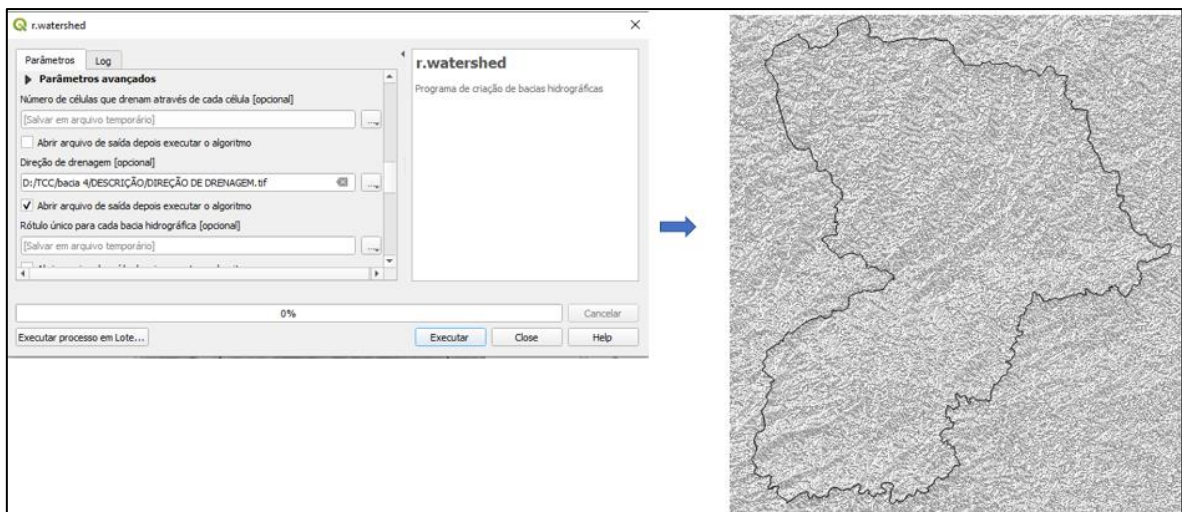


Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

Para a criação da bacia hidrográfica, foi necessário utilizar a ferramenta '*raster/ r.watershed*', que executa os parâmetros avançados de direção de drenagem e segmento de fluxo, fatores importantes na construção da hidrografia da área de estudo.

As direções de drenagens (Figura 12), contêm informações como: sentido em graus do escoamento em que as células viajam, áreas de depressões, áreas com valores negativos e absolutos indicando os limites da região e a direção do fluxo (GRASS, 2023).

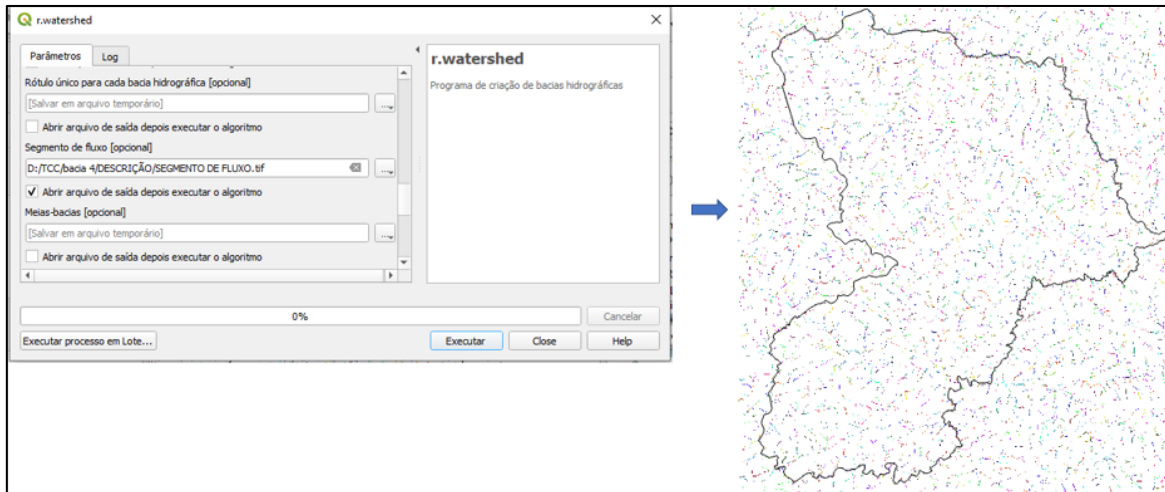
Figura 12- Ferramenta raster/ r.watershed / direção de drenagens



Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

O seguimento de fluxo (Figura 13), contém redes fluviais de córregos e rios que possuem pontos nas células de saída indicando as direções de drenagens (GRASS, 2023).

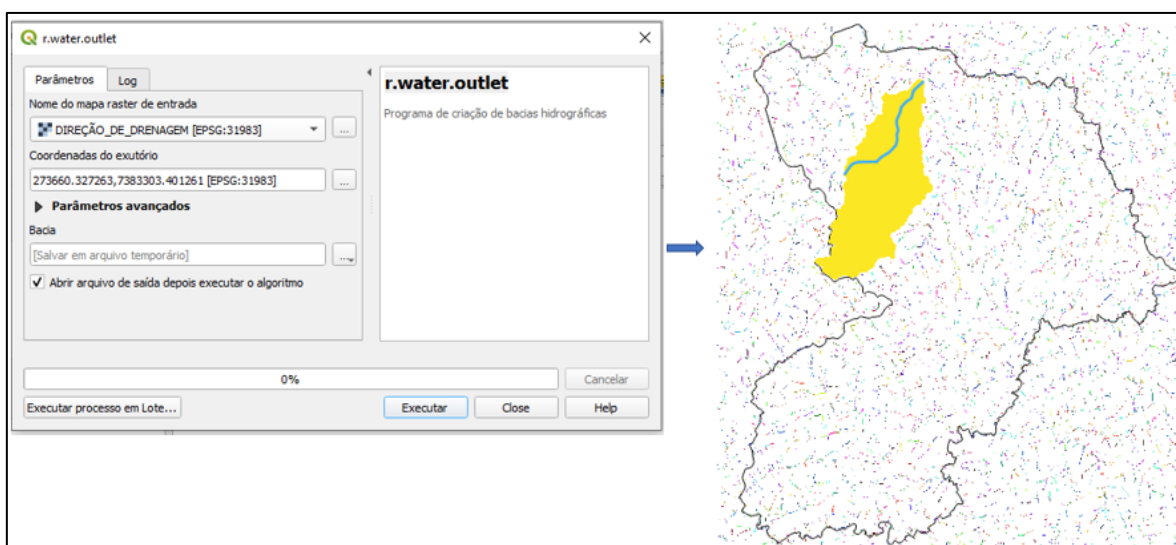
Figura 13- Ferramenta raster/ r.watershed / seguimento de fluxo.



Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

Com os metadados e o *shapfile* dos rios do Brasil extraído do site da ANA, foi necessário fazer o filtro dos rios, através da tabela de atributos com o nome do rio Una, para posteriormente ser usado como referência na geração do exutório, contendo as coordenadas do ponto para delimitação da bacia hidrográfica, assim sendo possível com a utilização da ferramenta '*raster/ r.water.outlet*' mostrado na Figura 14.

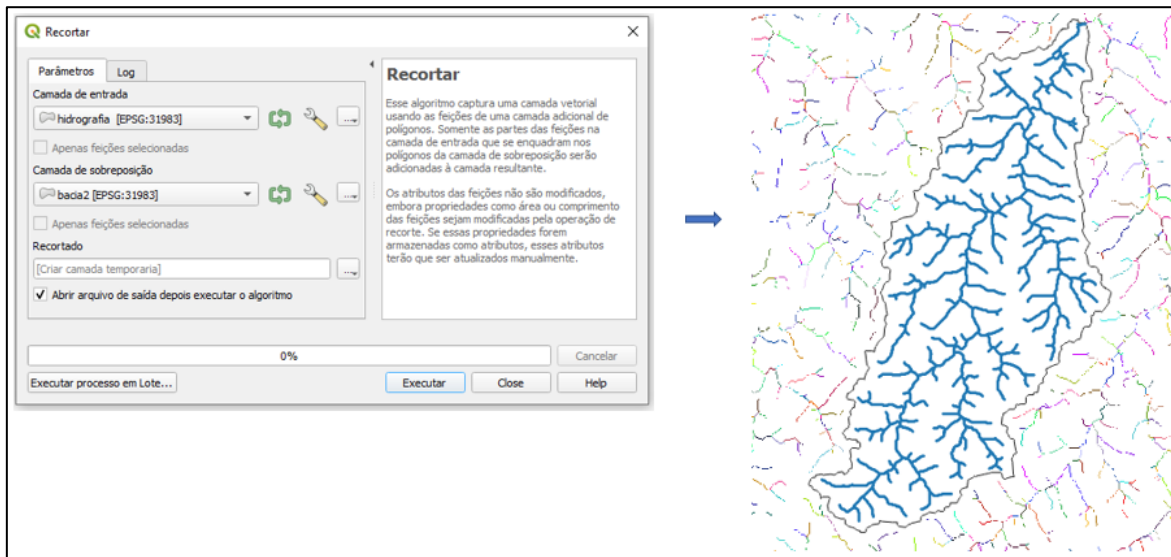
Figura 14- Ferramenta '*raster/ r.water.outlet*' para indicação do ponto exutório.



Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

Com os limites da bacia definidos, fez-se o uso da ferramenta ‘*raster/ r.to.vect*’ (Figura 15), para converter as camadas raster, bacia e segmento de fluxo em camadas vetoriais, e a ferramenta ‘*vetor/ geoprocessamento/ recortar*’ para posteriormente realizar um recorte do fluxo dos rios, para dentro do limite da bacia resultando na hidrografia da área.

Figura 15- Ferramenta ‘*vetor/ geoprocessamento/ recortar*’ para recortar a hidrografia dentro do limite da bacia.

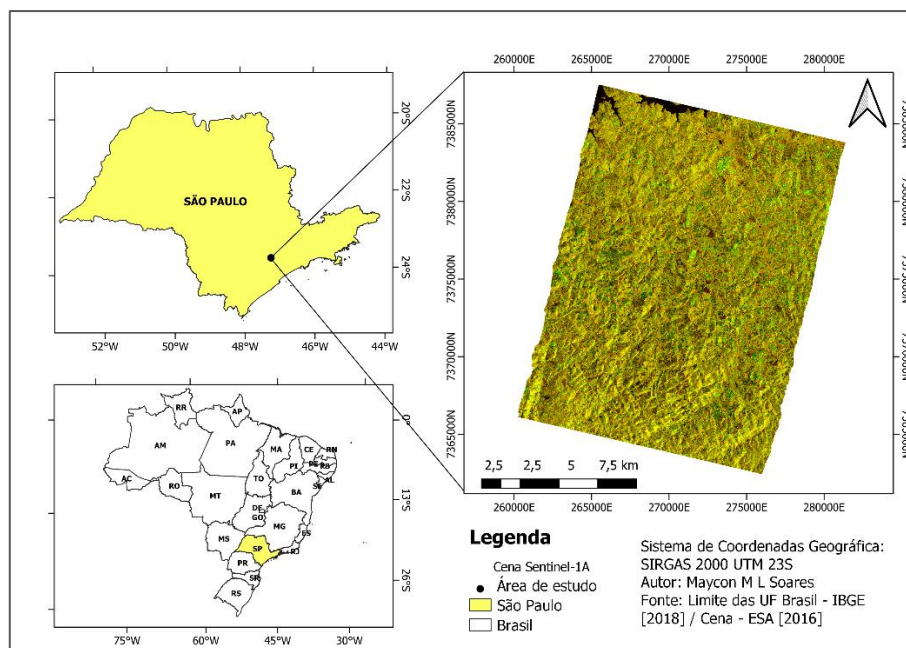


Fonte: Adaptado de *software QGIS 3.16* (2023).

4.5 Imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR)

Para o tratamento e processamento dos dados orbitais, foi necessário a obtenção das imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) da missão do Sentinel-1, que estão disponíveis na plataforma online *Copernicus Open Access Hub* em parceria com a *European Space Agency* (ESA, 2023). Através da interface gráfica de usuários interativa (Open Access Hub) foram usadas imagens do Sentinel-1A (ESA, 2023). A Figura 16 representa a localização da cena Sentinel-1A.

Figura 16- Mapa de localização da cena sentinel-1A.



Fonte: o autor (2023).

Operando na banda C da faixa espectral de micro-ondas, os sensores do Sentinel-1 do tipo SAR (Radar de Abertura Sintética), trabalha com frequência central de 5,405 GHz oferecendo quatro modos de imagens com diferentes resoluções e coberturas espaciais resultando em produtos com polarização simples (HH) Horizontal transmitida e Horizontal recebida, (VV) Vertical transmitida e Vertical recebida para o modo *Wave* – WV e produtos com polarização dupla (VV + VH ou HH + HV) e polarização simples (HH ou VV) nos modos *Interferometric wide swath* -IW, *Stripmap* -SM, e *Extra-Wide swath-EW* (ESA, 2023).

Conforme a tabela 2, foram usadas para o processamento 11 cenas do Sentinel-1A, de janeiro a dezembro de 2016 (exceto o mês de outubro de 2016 que não estava disponibilizado), com configurações de produtos *Ground Ranger Detected* (GRD) que consistem em dados SAR projetados para obtenção de imagens do solo através do modelo de elipsoide terrestre WGS84 (ESA, 2023).

A plataforma de satélite usada foi (S1A_*), que são fornecidas a cada 12 dias sendo todas na trajetória descendentes, a polarização foi (VV+VH) com o modo de faixa de largura interferométrica IW (largura de faixa 250 km e resolução espacial 5 x 20 m), sendo o principal modo de aquisição em Terra, com incidência de ângulos de variação 29,1° a 46,0° (ESA, 2023).

Tabela 2- Cenas utilizadas do sentinel-1A para obtenção dos coeficientes de retroespalhamento.

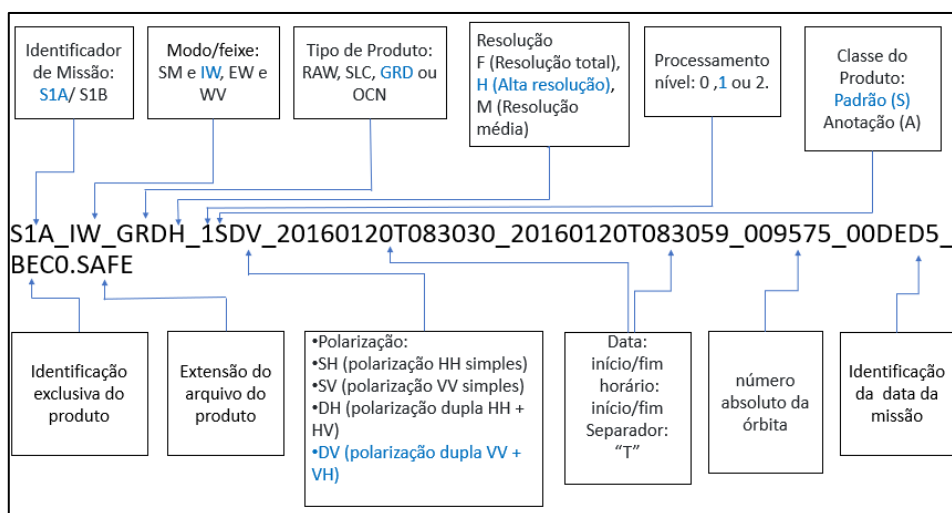
| Produto | Tipo de polarização | Órbita | Data da imagem |
|------------|---------------------|--------|----------------|
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 20-01-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 25-02-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 20-03-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 126 | 06-04-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 19-05-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 126 | 29-06-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 126 | 23-07-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 126 | 16-08-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 126 | 21-09-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 27-11-2016 |
| S1A_IW GRD | VV e VH | 53 | 21-12-2016 |

Fonte: O autor (2023).

O software que utilizado para o processamento das imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) da missão do Sentinel-1 foi o programa livre *Sentinel Application Platform* (SNAP 8.0), contendo todas as ferramentas “*Sentinel-1 Toolbox*” que são necessárias para o tratamento das imagens (ESA, 2023).

As nomenclaturas da pasta do produto Sentinel-1 do nível superior, contém números e letras maiúsculas separas por sublinhado como mostra a Figura 17.

Figura 17- Nomenclatura da pasta do produto Sentinel-1A de nível superior

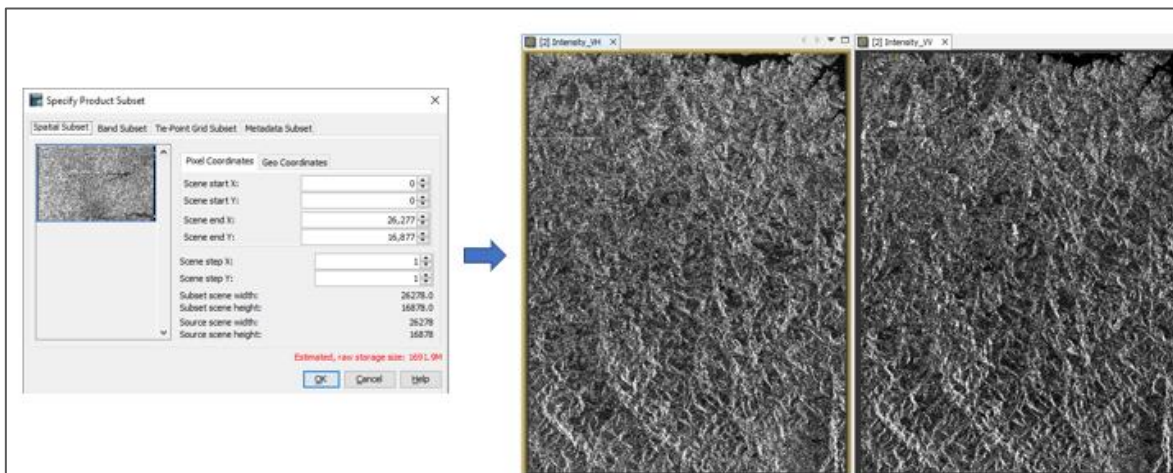


Fonte: adaptado de ESA (2023).

Inicialmente foi realizado o download das imagens e posteriormente processadas com o SNAP, para trabalhar com as bandas de intensidade nas polarizações VH e VV.

Em seguida foi aplicado a ferramenta *Spatial Subset* (Figura 18), que corresponde a um “recorte da imagem”, permitindo especificar uma área do produto a ser carregada.

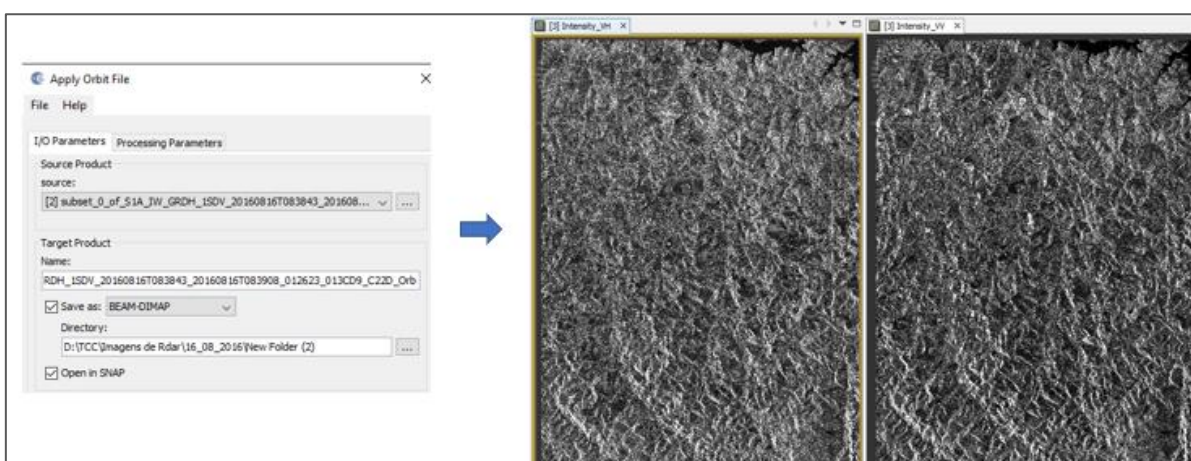
Figura 18- Spatial Subset, “recorte da imagem nas polarizações VH e VV.



Fonte: o Autor (2023).

Na Figura 19 a ferramenta *Apply Orbit File* foi usada para refinar os arquivos de órbita precisos, que contém informações de posição e velocidade do satélite atualizadas.

Figura 19- Apply Orbit File atualização de orbita nas polarizações VH e VV.

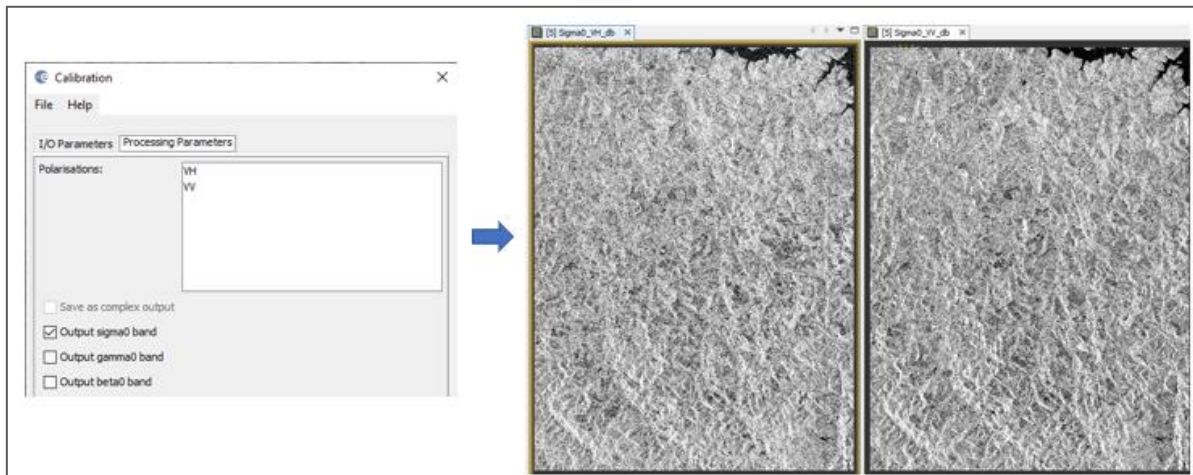


Fonte: o Autor (2023).

A ferramenta *Thermal Noise Removal Operator*, foi aplicada para realizar a correção de ruídos térmicos, que são inseridas aos produtos Sentinel-1 GRD de Level-1.

Em seguida a ferramenta *Calibration* (Figura 20), foi usada para trabalhar com os dados SAR de forma correta, sendo necessário realizar a calibração radiométrica que converte a intensidade de retroespalhamento recebida em σ^0 , considerando o ângulo de incidência, níveis de brilho entre outras características, tornando possível realizar a conversão de números digitais (ND) em retroespalhamento (σ^0) em decibéis (dB), processo esse realizado pelo próprio satélite, que identifica quais correções que serão necessárias realizar de acordo com os metadados do produto (Veci 2016).

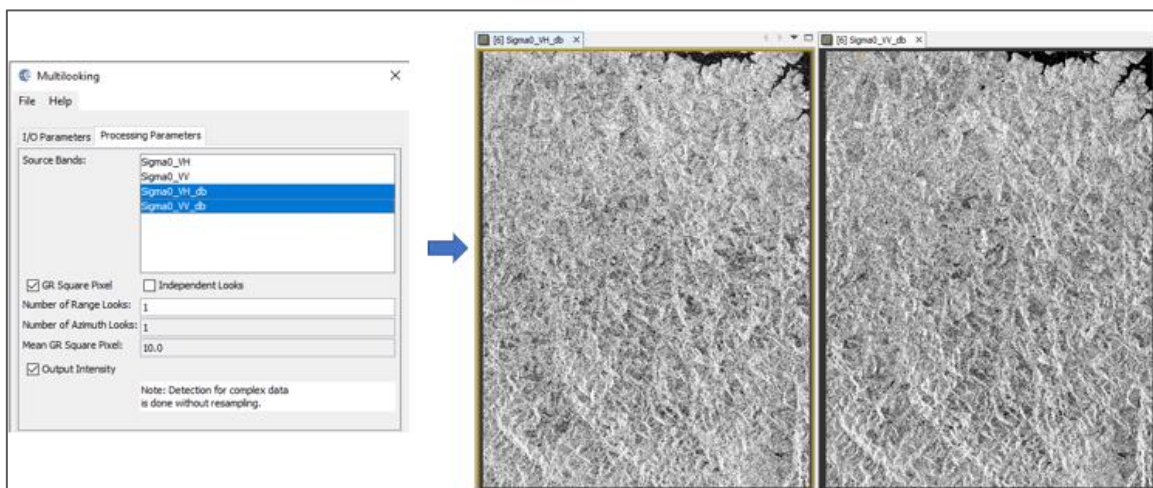
Figura 20- Calibração das polarizações VH e VV



Fonte o autor (2023).

Para reduzir a imagem com aspectos de ruídos pontilhados com uma aparência salpicada fez-se necessário utilizar o *Multilooking* (Figura 21), que envolve conversão de alcance inclinado para alcance terrestre, trazendo dados dos pixels de tamanho nominal com menos ruídos removendo manchas e suavizando as imagens (ENVI, 2020).

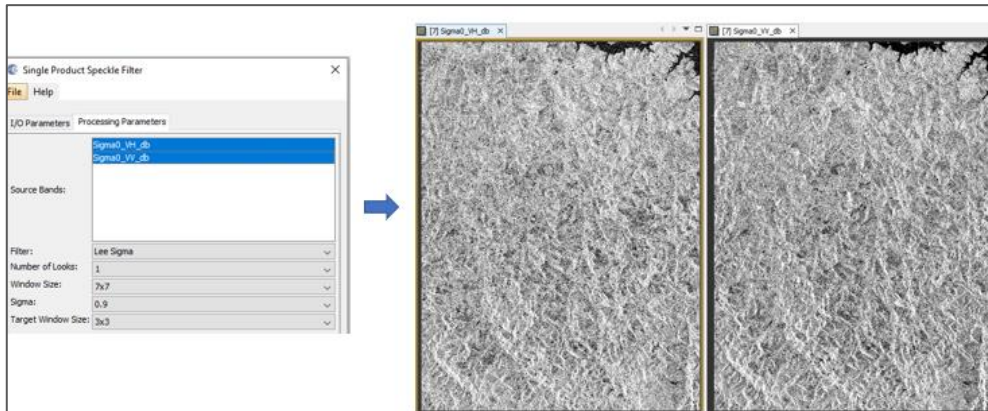
Figura 21- Multilooking / remove manchas e suavizando as imagens.



Fonte: o autor (2023).

As imagens de radar são pontilhadas de ruído, por causa das interferências que o sinal sofre ao refletir na superfície. Esse ruído é chamado de *Speckle* (pontilhado) (SANO, et al, 2020; Moreira et al 2013), e pode ser amenizado com a ferramenta *Speckle Filtering* (Figura 22), que implementa o algoritmo do filtro de Lee (LEE, 1980).

Figura 22- Speckle Filtering de Lee Sigma / reduz os aspectos desfocados da imagem.

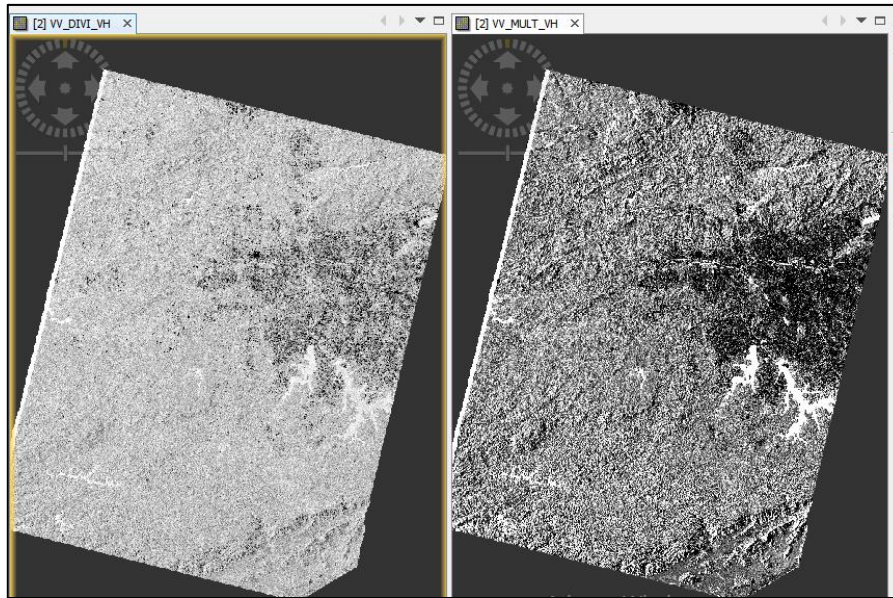


Fonte: o autor (2023).

Segundo Braum (2020) após a utilização dos filtros os coeficientes de retroespalhamento poderá chegar a números que variam entre -35 dB a +10 dB. Portanto foi utilizada a ferramenta *Range Doppler Terrain Correction Operator*, que utiliza dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), para a corrigir as distorções causadas pela elevação do terreno. Além disso, é realizada uma interpolação por vizinho mais próximo para representar o terreno com resolução espacial de 30m, em um sistema de projeção ‘*UTM Zone 23, South / World Geodetic System 1984*’, (VECI, 2016).

Com a configuração de bandas em dB nas polarizações VV e VH, foi realizada as operações de divisão (σ^0/σ^0) e multiplicação ($\sigma^0*\sigma^0$), usando a ferramenta *Band Mats* (BRAUN, 2020).

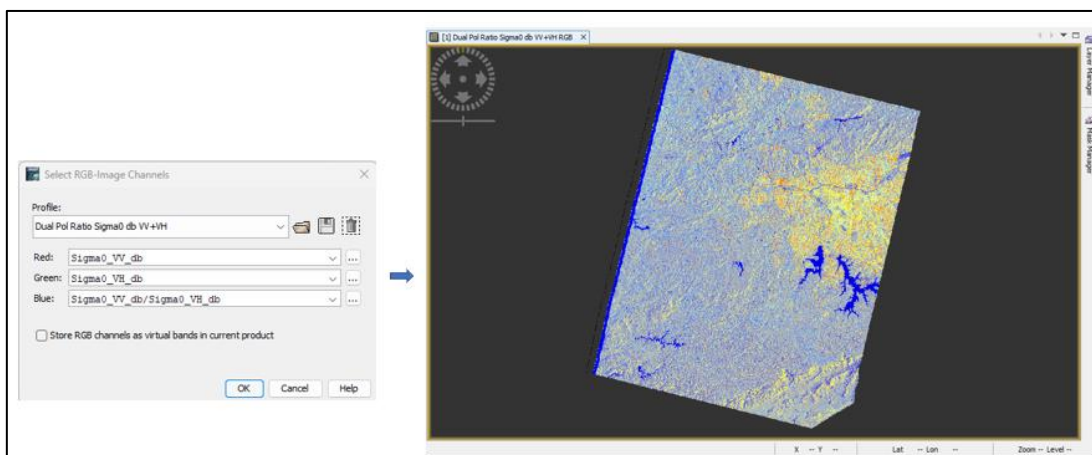
Figura 23- Resultado das operações de divisão (σ^0/σ^0) e multiplicação ($\sigma^0*\sigma^0$) das polarizações.



Fonte: O autor (2023).

Para a composição de bandas das cenas do Sentinel 1, a ferramenta *RGB Image Window*, tem como opções definir os canais RGB para uma nova exibição de imagem, com perfis RGB pré-definidos ou podendo criar e armazenar novos perfis temporários (ESA 2023).

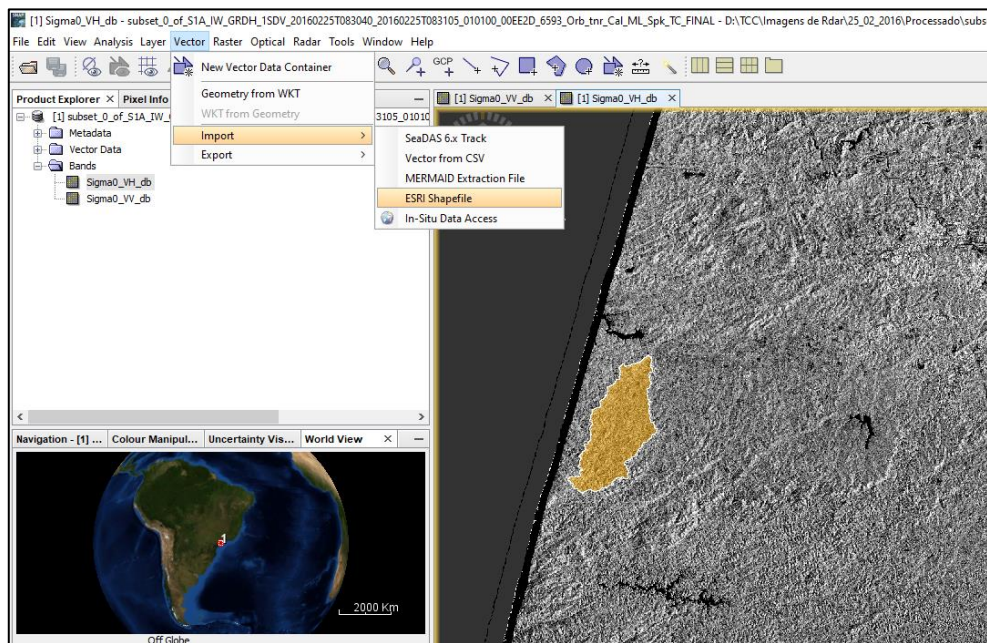
Figura 24- Ferramenta *RGB Image Window*



Fonte: O autor (2023).

Para obter os dados somente na área de interesse, foi utilizada a ferramenta *Vector/Import/ENSRI Shapfile*, para adicionar o perímetro da área de estudo sobre a cena do Sentinel-1.

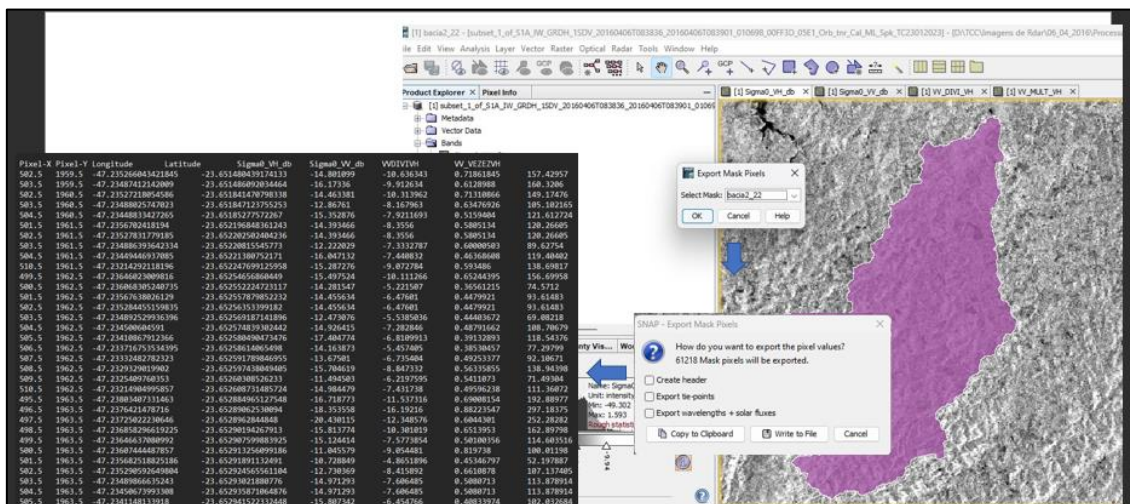
Figura 25- Ferramenta *Vector*- Introdução da área de estudo.



Fonte: O autor (2023).

Com as ferramentas *Export of pixels within a polygon/ Export Mask Pixels*, foram usadas para exportar dados estatísticos da área de estudo, que contém a posição x e y de um pixel, suas coordenadas geográficas, bem como os valores de pixel das diferentes bandas, permitindo uma avaliação sistemática dos valores de pixel fora do SNAP (Figura 25).

Figura 26- Exportação dos dados na região de interesse.

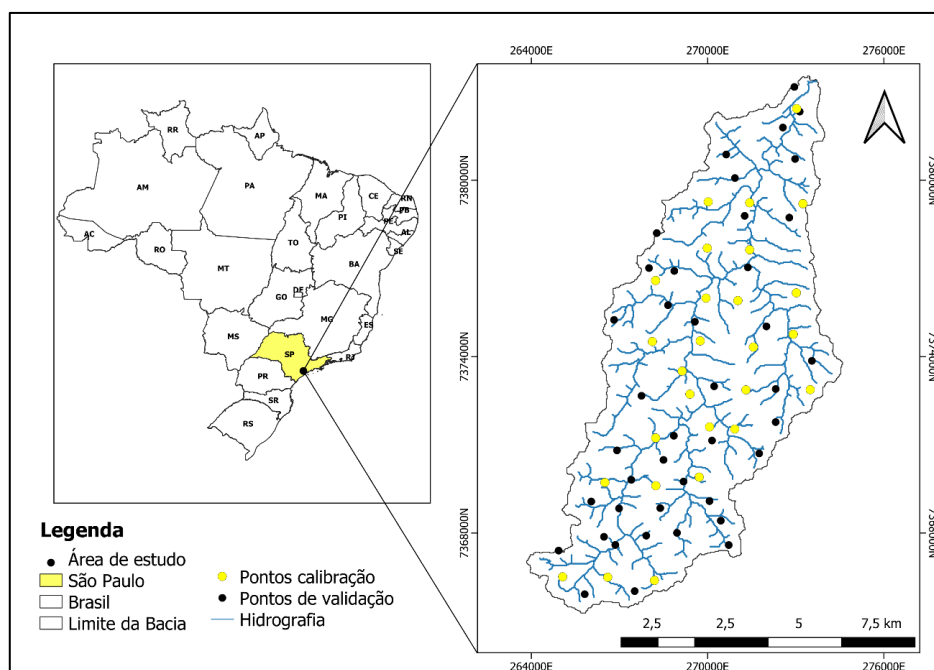


Fonte: O autor (2023).

4.6 Modelagem com Regressão Linear Múltipla

Para calibrar o modelo, foram utilizadas 42 amostras de MOS coletadas no interior da bacia (Figura 26). Para a Regressão Linear Múltipla foram utilizadas como variáveis independentes as polarizações VV, VH e as combinações: VV*VH e VV/VH.

Figura 27- Pontos amostrados de calibração e validação.



Fonte: O autor (2023).

A estratégia de seleção das variáveis foi o método *Stepwise* e o software utilizado foi o SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) v. 23 com nível de 5% de significância.

Para verificar a validade do modelo foi utilizado um outro conjunto de dados amostrados com 27 pontos (Figura 26) e utilizado o teste t pareado para comparar as médias entre os valores preditos pelo modelo e os observados, também com 5% de significância.

5 Resultados e Discussão

A tabela 3 mostra as médias dos dados dos coeficientes de retroespalhamento (σ^0) nas polarizações VH e VV a divisão VV/VH e o produto VV*VH.

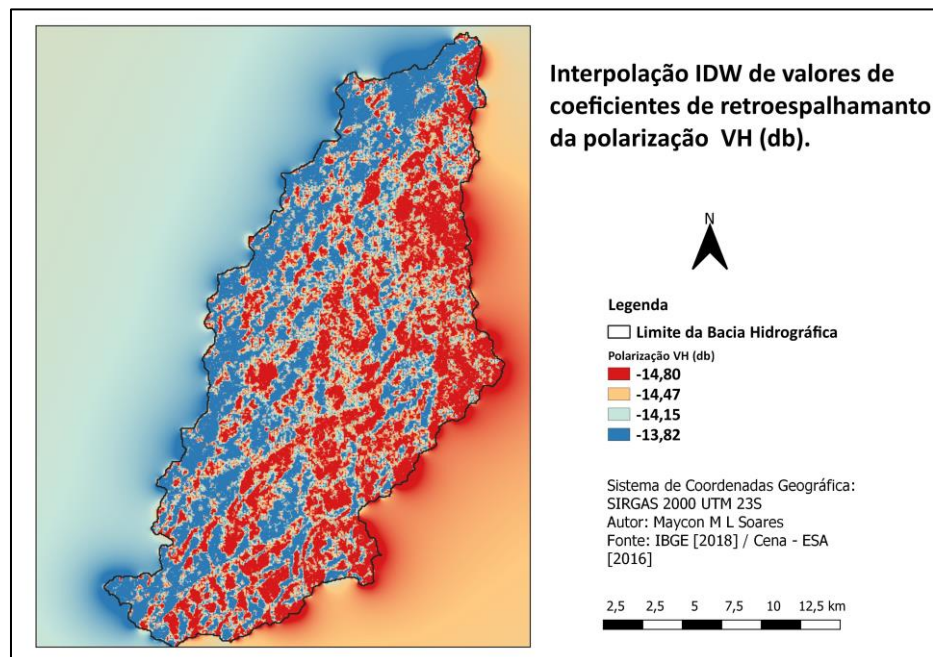
Tabela 3- Valores médios dos coeficientes de retroespalhamento do ano de 2016

| MESES | VH | VV | VV/VH | VV*VH |
|-----------|----------|---------|--------|----------|
| Janeiro | -15,2967 | -9,5505 | 0,6229 | 149,0337 |
| Fevereiro | -14,4390 | -8,7460 | 0,6024 | 129,3997 |
| Março | -14,8613 | -9,0177 | 0,6036 | 136,4826 |
| Abril | -14,4455 | -8,5289 | 0,5856 | 127,0264 |
| Maió | -14,3114 | -8,6662 | 0,6027 | 126,9205 |
| Junho | -15,2503 | -9,3676 | 0,6101 | 147,1538 |
| Julho | -15,5381 | -9,6174 | 0,6156 | 154,2010 |
| Agosto | -15,7176 | -9,7951 | 0,6195 | 158,7132 |
| Setembro | -15,2578 | -9,3853 | 0,6124 | 145,2785 |
| Novembro | -15,6129 | -9,7605 | 0,6223 | 154,6603 |
| Dezembro | -14,6135 | -8,8493 | 0,6026 | 131,0727 |

Fonte: O autor (2023).

A Figura 27 apresenta a interpolação *Inverse Distance Weighting* (IDW), mostrando a distribuição espacial dos valores médios para os coeficientes de retroespalhamento na polarização VH (db), caracterizados com visualização em falsa cor, do mês de maio de 2016.

Figura 28- Coeficientes de retroespalhamento VH (db) interpolado.



Fonte: O autor (2023).

A Regressão Linear Múltipla convergiu para o seguinte modelo:

$$MOS = 32,08 + 0,36 * VV - 0,27 * (VV * VH)$$

Com $R^2 = 0,32$ e significância de $p = 0,002$.

O modelo mostra que a polarização VV e o produto $VV*VH$ foram significativas ($p < 0,05$), com um coeficiente de determinação de 32% ($R^2 = 0,32$), ou seja, as variáveis preditoras explicam 32% da variação da MOS nessa amostra de dados.

Com o modelo ajustado, foi realizado o teste t pareado com a amostra de validação ($n = 27$). A Tabela 4 mostra as estatísticas para os dois conjuntos de dados:

Tabela 4- Estatísticas descritivas das duas amostras.

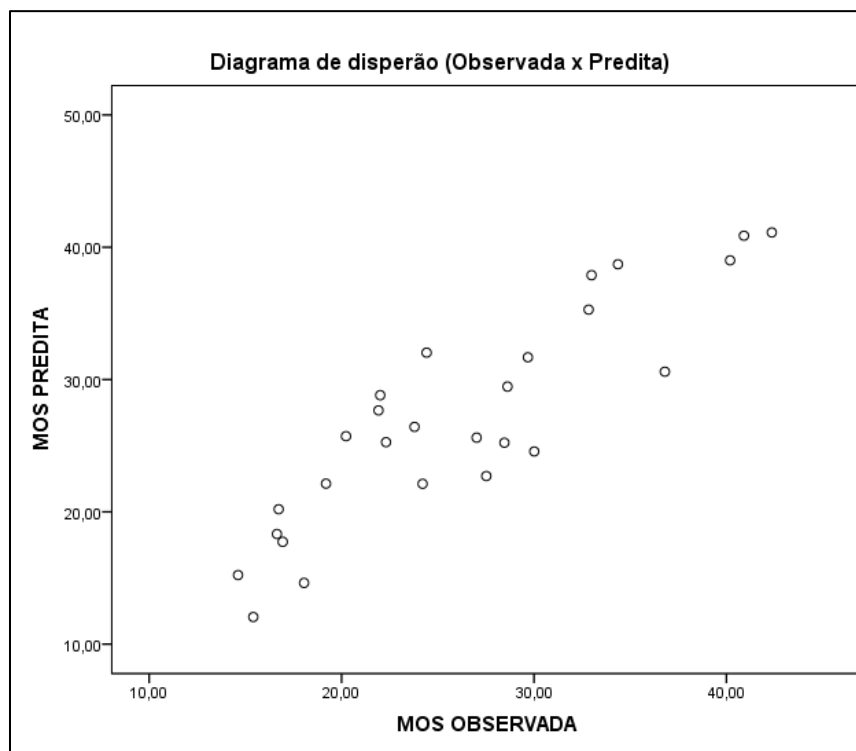
| | Média | N | Desvio padrão | Erro Padrão |
|----------------------|--------------|----------|----------------------|--------------------|
| MOS Observada | 26,2307 | 27 | 8,1213 | 1,5629 |
| MOS Predita | 27,0786 | 27 | 8,1684 | 1,5720 |

Fonte: O autor (2023).

A (MOS Predita) da modelagem teve uma média maior do que a média observada. O teste de correlação de Pearson mostrou uma correlação significativa ($r = 0,891$; $p < 0,00$)

entre os valores observados e os preditos. A Figura 29 mostra o diagrama de dispersão entre os valores observados e os preditos pelo modelo de regressão.

Figura 29- Gráfico de dispersão



Fonte: O autor (2023).

A tabela 6 mostra o resultado do teste t pareado, com a média das diferenças entre os dados observados e os preditos, o desvio padrão das diferenças (DP), o Erro Padrão das diferenças (EP), o Intervalo de Confiança (IC) de 95% da estimativa da diferença, a estatística t, os graus de liberdade (gl) e o valor de p (Valor-p)

Tabela 5- Teste t para amostras pareadas

| | Média | Dp | EP | IC (Inf) | IC (Sup) | t | gl | Valor-p |
|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|
| Diferença | -0,8478 | 3,8026 | 0,7318 | -2,3521 | 0,6564 | 1,159 | 26 | 0,2570 |

Fonte: O autor (2023).

Como o valor de $p = 0,2570$, a hipótese nula não foi rejeitada, ou seja, o resultado mostra que as diferenças observadas não são significativas ao nível de 5%, o que garante a validação do modelo.

6 Considerações finais

Estudos que envolvem a modelagem de dados SAR que utilizam a banda C para atributos do solo, já foram relatados e estudados por diversos trabalhos. Novais (2021) utilizou dados SAR do Sentinel-1 e dados do Sentinel-2 para realizar a modelagem pelo modelo de regressão linear múltipla para gerar índices de umidade do solo do Distrito Federal. Segundo Martins (2012), dados de radar foram usados para analisar a degradação do solo causada por incêndios florestais sobre a composição florística e estrutural de regiões da floresta amazônica e utilizou coeficientes de retroespalhamento das polarizações VH e VV afim de modelar a biomassa seca acima do solo dos elementos arbóreos (AGB).

Outro caso como de Yang e Guo (2019), que estudaram a variação temporal da relação de solo-vegetação através de dados SAR do Sentinel-1 usando modelagem de dados do solo em regiões úmidas invadidas, já Teixeira (2020) realizou processamentos e análises de dados de imagens do Sentinel-1 (SAR) para avaliar a evolução da umidade do solo em áreas agrícolas e em torno da área da bacia do rio Arade e estudou o efeito da evolução da cobertura vegetal após queimadas na região.

A combinação dos dados SAR do Sentinel-1, com seus coeficientes de retroespalhamento como destacado por Novais (2021), Martins (2012) e Yang e Guo (2019), mostra a relevância e potencial significativo, tanto para a modelagem da Matéria Orgânica do Solo (MOS), quanto para o estudo de mapeamento digital do solo (DSM).

Esse estudo se propôs modelar a matéria orgânica do solo (MOS) com imagens de Radar de Abertura Sintética-SAR, em uma bacia hidrográfica utilizando dados de retroespalhamento, para a verificação da possível adequação do modelo de regressão linear múltipla para a estimativa da (MOS) tendo as diferentes polarizações em VV e VH.

Os resultados dos dados do SAR para a modelagem da MOS combinado com a alta resolução espacial e temporal do Sentinel-1, se mostra como uma forma de contribuição para as melhorias de modelos para o DSM, quando usadas para diversas áreas do uso do solo.

REFERÊNCIAS

SCHIAVETTI, A.(org.); CAMARGO. A F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações.** Ilhéus, Ba: Editus, 2002. Disponível em: <http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf>. Acesso em: 09 junho 2023.

ANA, **Catálogo de Metadados da ANA.** Divisão de bacias. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 06 junho 2023

ANDRADE, A. M. et al **deteção de variações na superfície da geleira grey, campo de gelo patagônico sul, utilizando dados sar cosmo-skymed 2019** | Galoá Proceedings. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/deteccao-de-variacaoes-na-superficie-da-geleira-grey--campo-de-gelo-patagonico-sul--utilizando-dados-sar-cosmo-skymed>>. Acesso em: 02 junho. 2023.

ARROUAYS, D.; LAGACHERIE, P; HARTEMINK, A. E. 2017. **Digital soil mapping across the globe.** Geoderma Regional. v. 9, p. 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.002>

BRAUM, A. 2020. **Sentinel-1 Toolbox. Sinergetc use of radar and aptical data.** Disponível em: <http://step.esa.int/main/>, Acesso em: 02 junho 2022.

COSTA, J. A. L. et al. **Avaliação de dados de radar do sensor SAR-R99B no mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Central, município de Manaus, AM.** 2011. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4514> Acesso em :19 junho 2023

DAEE – **Departamento de Água e Energia Elétrica.** Dados históricos de chuva. Disponível em: <http://sibh.dae.sp.gov.br/>, Acesso em: 5 junho 2023.

ELACHI. G.W. C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing.** xvii + 413 pp. Chichester, New York, 1987, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley. ISBN 0 471 84810 7. Geological Magazine, v. 125, n. 4, p. 467–467, 1 jul. 1988.

ENVI, **Sentinel-1 Intensity Analysis in ENVI SARscape Tutorial.** 2020. Disponível em:<<https://www.13harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/Sentinel1IntensityAnalysisTutorial.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2023.

ESA - **Open Access Hub.** 2020. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu>> Acesso em: 5 janeiro 2023.

FAGERIA, KUMAR, N. et al. **Documentos 197 Qualidade do Solo e Meio Ambiente**. 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/214941/1/doc197.pdf>. Acesso em: 2 junho. 2023.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2007.

GOMES, M. F. **Avaliação de dados RADARSAT-1 e CBERS-2 para estimativa da estrutura do Cerrado: uma abordagem utilizando dados alométricos e históricos**. 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-74SNG7> Acesso em 22 maio 2023

GRASS GIS - **Bringing advanced geospatial technologies to the world**. GRASS GIS 8.0.3dev Reference Manual. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/>. Acesso em: 08 junho 2023.

HILLEBRAND, F. L. et al. **Mapeamento do Gelo Marinho na Península Antártica com Imagens Sentinel 1A**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 42, n. 2, p. 59-71, 2019.

IBGE, **Portal de mapas do**. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 7 junho 2023.

INPE, **Topodata** - banco de dados geomorfométricos do brasil, 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>. Acesso em: 6 junho 2023.

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

KAYABOL, K.; ZERUBIA, J. **Unsupervised Amplitude and Texture Classification of SAR Images With Multinomial Latent Model**. IEEE Transactions on Image Processing, v. 22, n. 2, p. 561–572, 1 fev. 2013.

KUPLICH, T. M. **Estudos florestais com Imagens de radar**. Revista Espaço e Geografia, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 65–90, 2022.

LEE, J.-S. **Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. PAMI-2, n. 2, p. 165–168, mar. 1980.

LIMA, M. M. **Uso de imagens Sentinel para estimativa do estoque de carbono e biomassa acima do solo no bioma Caatinga**. Repositorio.ufc.br, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58011> Acesso em 22 abril 2023.

LOPES, E. R. N. et al. **Modelagem ambiental de bacias hidrográficas: caracterização morfológica e pedológica da bacia do rio Una–Ibiúna, Brasil.** *Geosul*, v. 33, n. 66, p. 105-127, 2018.

LORENZ, K.; LAL, R. **Biogeochemical C and N cycles in urban soils.** *Environment International*, v. 35, n. 1, p. 1–8, jan. 2009,

MARTINS, F. S. R. V. **Caracterização e estimativa de biomassa aérea de florestas atingidas pelo fogo a partir de imagens polarimétricas ALOS/PALSAR.** (Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos) 2012

MELO, D. H. C.T. B; MENDONÇA, L.F. F; OLIVEIRA, J. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto.* **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 2, p. 002-024, 2021.

MENESES, P. R; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MIELNICZUK, J. **Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas.** In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F.A. de O. (Ed). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.* Porto Alegre: Genesis, 1999. Cap. 2, p. 1-9.

MORAES, M. E. B. D, LORANDI, R., orgs. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas.** Ilhéus, BA: Editus, 2016, 283p. ISBN 978-85-7455-443-3.

MOREIRA, A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6–43, mar. 2013.

MULDER, V. L. et al. **The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review.** *Geoderma*, v. 162, n. 1-2, p. 1–19, abr. 2011.

MURA, J. C. et al. **Monitoramento de deformações de superfície em mina de ferro a céu aberto (N5W-Carajás) utilizando série temporal de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR), baseado em dados do satélite TerraSAR-X.** *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, v. 17, p. 911-918, 2015.

NOVAIS, J. J. **Modelagem de Dados de Sensoriamento Remoto para o Mapeamento Digital de Solos e Índice Relativo de Umidade dos Solos do Distrito Federal.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária Universidade de Brasília, 2021,250 p. Tese Doutorado.

NOVO, E.M.L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo. Editora Blucher, 2010.

NUNES, J. G. S.; UAGODA, R. **Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 2, p. 487–509, 7 abr. 2020.

OLIVEIRA, A. L. A. Q. DE. **Aplicação dos mínimos quadrados inteiros na interferometria SAR: estudo de caso em Singapura**. repositorio.ul.pt, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/10252> Acesso em: 2 junho 2023

ONDRASEK, G. et al. **Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications**. *Science of The Total Environment*, v. 658, p. 1559–1573, mar. 2019.

PARR, J. F. et al. **Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture**. *American Journal of Alternative Agriculture*, v. 7, n. 1-2, p. 5, jun. 1992.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. & KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo, Oficina de Textos. 2ª ed. 2015. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/livro/sensoriamento-remoto-da-vegetacao/>. Acesso em: 14 junho 2023.

PROENÇA, C. Aet al. **Redes neurais artificiais para predição dos teores de matéria orgânica e argila do solo na região dos campos gerais utilizando espectroscopia de reflectância difusa**. 2012. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/168> Acesso em 22 maio 2023

ROMAGNOLI, F. et al. **Predição do Carbono Orgânico do Solo Utilizando Espectroscopia Vis-Nir, Plsr e Regressão Stepwise**. *Agrarian Academy*, v. 1, n. 01, 2014.

SANO, E. E.; MATRICARDI, E. A. T.; CAMARGO, F. F. **Estado da Arte do Sensoriamento Remoto por Radar: Fundamentos, Sensores, Processamento de Imagens e Aplicações**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, p. 1458–1483, 30 dez. 2020.

SILVA, A. G. P. et al. **Integração de imagens ópticas e SAR com processamento em nuvem no mapeamento de uso e cobertura da terra no Cerrado**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/814> Acesso em :19 maio 2023.

SNAP Download – STEP. Disponível em: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Acesso em 5 janeiro 2023.

TEIXEIRA, F. A. **Análise relativa da humidade disponível à superfície no concelho de Lagoa por deteção remota multiespectral-projeto**. 2020. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.1/15315>. Acesso em 14 junho 2023.

TEIXEIRA, W. F; SILVA, E.; KUX, H. J. H. **Avaliação de diferentes imagens e algoritmos para o mapeamento do uso e cobertura da terra do Campus da Universidade Federal do Amazonas**. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.14.49/doc/p0298.pdf> Acesso em 19 maio 2023.

VECI, L. **SENTINEL-1 Toolbox SAR Basics Tutorial**. 2016. Disponível em: <<http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2023.

VISCARRA, ROSSEL R. A.; WALTER, C. **Rapid, quantitative and spatial field measurements of soil pH using an Ion Sensitive Field Effect Transistor**. *Geoderma*, v. 119, n. 1-2, p. 9–20, mar. 2004.

Wali, E.; Tasumi, M.; Moriyama, M. 2020. **Combination of Linear Regression Lines to Understand the Response of Sentinel-1 Dual Polarization SAR Data with Crop Phenology**—Case Study in Miyazaki, Japan. *Remote Sensing*. v. 12, n. 1, p. 1-17.

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

Yang, R-M.; Guo, W-W. 2019. **Using time-series Sentinel-1 data for soil prediction on invaded coastal wetlands**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 462, p. 1-14.

YUZUGULLU, O. et al. **Understanding Fields by Remote Sensing: Soil Zoning and Property Mapping**. *Remote Sensing*, v. 12, n. 7, p. 1116, 1 abr. 2020.