



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Curso de Licenciatura em Biologia Marinha Aquática e Costeira

Culminação de Estudos II

Variante de Investigação

**Análise da Biomassa Acima do Solo do Mangal a partir de Imagens de Radar do Sensor
ALOS-2/PALSAR-2 na Baía de Maputo**

Autora:

Odette Buanamade

Maputo, Outubro de 2025



Faculdade de Ciências
Departamento de Ciências Biológicas
Curso de Licenciatura em Biologia Marinha Aquática e Costeira
Culminação de Estudos II
Variante de Investigação

**Análise da Biomassa Acima do Solo do Mangal a partir de Imagens de Radar Sensor
ALOS-2/PALSAR-2 na Baía de Maputo**

Supervisor:

Doutor. Hugo Mabilana Eng.

Agradecimentos

Em Nome de Allah, O Clemente, O Misericordioso!

Gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, que me apoiaram incansavelmente ao longo destes anos de estudo, proporcionando-me todas condições necessárias e mostrando paciência inabalável. Sua dedicação e apoio foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Gostaria de agradecer imensamente ao meu supervisor, Doutor engenheiro Hugo Mabilana pelo apoio, sugestões e acompanhamento que prestou para melhorar o meu trabalho e a professora Doutora Célia Macamo e a Doutora Vilma Machava pelo apoio prestado.

Quero expressar minha gratidão aos meus professores de preparação para os exames de admissão do Polo Ciências. Sua dedicação e orientação foram de grande importância para o meu sucesso. Agradeço por todo o conhecimento transmitido e pela força que me concederam durante os estudos.

Agradeço também ao meu esposo, Issufo José Juma Sumbane, por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, por seu apoio incondicional e por ser uma fonte constante de motivação e encorajamento. Sua presença significou muito para mim e sou grata por tê-lo ao meu lado.

Não posso deixar de mencionar a minha querida amiga, Ana Marisa Duarte, por ser uma verdadeira ligação metálica durante os estudos. Sua amizade e apoio foram inestimáveis e sou grata por compartilhar momentos preciosos juntas.

Agradeço também à minha amiga Aceleit Chico, a Ayát Momade, a Tânia Bule, pela companhia e amizade. Vocês trouxeram alegria e camaradagem à minha jornada acadêmica.

Ao Marcelo Levene e Simão Jaime, pelo apoio incondicional para a realização deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus colegas de turma de 2018, pela união e força que compartilhamos ao longo do percurso. A presença e colaboração de vocês tornaram a experiência de aprendizado mais enriquecedora.

Que todos vocês sejam agraciados com bênçãos contínuas em suas vidas. Muito obrigada!

Declaração de Honra

Eu, Odette Buanamade, declaro sob compromisso de honra, que este trabalho de investigação científica, submetido como requisito para a obtenção do grau de Licenciatura em Biologia Marinha Aquática e Costeira, é da minha inteira e exclusiva autoria, com o acompanhamento e assistência do meu supervisor.

A investigação e a redação deste trabalho foram conduzidas de forma autónoma, com base em observações, análises e interpretações próprias, recorrendo exclusivamente a fontes fidedignas, devidamente identificadas e citadas em conformidade com as normas do departamento de ciências biológicas.

Reconheço com gratidão o contributo do meu supervisor, cuja orientação foi essencial ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Todavia, declaro que a responsabilidade final pelo conteúdo e pelas conclusões apresentadas neste trabalho é exclusivamente minha.

Tenho plena consciência de que qualquer tentativa de plágio, fraude ou má conduta académica constitui uma infração grave aos princípios éticos e científicos que regem a atividade académica, e estou disposta a arcar com todas as consequências caso tais atos sejam comprovados.

Por meio desta declaração, reitero de forma inequívoca, o meu compromisso com a ética, integridade académica e a busca do conhecimento científico pautado por elevados padrões de rigor, honestidade e responsabilidade.



(Odette Buanamade)

Resumo

Os mangais são ecossistemas costeiros únicos, compostos por árvores e arbustos adaptados à salinidade, que crescem ao longo da zona costeira, entre as marés baixa e alta, e ao longo das margens dos rios. Uma das principais causas da degradação dos mangais em Moçambique é a extração total ou parcial das árvores para uso como combustível doméstico e madeira. Não há registo de construção de modelos de regressão linear que expressem a biomassa do mangal por meio de sensores de radar em Moçambique. Daí que surge a necessidade de avaliar as imagens de radar do sensor ALOS-2/PALSAR-2 no mapeamento da biomassa acima do solo na floresta de mangal do rio Maputo. Foram usados parâmetros biofísicos (altura da árvore, diâmetro acima do solo e volume) medidos em 115 quadrículas em março e abril de 2021. Os parâmetros biofísicos foram usados para perceber a relação entre as variáveis e o coeficiente de retroespalhamento das polarizações HH e HV da banda-L ALOS PALSAR-2. Foi estimada a biomassa acima do solo através de equações alométricas específicas para cada espécie. Utilizaram-se coeficientes de retroespalhamento das polarizações HH e HV do ALOS-2 PALSAR-2 do ano de aquisição 2021 para a construção de modelos de regressão linear múltipla. Os resultados indicam a presença de quatro (4) espécies de mangal no rio Maputo: A *Avicennia marina* 51 085 árvores individuais, *Rhizophora mucronata* com 3657, *Ceriops tagal* com 191 e a *Bruguiera gymnorhiza* com 697 árvores individuais. A correlação entre os parâmetros biofísicos e o coeficiente de retroespalhamento foi bastante baixo, com o coeficiente de Person de 0.151 que corresponde à 15.1% para o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH e -0.010 para o coeficiente de retroespalhamento na polarização HV. O modelo de regressão mostra um R^2 0.051 que corresponde à 5.1 % com uma média de 528172.15 Mg/ha. No entanto, estes resultados indicam que a relação de regressão linear múltipla e as variáveis derivadas das polarizações do radar possuem capacidade limitada para predizer com precisão a biomassa acima do solo, resultando na construção de modelos com baixo coeficiente de determinação (R^2), apesar destes resultados o potencial das imagens de ALOS-2/PALSAR-2 para estimar a biomassa não pode ser negligenciado.

Palavras-Chave: coeficiente de retroespalhamento; modelo de regressão; polarização HH e HV.

Abstract

Mangrove are unique coastal ecosystems composed by trees and shrubs adapted to salinity that grow along the coastal zone, between low and high tides and along riverbanks. The principal cause of mangrove degradation in Mozambique is the total or partial extraction of trees for use as domestic fuelwood and timber. In Mozambique, do not exist research of multiple linear regression using radar sensors. Hence, the need to evaluate radar images from ALOS-2/PALSAR-2 sensor in mapping aboveground biomass in the mangrove forest on the Maputo River. Biophysical parameters (tree height, aboveground diameter, volume, and biomass) that in 115 grids in 2021 March and April. The correlation between the variables and the backscattering coefficient of the HH and HV polarizations of the L-band estimated through biophysical parameters. The aboveground biomass estimated through allometric equations specific for each species. Backscattering coefficients of the HH and HV polarizations of ALOS-2/PALSAR-2 used to build multiple linear regression model. The results indicate the presence of four (4) mangrove species in the Maputo river: A *Avicennia marina* with 51 085 individual trees, *Rhizophora mucronata* with 3657, *Cerriops tagal* with 191 e a *Bruguiera gymnorhiza* with 697. The correlation between the biophysical parameters and the backscatter coefficient was weak low, with the Person coefficient of 0.151 corresponding to 15.1% for the backscatter in the HH polarization and -0.010 for the backscatter coefficient in the HV polarization. The model shows an R^2 of 0.051 corresponding to 5.1% with an average of 528172.15 Mg/ha. However, these results indicate that the multiple linear regression relationship and the variables derived from radar polarizations have limited capacity to accurately predict aboveground biomass, resulting in the construction of models with a low coefficient of determination. Despite these results, the potential of images ALOS-2/PALSAR-2 to estimate biomass cannot be neglected.

Keywords: backscatter coefficient; regression model, HH and HV polarization.

Lista de abreviaturas

AGB = Above-Ground Biomass (biomassa acima do solo)

ALOS = Advanced Land Observing Satellite (Satélite avançado de observação de terra)

CF = Fator de calibração

DAP = Diâmetro e Altura do Peito

dB = decibéis

DN = Digital Number (Número digital)

HH = polarização Horizontal recepção Horizontal

HV = polarização Horizontal e recepção Vertical

JAXA = Japan Aerospace Exploration Agency (Agência de Exploração Aeroespacial do Japão)

m = metros

m² = metros quadrados

Off-nadir = número de graus que o sensor varia de uma visão vertical ao apontar diretamente para baixo da plataforma

PALSAR = Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (Radar de abertura sintética da banda L).

RADAR = Radio Detection Ranging (deteção e localização através de ondas de rádio)

REM = Radiação eletromagnética

RS = Remote Sensing (sensoriamento remoto)

SAR = Synthetic Aperture Radar (radar de abertura sintética)

SNAP = Sentinel Application Platform

σ° = Coeficiente de retroespalhamento

Lista de figuras

Figura 1: Ilustração dos elementos do RS. Fonte: Novo e Ponzoni (2001).....	19
Figura 2: Espectro eletromagnético. Fonte: Brito (2013).....	20
Figura 3: Ilustração dos sensores passivo a esquerda e a direita o sensor ativo. Fonte: Barros (2023).....	20
Figura 4: Bandas da região do micro-ondas. Fonte: Dutra et al, 2003.	21
Figura 5: Ilustração da penetração dos comprimentos de onda nas copas das bandas de radar (DLR, 2013).....	22
Figura 6: Ilustração do retroespalhamento do radar, Natural Resources Canada, (2015a.).	22
Figura 7: Polarização HH e polarização HV. Fonte: (autora).	25
Figura 9: Zonação do mangal na região sul de Moçambique (Balidy,2013).	28
Figura 10: Localização do mangal do rio Maputo.....	31
Figura 11: Fluxograma do pré-processamento das imagens de radar. fonte: (Simard, 2019).	34
Figura 12: Mapa da biomassa acima do solo do mangal.....	43

Lista de quadros

Quadro 1: Equações alométricas usadas para o cálculo da biomassa	33
Quadro 2: Detalhes das imagens ALOS-2/PALSAR-2 utilizadas	33

Lista de tabelas

Tabela 1: Matriz da correlação de Pearson dos diferentes parâmetros biofísicos do mangal (n = 115 quadriculas).....	40
Tabela 2: Relação entre HH e HV e os parâmetros biofísicos do mangal.....	40
Tabela 3: Sumário da estatística descritiva da biomassa acima do solo de espécies mistas do mangal com n= 115.....	42
Tabela 4: Modelo de regressão de espécies mistas baseando-se na biomassa de mangal	42

Lista de gráficos

Gráfico 1: Árvores individuais de mangais.	39
Gráfico 2: AGB (Mg/ha) e coeficiente de retroespalhamento (dB), polarização HH e HV	41

Índice

Agradecimentos	2
Declaração de Honra.....	3
Resumo	4
Abstract.....	5
Lista de abreviaturas	6
Lista de figuras.....	7
Lista de quadros	7
Lista de tabelas.....	7
Lista de gráficos.....	7
1. Introdução.....	11
1.1. Problema.....	13
1.2. Pergunta de pesquisa	13
1.3. Justificativa.....	13
2. Objetivos.....	15
2.1. Geral:.....	15
2.2. Específicos:	15
3. Hipóteses	16
3.1. Nula:	16
3.2. Alternativa:.....	16
4. Revisão bibliográfica.....	17
4.1. Mangal.....	17
4.1.1. Benefícios do mangal.....	17
4.1.2. Mangal em Moçambique	18
4.2. Fundamento teórico do sensoriamento remoto	19
4.2.2. Sistema de sensores.....	19
4.3. Radar	21
4.4. Comprimento de onda e penetração nas copas das árvores.....	21
4.5. Radar de Abertura Sintética (SAR).....	23
4.6. Coeficiente de retroespalhamento	23
4.7. Parâmetros relacionados ao sistema de sensor	24
4.7.1. Frequência ou comprimento de onda.....	24
4.7.2. Polarização	24
4.7.3. Ângulo de incidência	25

4.7.4.	Direção de visada.....	26
4.8.	Parâmetros do alvo	26
4.8.1.	Rugosidade da superfície	26
4.8.2.	Constante dielétrica.....	26
4.9.	Sensor ALOS-2/PALSAR-2	27
4.9.1.	Características gerais	27
4.10.	Comportamento espectral dos alvos.....	27
4.11.	Floresta de mangal.....	28
4.12.	A banda-L na estimativa da biomassa acima do solo do mangal	29
5.	Metodologia.....	30
5.1.	Área de estudo.....	30
5.2.	Material	31
5.3.	Procedimentos metodológicos.....	31
5.4.	Coleta de dados do campo.....	32
5.5.	Estimativa da biomassa acima do solo.....	32
5.6.	Imagens usadas.....	33
5.6.1.	Processamento das imagens de radar ALOS-2/PALSAR-2	34
5.6.2.	Cálculo do Retroespalhamento	34
5.7.	Modelagem da Biomassa acima do solo em função do retroespalhamento	35
5.7.1.	Análises estatísticas	35
5.7.2.	Correlação	36
5.7.3.	Regressão linear múltipla.....	36
5.8.	Modelo de regressão.....	37
5.9.	Mapeamento da biomassa acima do solo	37
6.	Resultados.....	39
6.1.	Descrição das espécies	39
6.2.	Estatística dos parâmetros biofísicos do mangal.....	39
6.3.	Relação entre as polarizações HH e HV com os parâmetros biofísicos do mangal	40
6.4.	Modelagem e estimativa da biomassa usando dados do sensor ALOS-2/PALSAR-2 ..	41
6.5.	Mapa da biomassa	42
7.	Discussão	44
7.1.	Estimativa da biomassa acima do solo do mangal do rio Maputo a partir de equações alométricas específicas.....	44
7.2.	Parâmetros biofísicos	45
7.3.	Modelagem e estimativa da biomassa usando dados do sensor ALOS-2/PALSAR-2 ..	46

8.	Conclusão	48
9.	Limitações e recomendações	49
10.	Referências bibliográficas.....	50

1. Introdução

Os mangais são ecossistemas costeiros únicos, formados por árvores e arbustos adaptados a salinidade (Kathiresan e Bingham, 2001) e ocorrem na zona entre-marés das regiões tropicais e subtropicais (Litulo *et al.*, 2023) onde as temperaturas são quentes, crescem em deltas, estuários e lagoas ao longo da costa (Schilli *et al.*, 2024) e são reconhecidos como um dos ambientes mais produtivos do planeta (Kathiresan e Bingham, 2001)

Elas formam uma comunidade vegetal adaptada a condições extremamente variáveis de água, salinidade e oxigénio (Bandeira e Paula, 2014). Estas plantas desenvolveram adaptações especializadas para viver em ambientes com variação de salinidade e inundação causada pelas marés, ondas fortes, minerais anaeróbicos e solos orgânicos (Machava-António *et al.*, 2022).

Suas características notáveis incluem raízes expostas que emergem acima do solo para respiração, estruturas adicionais de suporte do caule, folhas que excretam sal, baixo potencial hídrico e alta concentração de sal dentro das células, que lhes permite manter um equilíbrio hídrico favorável em ambientes salinos e propágulos que se dispersam na água, uma forma de reprodução chamada viviparidade (Duke, 2011).

Globalmente existem aproximadamente 70 espécies de mangais (Schilli *et al.*, 2024) e esta distribuição global, a estrutura e as funções das florestas de mangal são determinadas por factores climáticos como a temperatura da água e períodos de precipitação (Litulo *et al.*, 2023).

Em Moçambique o mangal é maioritariamente encontrado nas regiões Norte e Centro onde grandes volumes de água doce são descarregados para o Oceano Índico (MITADER, 2015), nas províncias de Cabo Delgado, Nampula, Zambézia, Sofala, Gaza e Maputo (Barbosa *et al.*, 2001) e estima-se que a sua área seja de 302 735 ha (Erftemeijer, 2022). Podem ser encontradas nove espécies de mangais (Machava-António *et al.*, 2022; INOM, 2022) onde a composição e estrutura é influenciada pela disponibilidade de nutrientes, salinidade e elevação (Schilli *et al.*, 2024).

O mangal da Baía de Maputo, ocupa uma área de aproximadamente 18 000 ha e está concentrado nos estuários dos rios: Incomati, Maputo, Tembe, Umbeluzi e Matola (Bandeira e Paula, 2014). São registradas seis espécies de mangais na baía, nomeadamente: a (1) *Avicennia marina*, que é a mais abundante, apresenta pneumatóforos em formato de lápis e ocorre tanto no interior como no exterior da zona de mangais, a (2) *Rhizophora mucronata* que possui raízes de suporte, é

encontrada em riachos e canais ao longo da baía e tem uma menor tolerância à variação da salinidade, a (3) *Ceriops tagal* com raízes tipo joelho, e a (4) *Bruguiera gymnorhiza* são espécies intermediárias na zonation dos mangais, a (5) *Xilocarpus granatum* é menos comum ao longo da baía, mas é encontrada em abundância no estuário de Incomati e a (6) *Lumnitzera racemosa* é encontrada mais próxima à terra, onde há infiltração de água doce (Paula *et al.*, 2014).

Estima-se que cerca de 26% das florestas de mangal em todo o planeta estejam degradadas devido aos fatores antropogénicos (Polidoro *et al.*, 2010) e esta perda contribui significativamente para que ocorram as mudanças climáticas (Schilli, *et al.*, 2024). A perda de habitats de mangal e os serviços ecossistémicos associados têm consequências económicas diretas para as comunidades humanas, especialmente em áreas com baixa diversidade de espécies de mangal e ecossistemas menos resilientes à degradação (Polidoro *et al.*, 2010). O desmatamento e a degradação do mangal também resultam em um aumento significativo das emissões de gases de efeito estufa (Cuamba *et al.*, 2019).

O uso do sensoriamento remoto apresenta um grande potencial para fornecer informações valiosas no mapeamento da vegetação de mangal e no monitoramento de suas mudanças (Azlan e Othman, 2009). Esta técnica constitui uma excelente alternativa devido à sua capacidade de coletar informações em locais de difícil acesso (Vaiphsa, 2006), permitindo a realização de inventários de recursos, detecção de mudanças e seleção de inventário de locais para actividades como aquacultura (Green *et al.*, 2000). O monitoramento de um ecossistema dinâmico como os mangais requer medidas muito regulares (Luís, 2011). O sensoriamento remoto oferece oportunidades para mapear os parâmetros biofísicos e estruturais dos mangais, incluindo a biomassa e as reservas de carbono (Pham *et al.*, 2019). Os mangais encontram-se constantemente inundados pelas marés diárias, e as raízes que respiram acima do solo frequentemente dificultam as medições (Fatoyinbo e Simard, 2013).

Estimar a biomassa de uma floresta requer várias técnicas e aplicações científicas (Fassnacht *et al.*, 2014). Estimar a biomassa e o carbono armazenado pelos mangais tem grande importância para o desenvolvimento de estratégias de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, bem como para se beneficiar de incentivos económicos pela conservação e preservação dos mangais, como mecanismo de Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação das Florestas (REDD+) (Adame *et al.*, 2013). As imagens de radar são uma ferramenta chave para compreender

as mudanças que ocorrem nos mangais, em comparação com as imagens dos sensores ópticos, pelo facto das imagens de radar poderem gerar imagens mesmo com elevada cobertura de nuvens (Beneditti, 2010).

Este estudo visa analisar o potencial das imagens de radar na estimativa da biomassa acima do solo das florestas de mangais. Ao analisar adequadamente a biomassa acima do solo do mangal, será possível monitorar e propor medidas de gestão e conservação que contribuirão para a preservação desses ecossistemas produtivos, a proteção costeira e o uso sustentável dos recursos fornecidos por essas florestas.

1.1. Problema

A crescente pressão antropogénica sobre as zonas húmidas costeiras resulta em impactos que afetam os mangais e a sua biodiversidade (Cunha-Lignon e Kampel, 2011). As principais causas da degradação dos mangais em Moçambique é a extração da totalidade ou parte das árvores como uma fonte de combustível lenhoso doméstico e madeira (Paula *et al.*, 2014).

Analisar a biomassa acima do solo na floresta de mangal por meio de imagens de sensores ópticos é um grande desafio, devido à dificuldade que esses sensores têm em perceber as alterações que ocorrem nas florestas de mangal. As imagens de sensores ópticos são mais fáceis de interpretar e possuem diversas formas de processamento, porém são altamente suscetíveis a variações atmosféricas (sobretudo cobertura de nuvens), especialmente quando há presença de nuvens durante a aquisição das imagens o que é comum durante a época chuvosa (Beneditti, 2010).

1.2. Pergunta de pesquisa

As imagens de radar são capazes de detetar e estimar a biomassa acima do solo do mangal?

1.3. Justificativa

Mundialmente estão a ocorrer mudanças na estrutura do mangal, o monitoramento e mapeamento de mangais a partir de sensores de radar é de extrema importância, devido aos sensores ópticos serem extremamente vulneráveis a visibilidade atmosférica, ou seja, têm como limitante a presença de nuvens durante a captação de imagens (Beneditti, 2010; Garrafiel, 2018). Para proteger os mangais e a extensão dos serviços dos ecossistemas que eles proveem, é importante perceber a sua extensão, a sua escala e as condições em que eles se encontram (Schill *et al.*, 2024).

Não se tem conhecimento do monitoramento da biomassa acima do solo do mangal por meio de sensores de radar em Moçambique. Segundo Fatoyimbo e Simard (2013), Moçambique apresenta 101 Mg ha^{-1} da média da biomassa por hectare.

Este estudo é essencial para compreender a biomassa acima do solo no ecossistema do mangal, pois esses sensores são eficazes na identificação de diferentes tipos de uso do solo, tais como, urbanizações, corpos de água, desmatamentos, minerações e culturas agrícolas (Lopes e Lima, 2009). As imagens de sensores de radar podem fornecer resultados mais confiáveis da biomassa acima do solo do mangal (Pham e Yoshino, 2017). Isso permitirá propor medidas de gestão e conservação essenciais que contribuirão para a proteção costeira e o uso sustentável dos recursos fornecidos por essas florestas.

2. Objetivos

2.1. Geral:

- Avaliar os parâmetros biofísicos em ecossistema de mangal do rio Maputo, a fim de compreender a biomassa acima do solo usando imagens ALOS-2/PALSAR-2.

2.2. Específicos:

- Estimar a biomassa da floresta de mangal utilizando equações alométricas específicas;
- Determinar a eficácia das imagens de radar do sensor ALOS-2/PALSAR-2 para modelagem da regressão linear múltipla.

3. Hipóteses

As imagens do sensoriamento remoto são altamente eficazes para melhor perceber o ambiente terrestre (Meera Gandhi *et al*, 2015). Tanto o sensor óptico quanto o SAR são adequados para extrair informações de florestas homogêneas. O sensor óptico opera com comprimento de onda relativamente pequeno, da ordem de micrómetros, sendo necessário que as suas imagens sejam adquiridas em condições de ausência de nuvens ou de fumaças durante a passagem de satélites, e por se tratar de sensores que dependem de uma fonte externa de radiação eletromagnética (sensores passivos) estão sujeitos a interferência das condições de iluminação solar (Garrafiel, 2018). No entanto, o SAR apresenta várias vantagens em relação ao sensoriamento óptico, por não ser dependente das condições climáticas, permitir imageamento durante o dia e a noite, e penetrar na vegetação (Beneditti, 2010), considerando as vantagens em relação as imagens radar em relação às imagens ópticas, serão testadas as seguintes hipóteses:

3.1. Nula:

- A biomassa acima do solo da floresta de mangal não pode ser estimada pelas imagens do sensor de radar de abertura sintética (SAR).

3.2. Alternativa:

- A biomassa acima do solo da floresta de mangal pode ser estimada pelas imagens do sensor de radar de abertura sintética (SAR).

4. Revisão bibliográfica

4.1. Mangal

As florestas de mangal, são plantas que toleram grandes concentrações de sal (Richmond, 2011). É uma comunidade vegetal que coloniza as lagoas costeiras, os estuários e depressões dos deltas (Mariquale, 2018). Os mangais são definidos como plantas de formação vegetal litorânea, característica de regiões tropicais e subtropicais (Hughes e Hughes, 1992). O mangal cresce entre as marés baixa e alta ao longo de margens dos rios (Paula *et al.*, 2014) e desenvolve-se melhor em regiões onde as chuvas são mais regulares, as temperaturas são altas, a cobertura de nuvem é reduzida e os furacões e tufões são raros (Giri *et al.*, 2010).

Segundo Spalding e Leal (2021), os mangais são florestas perenes tolerantes ao sal que crescem em regiões entre-marés ao longo da costa, onde a água é calma e o sedimento é suficiente para que as raízes se fixem. A adaptação destas plantas em relação ao ambiente em que vivem inclui uma especialização estrutural, morfológica e reprodutiva única, como o sistema de raízes aéreas designados por pneumatóforos, folhas que excretam o sal e propágulos vivíparos que se dispersam na água (Kathiresan e Bingham, 2001)

4.1.1. Benefícios do mangal

O mangal é reconhecido como um berçário biológico marinho de elevada importância ecológica, albergando uma diversidade de espécies, adaptadas ao meio ambiente, incluindo variáveis climáticas hidrológicas e geológicas (Neves *et al.*, 2005).

Os mangais criam um ambiente único para abrigar diversas espécies como: insectos, répteis, peixes, moluscos, crustáceos, tubarões, crocodilos e dugongos e proporcionam conexões com muitos outros ecossistemas, possibilitando que criaturas maiores possam visitar e utilizar os mangais como berçários (Spalding e Leal 2021).

A complexidade das suas raízes, permite aos mangais mitigar os movimentos abruptos das marés, formando uma barreira natural que protege a costa contra tsunamis, ciclones e erosões e as comunidades costeiras adjacentes como os recifes de coral e tapetes de ervas marinhas (MITADER, 2015). Os mangais desempenham um papel crucial no sequestro de carbono e na provisão de serviços ecossistêmicos fundamentais (Bacar *et al.*, 2023).

As florestas de mangal podem ser mais eficientes em relação às outras florestas para converter o dióxido de carbono (CO₂), um gás de efeito de estufa em carbono orgânico armazenado ou carbono azul (Schill *et al.*, 2024).

Ecologicamente as florestas de mangal desempenham um papel crucial na formação do solo, pós apoiam este processo, na fotossíntese, na produção primária, no armazenamento do carbono, na provisão de habitat para berçário de peixes, aves e exportação de nutrientes (MITADER, 2015; Cohen *et al.*, 2013) e também têm um papel importante em relação à adaptação das mudanças climática, provêm resiliência costeira, reduzem os riscos de desastres através da proteção costeira e reduzem o impacto das tempestades (Schilli *et al.*, 2024; MITADER, 2015).

4.1.2. Mangal em Moçambique

A floresta de mangal em Moçambique possui cerca de 2909 km² (Fatoyimbo *et al.*, 2008). Mais de 60% da população vive na região costeira e são altamente dependentes de recursos e ecossistemas costeiros e marinhos para subsistência e rendimento (Conselho de Ministros, 2020). Estima-se que o mangal ocupe uma área de 302.735 ha (Erftemeijer, 2022) e está concentrado principalmente nas regiões centro e norte protegendo a costa (Bacar *et al.*, 2023).

Ocorrem cerca de nove (9) espécies de mangal nomeadamente: *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Ceriops tagal*, *Heritiera littoralis*, *Lumnitzera racemosa*, *Rhizophora mucronata*, *Sonneratia alba*, *Xylocarpus granatum* e *Xylocarpus moluccensis* (Bentjee & Bandeira, 2007; INOM, 2022).

O mangal é usado significativamente como meio de subsistência das comunidades moçambicanas (Macamo *et al.*, 2018), este fornece uma variedade de bens e serviços à comunidade incluindo produção de madeira, suporte para pesca comercial e de subsistência, aquacultura, produção de sal e controle da erosão da linha da costa (INOM, 2022; Neves *et al.*, 2005). A degradação do mangal é evidente nas principais cidades costeiras, sendo as causas antropogénicas as que mais degradam o mangal em Moçambique (Conselho de Ministros, 2020).

4.2. Fundamento teórico do sensoriamento remoto

4.2.1. Características gerais

O sensoriamento remoto (RS, Remote Sensing em inglês) consiste na obtenção de informações de um alvo sem ter acesso direto ao mesmo, utilizando plataformas terrestres, aéreas (balões, aeronaves tripuladas ou não) e orbitais (satélites artificiais) (Finatto, 2021).

Este método inclui dois sistemas principais: a aquisição de dados e a produção de informações (Neta, 2009). O funcionamento do sensoriamento remoto apresenta quatro elementos básicos: A radiação eletromagnética (REM), a fonte, o sensor e o alvo, onde a radiação eletromagnética é o elemento fundamental da técnica de sensoriamento remoto, a fonte da REM nos estudos dos recursos naturais corresponde ao Sol, a Terra e as antenas de micro-ondas, o sensor corresponde o instrumento que é capaz de coletar e registrar a REM emitida ou refletida pelo objecto e o alvo que corresponde ao elemento que se pretende extrair a informação (Novo e Ponzoni, 2001).

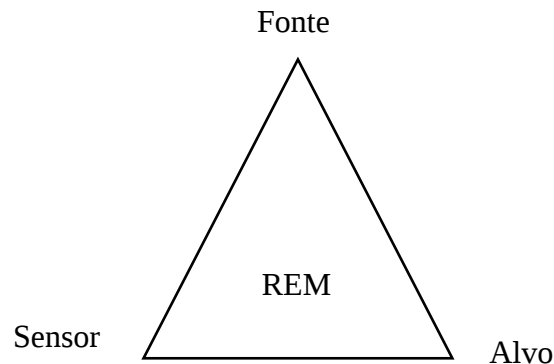


Figura 1: Ilustração dos elementos do RS. Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

O RS é uma ferramenta valiosa para gerar informações sobre recursos terrestres, tais como monitoramento da taxa de cobertura florestal e a estimativa credível dos stocks de carbono florestal (Monzon *et al.*, 2013). As técnicas do sensoriamento remoto que são validadas por ficheiros de dados são uma chave importante para identificar a extensão espacial e as condições das florestas de mangais (Schill *et al.*, 2024).

4.2.2. Sistema de sensores

Os sensores têm por finalidade receber a energia eletromagnética (REM) proveniente dos objectos e transformar as informações para valores digitais ou gráficos com a finalidade de representar a superfície da terra (Dias, 2018). A coleta de informações é realizada por sistemas passivos e ativos,

sendo a diferença entre as duas é a fonte da REM, onde nos sensores passivos a fonte da REM é o sol e nos sensores ativos é o próprio equipamento (Jensen e Epiphanyo, 2011). Os sensores operam em diversas faixas do espectro eletromagnético (Garrafiel, 2018).

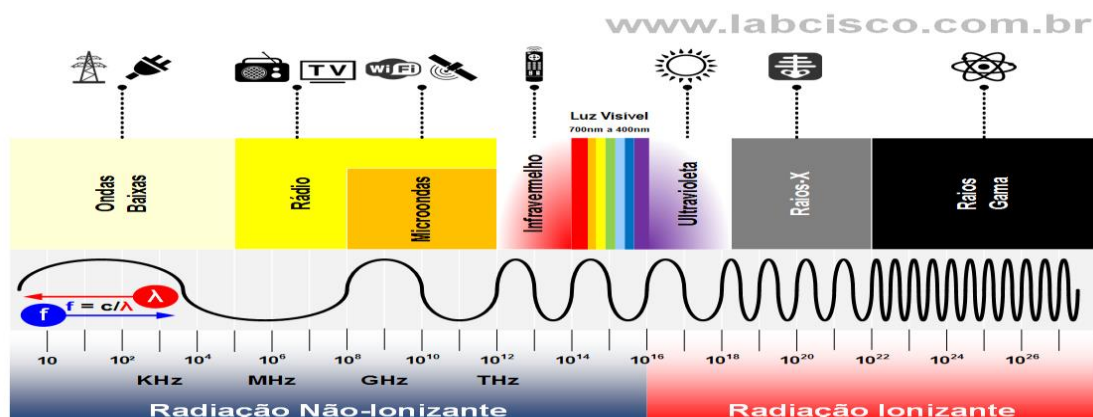


Figura 2: Espectro eletromagnético. Fonte: Brito (2013).

Os sensores ativos transmitem a energia para a superfície do terreno, esta energia interage com o terreno e produz retroespalhamento da energia, este retroespalhamento é medido e registrado pelo recetor do sensor remoto (Moraes, 2010).

Um sensor ativo e a detecção de luz e alcance conseguem penetrar com eficácia nas copas da floresta e pode ser usado para obter informações sobre a estrutura da floresta em três dimensões devido a possibilidade de quantificar a altura das árvores da floresta, a biomassa acima do solo e outros parâmetros da estrutura da floresta (Hu *et al.*, 2020).

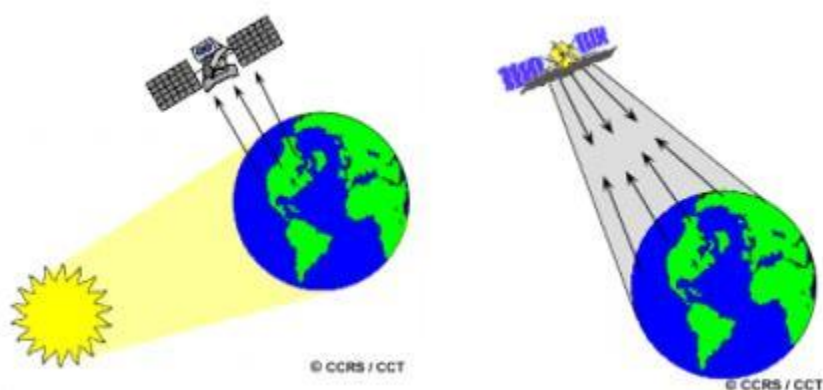


Figura 3: Ilustração dos sensores passivo a esquerda e a direita o sensor ativo. Fonte: Barros (2023).

O sistema ativo, detecção e localização através de ondas de rádio (RADAR = Radio Detection Ranging) emite e grava o retroespalhamento pela sua própria energia e não é dependente da energia solar, este sistema pode ser usado para detetar a estrutura da floresta de mangal, mapeamento individual das árvores e diâmetros e predizer o volume e a biomassa do mangal (Schill *et al.*, 2024). O funcionamento dos radares baseia-se na medição do tempo de propagação que uma REM emitida pelo próprio radar leva para atingir um alvo e retornar (Neta, 2009).

4.3. Radar

Radar é um acrónimo de Rádio Detection and Ranging (detecção e localização através de ondas de rádio) cuja função é a detecção e localização de alvos através de medições da distância por meio de ondas de rádio (Dos Santos, 2009). O radar é compreendido dentro da faixa das micro-ondas (Benedetti, 2010).

A região de micro-ondas está dividida em bandas onde as mais comuns são as bandas X, C e L (Dutra *et al.*, 2003).

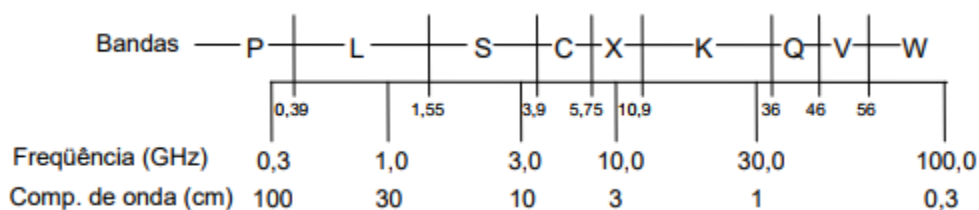


Figura 4: Bandas da região do micro-ondas. Fonte: Dutra et al, 2003.

4.4. Comprimento de onda e penetração nas copas das árvores

As bandas de radar podem penetrar além das copas com um comprimento de onda mais longo (Nesha, 2019). Os comprimentos de onda curtos (banda-X) têm alta interação com a superfície da copa e têm baixa penetração, enquanto os comprimentos de onda longos (banda-L) penetram além das copas e refletem informações dos ramos e a estrutura do caule (Schill *et al.*, 2024).

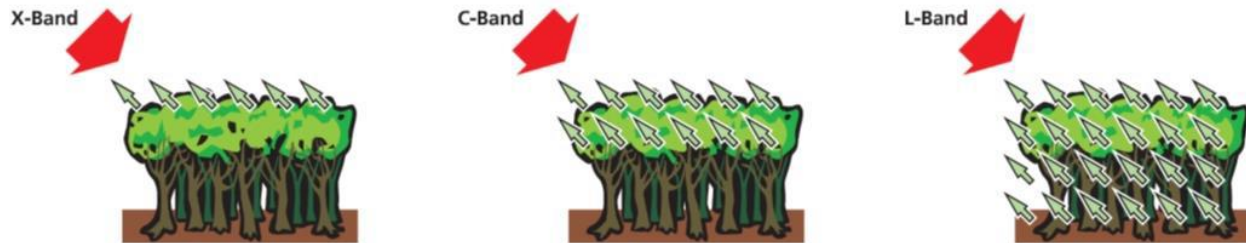


Figura 5: Ilustração da penetração dos comprimentos de onda nas copas das bandas de radar (DLR, 2013).

Os radares como sistemas ativos operam com a transmissão e recepção de micro-ondas, capazes de atravessar nuvens e chuva, dosséis vegetais e solos (Kuplich, 2003; Schill *et al.*, 2024) e geralmente mostram ser mais promissores para avaliar a biomassa (Neta, 2009).

Uma imagem digital de radar consiste numa matriz onde cada célula ou pixel apresenta um valor numérico proporcional à intensidade do eco que retorna à antena do radar, este eco é denominado por retroespalhamento, o retroespalhamento refere-se à radiação que foi espalhada na direção do radar (Kuplich, 2003) e é medido de acordo com os alvos, representados na figura (6). O alvo é iluminado por uma onda incidente de Radar (A), em (C) o alvo espalha a onda em todas as direções, em (B) o sistema de radar recebe somente uma parte da onda espalhada que retorna em direção à antena receptora (Natural Resources Canada, 2015a). O retroespalhamento pode ser adquirido em diferentes comprimentos de onda, onde cada banda caracteriza diferentes parâmetros da floresta (Schill *et al.*, 2024).

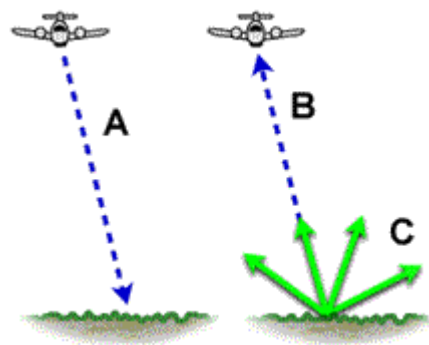


Figura 6: Ilustração do retroespalhamento do radar, Natural Resources Canada, (2015a.).

Para extrair estas imagens é necessário ter em consideração as características do alvo (humidade do solo, rugosidade da superfície, relevo, estrutura da vegetação e quantidade de água presente nas

folhas verdes (Neta, 2009; Paradella *et al.*, 2005) e as características instrumentais do sistema (Neta, 2009).

4.5. Radar de Abertura Sintética (SAR)

O SAR é um sistema imageador ativo da região de micro-ondas do espectro eletromagnético, embarcado em aeronaves (aerotransportado) ou satélites (orbital), utilizado para o sensoriamento remoto (Goulão, 2018) e são utilizados para melhorar a resolução azimutal (Neta, 2009).

O SAR distingue-se dos sensores ópticos, na faixa do visível ou no infravermelho, pelo fato de utilizar uma fonte de ondas de rádio como elemento gerador de radiação. Possui uma fonte ativa e controlável de radiação a qual define a frequência, a polarização e o ângulo de incidência da onda transmitida (Fernandes e Fernandes, 1998).

O SAR corresponde a sensores ativos pós possuem fonte própria de REM, que operam na faixa espectral de micro-ondas e que permitem discriminar alvos ou feições no terreno com base nas diferenças nas suas propriedades dielétricas (conteúdo de água nos solos e nas plantas) e geométricas (rugosidade do terreno e estrutura da vegetação (Paradella *et al.*, 2005).

O sistema SAR consiste num transmissor de micro-ondas, uma antena de transmissão e recepção, e um recetor que é instado em um avião, na nave espacial e na plataforma de satélite (Lee e Pottier, 2009).

+O SAR mede a energia das micro-ondas e grava o sinal de retroespalhamento que é proporcional ao tamanho, a forma e o conteúdo da água da folha (Simard, 2019).

4.6. Coeficiente de retroespalhamento

O coeficiente de retroespalhamento (σ°) é a forma de medição normalizada da força do sinal de radar refletido por um alvo distribuído (Lin *et al.*, 2022).

O coeficiente de retroespalhamento é representado pela soma das contribuições do próprio dossel do retroespalhamento direto do solo e de múltiplos espalhamentos entre os elementos do dossel e os da superfície do solo (Ulaby *et al.*, 1984). O valor do (σ°) é a razão da energia espalhada em relação ao sinal enviado (Neta, 2009).

É um número adimensional e pode ser expresso na escala de decibéis (dB) (Alencar, 2013) e geralmente estes valores variam entre -18 dB até maiores de 0 dB (Neta, 2009). As áreas com

pouca vegetação os valores de σ° são baixos porque o sinal é perdido e consequentemente os alvos são escuros (rios e lagos) e as áreas com elevada vegetação tem alto retroespalhamento e altos valores de σ° (Neta, 2009).

4.7. Parâmetros relacionados ao sistema de sensor

O retroespalhamento é dependente da combinação de parâmetros inerentes ao sistema imageador, como frequência, polarização, ângulo de visada e de incidência (Kuplich, 2003) estes parâmetros são importantes para o entendimento da interação da radiação de micro-ondas com os alvos para a caracterização do retroespalhamento e para a extração de informações das imagens de SAR (Silva *et al.*, 2011).

4.7.1. Frequência ou comprimento de onda

É a distância que a onda trafega no tempo requerido para gerar um ciclo (Neta, 2009). A penetração do retroespalhamento depende do comprimento da onda e das condições dielétricas do meio (Kupluch, 2003). Penetrações maiores são obtidas para frequências mais baixas (Neta, 2009).

As bandas X e C têm comprimento de onda menor e frequências maiores e a banda L e P apresentam comprimento de onda maiores e frequência mais baixa (Lopes e Lima, 2009). Os sinais emitidos na banda L e P são capazes de penetrar o dossel de uma floresta e serem refletidas pelos troncos e galhos das árvores, permitindo a avaliação da biomassa (Neta, 2009), porém a relação entre o retroespalhamento e biomassa torna-se limitado a partir de certos valores de biomassa, devido aos dados de radar saturarem quando a biomassa é alta (Fassnacht *et al.*, 2014).

4.7.2. Polarização

A medição do sinal do radar também pode ser caracterizada pela polarização (Simard, 2019). A polarização refere-se à orientação do vetor elétrico de uma onda eletromagnética em relação a direção horizontal (Nesha, 2019). A polarização é o sinal de retroespalhamento registrado na forma de uma matriz [S] 2x2 em uma base composta de valores complexos, transmitida e recebida nas polarizações: HH, VV, HV e VH (Servelo, 2010).

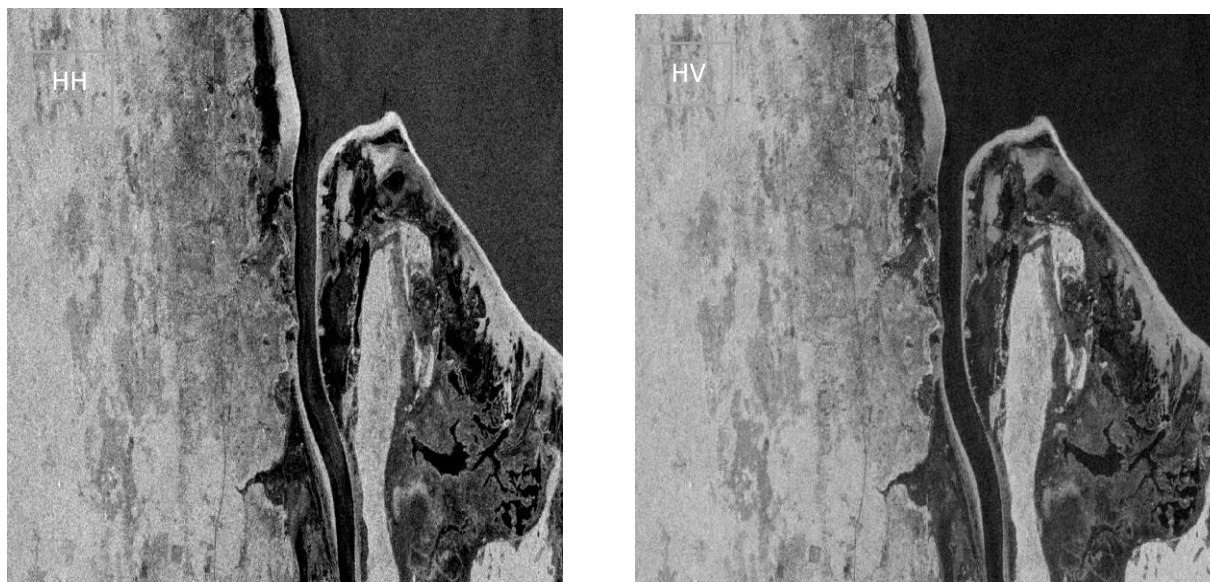


Figura 7: Polarização HH e polarização HV. Fonte: (autora).

Quando o sinal oscila paralelamente a direção horizontal a onda refere-se como polarização horizontal (H) e quando oscila perpendicularmente a direção horizontal, a onda refere-se à polarização vertical (Crisp, 2001).

As antenas de radar foram programadas para emitir e receber a onda eletromagnética nas duas polarizações horizontal e vertical (Nesha, 2019). A polarização HH indica transmissão e recepção no plano horizontal; VV indica transmissão e recepção no plano vertical; HV transmissão no plano horizontal e recepção no plano vertical; e VH indica transmissão vertical e recepção horizontal (Jesus e Kuplich, 2021).

Existem polarizações simples HH e HV e polarizações cruzadas HV ou VH (Alencar, 2013). As polarizações do radar podem revelar mistura de conteúdos e a geometria da copa do mangal (Schill *et al.*, 2024), pós demonstraram ser eficientes para classificar os tipos de zonas húmidas (Simard, 2019).

4.7.3. Ângulo de incidência

O ângulo entre a iluminação do radar e a iluminação normal à superfície do solo é designada por ângulo de incidência (Nesha, 2019). É um dos principais fatores que influenciam o retroespalhamento e a aparência dos objectos pós determina os efeitos do relevo e varia de acordo com o tipo de terreno imageado (Neta, 2009).

4.7.4. Direção de visada

É o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar em sentido perpendicular à direção de movimento da plataforma (Lewis *et al.*, 1998). A captação das imagens em sensores de radar é realizado através da geometria de visada lateral, uma vez que a antena transmissora dos sinais de ondas é apontada para o radar, alvos à direita e à esquerda da plataforma afastados igualmente em relação ao sensor não seriam distinguidos pós seus sinais refletidos retornariam à antena recetora juntos (Neta, 2009).

4.8. Parâmetros do alvo

Características geométricas e dielétricas das superfícies dos alvos, especificamente do grau de rugosidade e da constante dielétrica são os parâmetros que influenciam o imageamento em radar (Kuplich, 2003).

4.8.1. Rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície é a propriedade do terreno que mais influencia a força do radar e o brilho das características nas imagens de radar (Humboldt State University, 2016). É uma característica muito importante relacionada ao alvo que influencia a imagem de radar, influencia no espalhamento da energia de micro-ondas e consequentemente, o brilho dos alvos nas imagens de radar (Beneditti, 2010) e determina a intensidade do retroespalhamento de radar dentro da célula de resolução (Neta, 2009).

As águas calmas e ruas pavimentadas aparecem mais escuras e as superfícies com vegetação que são mais rugosas aparecem em tom mais brilhante em imagens de radar (Beneditti, 2010). A superfície aparece mais rugosa quando o ângulo de incidência local é maior e menos rugosa para ângulos menores (Beneditti, 2010; Neta, 2009).

4.8.2. Constante dielétrica

É definida como a medição da reflectividade e condutividade de um dado objecto (Humboldt State University, 2016) ou seja, é a capacidade que um material (vegetação, solo, água) tem de conduzir energia elétrica e causar influência direta na capacidade do material em absorver, refletir e transmitir energia na faixa de micro-ondas (Beneditti, 2010).

O conteúdo da humidade influencia a constante dielétrica, sendo um solo ou uma vegetação mais húmida terá um impacto significativo na quantidade da energia retroespalhada (Mikhail *et al.*, 2001), afectando o modo como este objecto aparece numa imagem de radar (Neta, 2009).

Solos húmidos refletem mais energia de radar do que solos secos que absorvem mais onda de radar dependendo da constante dielétrica que compõe o solo, ou seja, o brilho da imagem da maioria da vegetação e superfícies naturais, aumenta com o aumento do teor da humidade (Beneditti, 2010).

4.9. Sensor ALOS-2/PALSAR-2

4.9.1. Características gerais

ALOS-2/PALSAR-2 foi lançado em 24 de Maio de 2014, é equipado com polarimetria da banda-L completo e PALSAR-2 (Touzi *et al.*, 2022). O ALOS-2/PALSAR-2, oferece captação de imagens de radar nas polarizações dúplas HH +HV ou polarização completa HH+HV+VH+VV na banda L (JAXA, 2014).

O programa de satélite japonês para a observação da superfície terrestre (ALOS-2) consiste em duas séries, cada uma com objetivos distintos de observação, uma parte é composta por satélites que se destinam a observações atmosféricas e marinhas, enquanto outra parte para observações terrestres (Alencar, 2013).

O PALSAR oferece a possibilidade de extrair medidas de vários modos de captação de imagens e é por isso uma alternativa sustentável com desenvolvimento ativo principalmente no monitoramento de florestas, e é usado para estabelecer uma relação empírica ou semi-empírica entre as observações do PALSAR e as variáveis da floresta, classificação da floresta e mapeamento da cobertura da terra (Antropov *et al.*, 2017).

ALOS-2/PALSAR-2, é usado para colectar dados da polarização do ângulo off-nadir de 21,5° (Touzi *et al.*, 2022).

4.10. Comportamento espectral dos alvos

Comportamento espectral de um objecto é o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objecto ao longo do espectro eletromagnético (Di Maio *et al.*, 2008). A intensidade e a localização de cada banda de absorção caracterizam o objecto e estes interagem de forma diferente no espectro eletromagnético com a energia eletromagnética incidente, devido a diferenças nas propriedades físico-químicas e biológicas dos objectos (Nhamuhuco, 2021).

As principais fontes de espalhamento das componentes vegetais são da mesma ordem de magnitude dos comprimentos de onda com os quais interagem (Le Toan *et al.*, 2002). Na vegetação o retroespalhamento é influenciado pela orientação dos galhos, teor de humidade e a presença de folhas e as suas proporções nas camadas do dossel (Alencar, 2013).

Para analisar as imagens de radar é necessário que sejam consideradas a rugosidade do terreno, o conteúdo de água nos solos e nas plantas e a estrutura da vegetação (Dos Santos, 2009). A rugosidade da superfície define o retroespalhamento do alvo, ou seja, superfícies mais rugosas retroespalham o sinal em todas as direções enquanto superfícies lisas não retornam o sinal retroespalhado em direção a antena (Jensen e Epiphanio, 2011).

4.11. Floresta de mangal

As espécies de mangal ocorrem em locais diferentes, ao longo da zona entre-marés criando assim um padrão chamado zonação (INOM, 2022). A zonação é encontrada a partir do mar até a terra (Nesha, 2019) e esta resulta da preferência das espécies em relação às condições hidrológicas dos locais de ocorrência ao longo da zona entre-marés, tais como: a altura das marés, a frequência da inundação, o tempo de inundação, a salinidade e a disponibilidade de água doce do lençol freático (INOM, 2022).

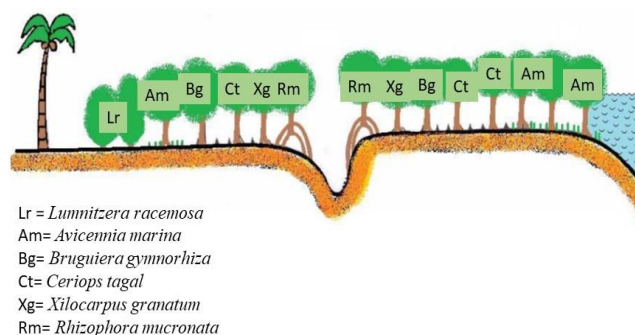


Figura 8: Zonação do mangal na região sul de Moçambique (Balidy, 2013).

Devido a diferença estrutural, o espalhamento da banda-L do SAR para os mangais é diferente em relação às outras florestas pois a zonação da floresta afeta o retroespalhamento do SAR (Nesha, 2019). A dispersão da floresta de mangal inclui a dispersão de volume do dossel, a dispersão do dossel para o tronco, a dispersão dos caules das árvores para a superfície da floresta, a dispersão especular da superfície da água inundada e a dispersão de volume para a superfície do tronco para a superfície (Manavalan, 2018). A intensidade do espalhamento é heterogêneo e varia a partir de imagem SAR para outra, devido a variação da natureza da estrutura da vegetação e a superfície do solo (Nesha, 2019).

4.12. A banda-L na estimativa da biomassa acima do solo do mangal

A banda-L do SAR está capacitado para adquirir dados em polarizações duplas e quádruplas, isto mostra que tem potencial para estimar a biomassa acima do solo (Nesha, 2019).

A biomassa é uma característica biofísica muito importante que pode ser detectada através de dados de sensoriamento remoto para a manutenção do ecossistema das florestas do mangal (Ji *et al.*, 2010). A estimativa precisa da biomassa é essencial para compreender a dinâmica e o estado de saúde das florestas de mangal (Li *et al.*, 2024) e usa-se o sensoriamento remoto por ser uma ferramenta importante para a gestão das políticas do meio ambiente e o clima (Latifi *et al.*, 2015).

O retroespalhamento da banda L com salto duplo aumenta significativamente em baixa biomassa e em florestas abertas (Podest *et al.*, 2020). A estimativa da biomassa do mangal é limitada devido a inacessibilidade das florestas, a forma mais comum de estimar a biomassa das florestas é usando o método não destrutivo, a partir de equações alométricas através de parâmetros como: O diâmetro e a altura do peito (Baloloy *et al.*, 2018).

5. Metodologia

5.1. Área de estudo

A baía de Maputo localiza-se a sul de Moçambique, tem uma área de 960 km² (Afonso, 2001). Tem um clima subtropical, com uma estação quente, que começa no mês de outubro e se estende até fevereiro, e uma estação seca fria, que começa em março e termina em setembro (Mundlovo, 2006). A baía encontra-se aberta para o oceano Índico no Nordeste (Kramer, 2003). Ocorrem cinco principais rios, nomeadamente o Incomáti, Maputo, Matola, Tembe e Umbelúzi (Mundlovo, 2006).

Aproximadamente à 20 km ao sul da Cidade de Maputo, o rio Maputo forma um extenso estuário com uma largura de cerca de 8 km perto da foz do rio, o estuário de Maputo é composto por extensas florestas de mangais, zonas húmidas das marés e lagos salinos, os ecossistemas do estuário são muito afetados pelas marés e pela entrada de água salgada (Robelus, 1984).

O mangal da baía de Maputo ocupa uma área de aproximadamente 18 000 ha concentrado nos estuários dos cinco rios que ocorrem na baía (Bandeira e Paula, 2014). O mangal do rio Maputo localiza-se entre a 26°10'37.57"S de latitude e 32°39'56.63"E de longitude vide na figura (10) e esta floresta de mangal do estuário de Maputo consistem principalmente das espécies de *Rhizophora mucronata*, *Avicennia marina*, *Ceriops tagal* e *Bruguiera gymnorhiza* (Robelus, 1984).

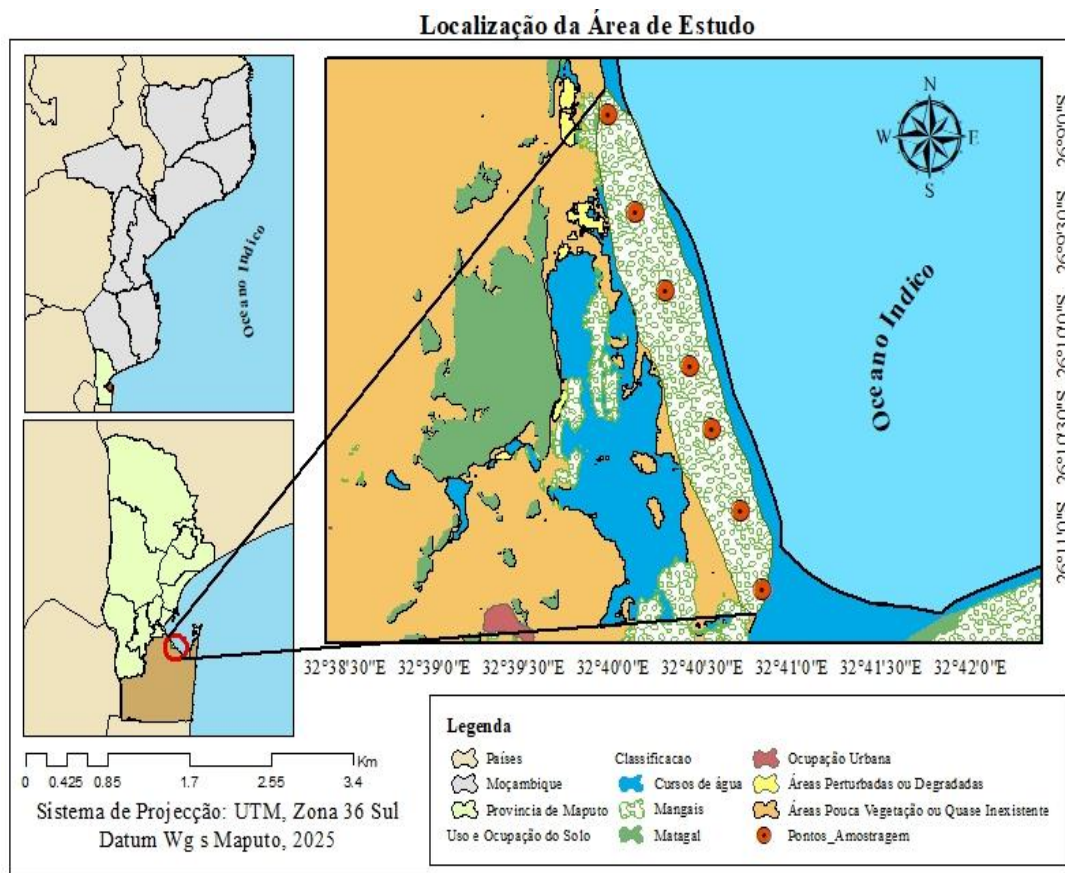


Figura 9: Localização do mangal do rio Maputo.

5.2. Material

- Dados dos parâmetros biofísicos do mangal;
- Imagens ALOS-2/PALSAR-2.

Softwares utilizados:

- SNAP;
- SPSS;
- ArcGis.

5.3. Procedimentos metodológicos

O presente estudo foi conduzido por meio de metodologias indiretas de investigação, baseando-se em abordagens não destrutivas. A estimativa da biomassa acima do solo no ecossistema do mangal foi efetuada com base na aplicação de equações alométricas validadas para cada espécie, o retroespalhamento foi obtido com base em imagens com dupla polarização (HH e HV) do sensor

ALOS-2/PALSAR-2, na banda L (comprimento de onda de 23,5 cm) (Dos Santos, 2009), adquiridas no site oficial da JAXA de forma gratuita.

Foi usado o software SNAP (Sentinel Application Platform) para realizar o pré-processamento das imagens de radar, como a calibração radiométrica e o filtro das imagens para reduzir o ruído speckle, o ruído speckle em imagens de radar representa um ruído multiplicativo, sendo maior onde o sinal é mais intenso e gera uma aparência granular nas imagens o que dificulta o processamento digital das imagens assim como a sua interpretação (Alencar, 2013). A associação entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes foi analisada por meio da modelagem estatística de regressão linear múltipla no software SPSS.

5.4. Coleta de dados do campo

A coleta de dados foi realizada em março e abril de 2021 pelos coletores (Vilma Machava, Magda Massingue e Alberto Fernando), de seguida fez-se à aquisição das imagens ALOS-2/PALSAR-2. Ressalta-se que o levantamento foi inteiramente não destrutivo, sem a remoção ou dano das árvores do ecossistema do mangal. Foram estabelecidas quadrículas de 100 m² (10 m por 10 m), distribuídos ao longo de transectos perpendiculares à linha da costa, espaçados entre si por 50 metros conforme os protocolos de campo padrão para garantir a validade e reprodutividade do estudo (Kauffman e Donato, 2012; Macamo *et al.*, 2018). Em cada quadrícula, procedeu-se com a identificação taxonómica das espécies, acompanhada pelos parâmetros biofísicos do mangal. A altura dos indivíduos foi estimada com o uso de uma haste graduada, o diâmetro e altura do peito (DAP), foi medido com o auxílio de uma fita métrica. Registou-se também o número de indivíduos vivos e mortos por espécie, com o objectivo de caracterizar a estrutura populacional e avaliar o estado de conservação da área amostrada (Servino *et al.*, 2018), das espécies identificadas foram: *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Ceriops tagal* e *Rhizophora mucronata*.

5.5. Estimativa da biomassa acima do solo

As equações alométricas específicas desenvolvidas por Comley e McGuinness (2005), Cole *et al.*, (1999) Kauffman e Cole (2010), Clough e Scott (1989) foram empregues para cada espécie, conforme apresentado no quadro 1, tendo como variáveis preditivas o diâmetro e altura do peito (DAP) (Azyleah *et al.*, 2014). A biomassa acima do solo do mangal foi estimada por método não destrutivo, utilizando equações alométricas específicas para cada espécie indicadas acima onde estas aplicam os valores de DAP medidos em campo.

Quadro 1: Equações alométricas usadas para o cálculo da biomassa

Espécies	Equações	Autor
<i>Avicennia marina</i>	$AGB = 0.308 * D^{2.11}$	Comley e McGuinness (2005)
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$AGB = 0.0679 * D^{1.4914}$	Cole <i>et al.</i> , (1999) Kauffman e Cole (2010)
<i>Ceriops tagal</i>	$AGB = 10^{(-0.7247)} + D^{2.3379}$	Comley e McGuinness (2005)
<i>Rhizophora mucronata</i>	$AGB = 0.8069 * D^{2.5154}$	Kauffman e Cole (2010)

AGB = Biomassa acima do solo (kg);

D = Diâmetro e altura do peito (cm).

5.6. Imagens usadas

A imagem de ALOS-2/PALSAR-2 com 25m de resolução são da Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), foi adquirida em maio de 2021 de forma gratuita, as imagens estão disponíveis nas polarizações (HH+HV) dado como retroespalhamento gamma-O de amplitude linear e o modo de aquisição Fine Beam Dual (FBD). Estas imagens são providas de 1x1 grau nas coordenadas geográficas latitude e longitude com um espaçamento de pixel de 0.8 arc segundos (aproximadamente a 25 metros no equador) (JAXA, 2014). Vide o quadro (2) a baixo onde estão apresentadas as características das imagens ALOS-2/PALSAR-2 utilizadas neste trabalho.

Quadro 2: Detalhes das imagens ALOS-2/PALSAR-2 utilizadas

Modo de aquisição	Fine Beam Dual (FBD) Ângulo off-nadir: F2-5, F2-6, F2-7; HH+HV
Polarização	HH+HV
Ano de aquisição	Ano: 2021
Formato	GeoTIFF
Resolução radiométrica	16 bits
Banda	L
Coordenadas geográficas	WGS 84 datum WGS_1984 e zona 37S.
Datum	TRF97 + GRS80
Número de Pixel	4500 x 4500 linhas
ID da imagem	SARD000000333072-00044

5.6.1. Processamento das imagens de radar ALOS-2/PALSAR-2

Foi efectuado o pré-processamento a um nível de 1.1 das imagens, o pré-processamento do PALSAR-2 consiste em definir a forma do pacote de processamento, o modo da polarização e a forma de armazenamento do ficheiro do SAR (JAXA, 2008). Feito o pré-processamentos no software SNAP das imagens realizou-se o processamento devidamente detalhado a seguir:

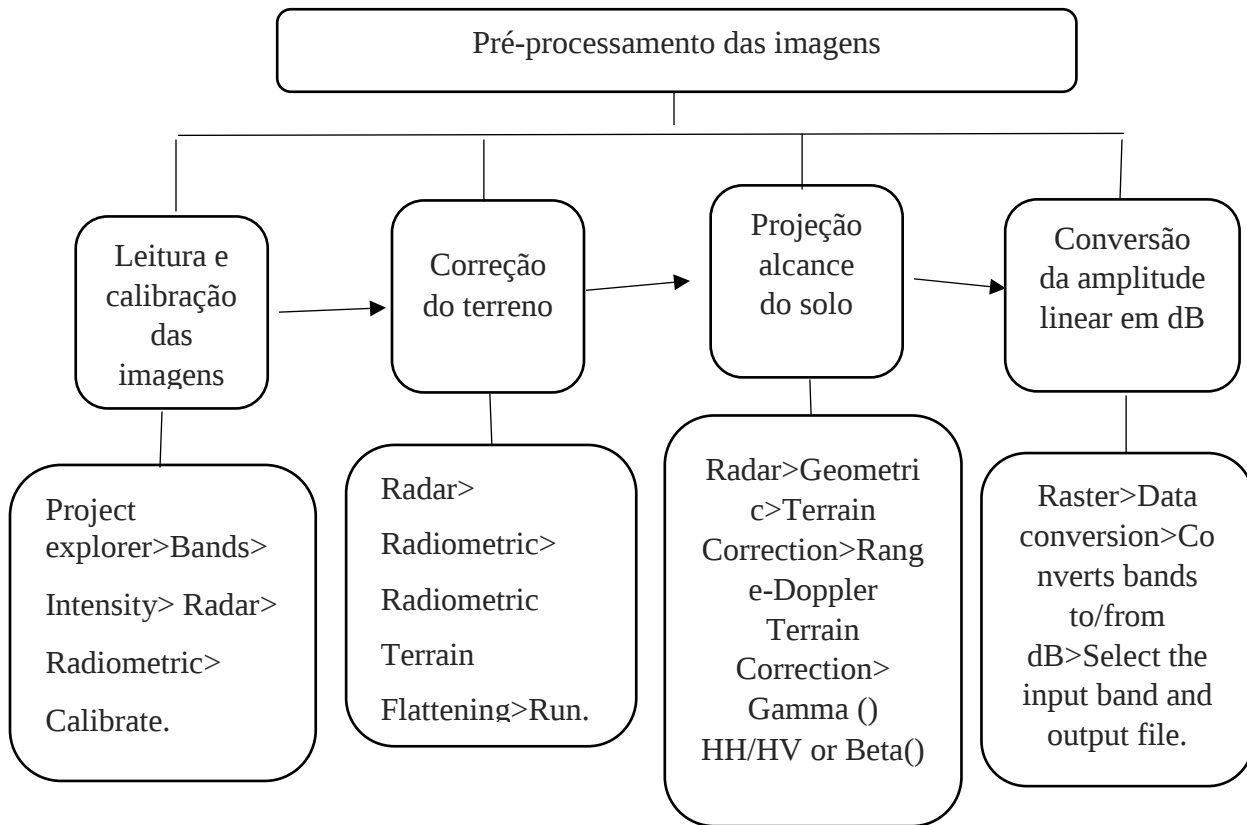


Figura 10: Fluxograma do pré-processamento das imagens de radar. fonte: (Simard, 2019).

5.6.2. Cálculo do Retroespalhamento

Os dados foram adquiridos na forma de amplitude de retroespalhamento em decibéis (dB) e armazenados como números digitais (DN), com resolução radiométrica de 16 bits. Os valores de DN foram convertidos para coeficiente de retroespalhamento (σ°), através da fórmula abaixo:

$$\sigma^\circ [\text{dB}] = 10 * \log_{10} (\text{DN}) + \text{CF}$$

Onde: DN é o número digital de pixels do mosaíco raster de cada imagem, o CF é o fator de calibração para o ALOS-2/PALSAR-2 é -83 (Jaxa, 2014), para ambas as polarizações HH e HV (Pham e Yoshino, 2017).

O σ° foi obtido a partir da utilização de modelos digitais de elevação do ALOS-2/PALSAR-2 do rio Maputo em decibéis (dB). O retroespalhamento corresponde a secção cruzada de radar que é refletida pelo alvo e que retorna para a antena por unidade de área, medida em dB (decibéis) (Neta, 2009), a conversão do retroespalhamento foi realizada utilizando a fórmula mencionada acima, substituindo os valores de número digital (DN) pelos mosaícos raster correspondentes a cada polarização das imagens.

O retroespalhamento pode ser significativamente afetado pelo nível da maré (Pham e Yoshino, 2017). Para minimizar este efeito foi feita a amostragem em dias sem chuva e com maré baixa para evitar o efeito das ondas.

Após a obtenção dos valores de retroespalhamento de cada imagem, fez-se a extração destes valores, as coordenadas geográficas e a biomassa total de cada quadrícula, totalizando 115 quadrículas, correspondentes às áreas amostradas em campo.

5.7. Modelagem da Biomassa acima do solo em função do retroespalhamento

5.7.1. Análises estatísticas

Os coeficientes de retroespalhamento para as polarizações HH e HV foram extraídos para cada quadrícula amostrada. Os parâmetros biofísicos do mangal usados neste estudo foram: o DAP, a altura, o volume e a biomassa acima do solo (ABG) do mangal e estes foram utilizadas na análise da correlação com o objectivo de subsidiar a construção de modelos estatísticos multivariados como a regressão linear múltipla bem como para avaliar a presença e o grau de multicolinearidade entre as variáveis independentes (Chein, 2019).

Procedeu-se também com a análise estatística do teste F e teste t. O teste F designado como teste da significância do modelo, é utilizado para apurar de forma conjunta as variáveis independentes, a um nível de significância de 0.05, os resultados indicam que o modelo é significativo evidenciando que em conjunto as variáveis independentes possuem capacidade preditiva enquanto que o teste t ou teste parcial do modelo, apura de forma individual os coeficientes das variáveis independentes (Umarhadi e Syarif, 2018).

5.7.2. Correlação

A análise de correlação é essencial para testar a força e a direção da correlação entre as variáveis (Nesha, 2019).

Com o objectivo de avaliar a relação entre os parâmetros biofísicos do mangal e os coeficientes de retroespalhamento nas polarizações HH e HV, foram conduzidas, análises de correlação dos parâmetros biofísicos entre si de forma a identificar eventuais interdependências e quantificar o grau de multicolinearidade entre elas. Em seguida, realizou-se a análise de correlação entre os parâmetros biofísicos e os coeficientes de retroespalhamento, como etapa preliminar à modelagem estatística da regressão, visando assegurar a robustez e a validade dos modelos preditivos a serem aplicados. A correlação é um elemento muito importante na análise de regressão pois permite identificar se uma regressão linear resume de uma forma adequada a relação de interesse (Chein, 2019).

Adotou-se o coeficiente de correlação de Person por sua capacidade de quantificar a intensidade e a direção da associação linear entre variáveis contínuas assumindo dados medidos em escala de intervalo ou razão (Nesha, 2019).

O valor de coeficiente de correlação varia entre (-1 e +1), onde -1 indica que há uma correlação negativa muito forte entre as duas variáveis e +1 indica que há uma correlação positiva muito forte entre as variáveis (Nesha, 2019). O 0 indica que não existe uma correlação entre as variáveis (Chein, 2019).

5.7.3. Regressão linear múltipla

Os modelos de regressão são a abordagem mais comum para estimativa de biomassa quando se usam dados de detecção remota, estes dados tem a vantagem de serem flexíveis e são fáceis de interpretar (Zeng *et al.*, 2022) e permite que uma variável dependente seja determinada por mais de uma variável independente (Chein, 2019). A análise de regressão permite conhecer o nível de dependência entre variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade (Kutner, *et al.*, 2005).

Uma análise de regressão linear múltipla foi realizada utilizando o software IBM SPSS Statistics versão 20. Este tipo de análise de regressão linear múltipla permite modelar a relação entre uma variável dependente (variável de resposta) e duas ou mais variáveis independentes com objectivo de prever o comportamento da variável de resposta com base nos valores das variáveis explicativas

(Kutner *et al.*, 2005; Chein, 2019). A regressão linear foi usada para estimar a AGB de florestas de mangal em estudos anteriores (Pham e Yoshino, 2017; Nesha, 2019; Li *et al.*, 2022;).

5.8. Modelo de regressão

O modelo de regressão é comumente usado para analisar a relação entre duas variáveis uma dependente e a outra independente (Nesha, 2019). E estes também podem ser usados na estimativa de relações qualitativas e quantitativas entre as variáveis.

Foi usada a regressão linear múltipla para analisar a relação entre a AGB e o coeficiente de retroespalhamento das imagens ALOS-2/PALSAR-2, nas polarizações HH e HV juntos, o que permitiu obter uma regressão linear múltipla. Os dados foram validados através dos valores de R^2 e estes variam entre -1 e +1 (Chein, 2019).

Neste estudo a variável dependente foi assumida a biomassa e a variável independente o σ° de HH e HV, estes modelos são usados para examinar a estimativa de biomassa acima do solo de espécies de mangal usando dados de ALOS-2-PALSAR-2 (Pham e Yoshino, 2017).

O modelo de regressão linear múltipla foi construindo através da fórmula:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Onde: Y, é a média da biomassa e representa a variável dependente; β_0 é a constante ou o intercepto, β_1 e β_2 são inclinações da recta, X_{1i} e X_{2i} , é o regressor (variáveis independentes HH e HV) e ε_i é o termo de erro.

A hipótese chave do termo de erro explica que nenhum fator pode ser correlacionado com qualquer variável explicativa e esta hipótese é sempre igual a 0 (Chein, 2019).

A construção de modelos de regressão com várias espécies é muito difícil porque estes requerem dados adicionais como o mapa de distribuição para as espécies alvos, os valores de biomassa acima do solo classificada por espécie e uma amostra suficientemente grande para construir um modelo robusto que permitirá o teste e a validação (Li *et al.*, 2022).

5.9. Mapeamento da biomassa acima do solo

O mapa da biomassa foi produzido para a área de estudo baseando-se na estimativa da biomassa acima do solo usando a equação derivada pelo modelo de regressão linear múltipla entre as

imagens das polarizações HH e HV e a AGB. A ferramenta “raster calculator” do software ArcGIS foi usado para mapear a AGB.

A equação do modelo foi aplicada para as duas polarizações HH e HV, onde todos os valores de pixels das polarizações foi convertido em AGB. Um estudo similar foi feito por (Pham e Yoshino, 2017).

6. Resultados

6.1. Descrição das espécies

Foram observadas 4 espécies de mangal durante as amostragens. O número de espécies individuais medido em todas as quadrículas totalizou 115. A *Avicennia marina* é a mais dominante com 51 085 árvores individuais, seguido pela *Rhizophora mucronata* com 3 657. A mais baixa foi a *Ceriops tagal* com 191 indivíduos e a *Bruguiera gymnorrhiza* com 697 indivíduos, vide o gráfico (1).

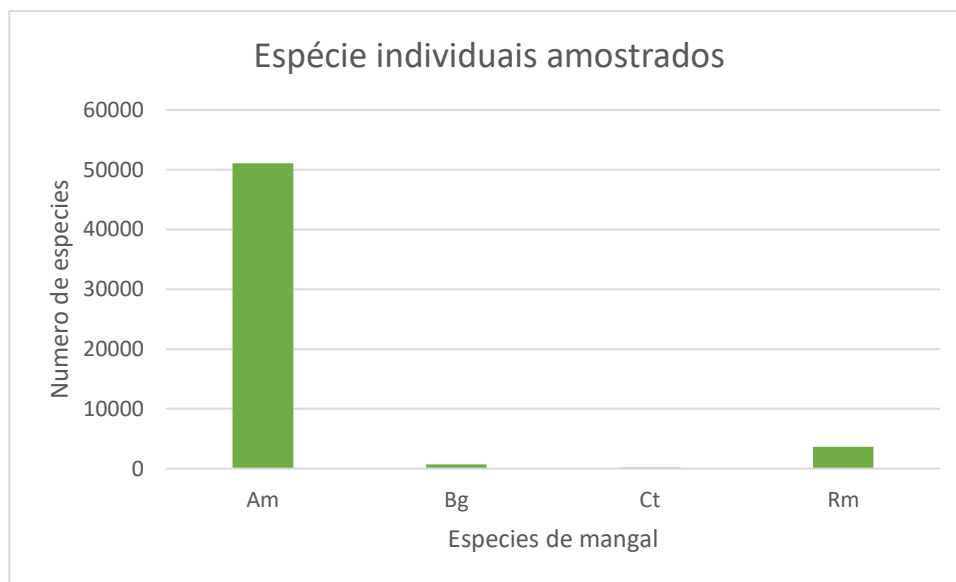


Gráfico 1: Árvores individuais de mangais.

6.2. Estatística dos parâmetros biofísicos do mangal

Os parâmetros biofísicos usados foram o diâmetro e altura do peito, a altura, o volume e a AGB. Estes parâmetros foram medidos em 115 quadrículas na área de estudo. A média do DAP foi de 26.91 cm, a de altura foi de 2.79 m e o volume foi de 2421.47 m³ em todas as quadrículas.

A análise de correlação foi efetuada entre os coeficientes de retroespalhamento e os parâmetros biofísicos do mangal os resultados vide na tabela (1). Esta tabela mostra a correlação entre os parâmetros biofísicos, onde há uma boa correlação entre o DAP, altura e o volume, sendo a biomassa a variável com baixa correlação com os restantes parâmetros. Uma relação positiva é observada entre a biomassa do mangal e o resto dos parâmetros biofísicos exceto o volume. A

possível explicação para estes resultados deve-se ao volume ser baixo devido ao estado de conservação do mangal. Durante a amostragem foram observadas vários cepos e árvores mortas.

Tabela 1: Matriz da correlação de Pearson dos diferentes parâmetros biofísicos do mangal (n = 115 quadriculas)

	DAP (cm)	Altura (m)	Volume	Biomassa (Mg/ha)
DAP cm	1			
Altura (m)	0.516**	1		
Volume	0.867**	0.597**	1	
Biomassa (Mg/ha)	0.107	0.058	0.067	1

** A correlação é significativa no nível de confiança de 0.01

6.3. Relação entre as polarizações HH e HV com os parâmetros biofísicos do mangal

As polarizações HH e HV de ALOS-2 PALSAR-2 foram analisadas para perceber como estas estão correlacionados com os parâmetros biofísicos do mangal. Os resultados estão representados na tabela (2). O retroespalhamento das polarizações HH e HV não mostra uma relação positiva entre os parâmetros biofísicos do mangal, porém a polarização HH apresentam alguma correlação com a biomassa.

Tabela 2: Relação entre HH e HV e os parâmetros biofísicos do mangal

	σ HH	σ HV	DAP cm	Altura	Volume	Biomassa
σ HH	1					
σ HV	0.713**	1				
DAP cm	-0.101	-0.162	1			
Altura m	-0.070	-0.006	0.518**	1		
Volume	-0.124	-0.167	0.868**	0.596**	1	
Biomassa	0.151	-0.010	0.106	0.058	0.067	1

** a correlação é significativa no nível de confiança de 0.01.

Foram analisados gráficos da relação entre o coeficiente de retroespalhamento (HH e HV) em dB com a biomassa acima do solo do mangal. Alguma relação foi observada entre o coeficiente de retroespalhamento HH e a biomassa, sendo o coeficiente de retroespalhamento HV e a biomassa a que apresentou baixa correlação, quase insignificante, estes valores baixos são explicados devido a natureza dos sistemas de raízes das espécies mistas do mangal.

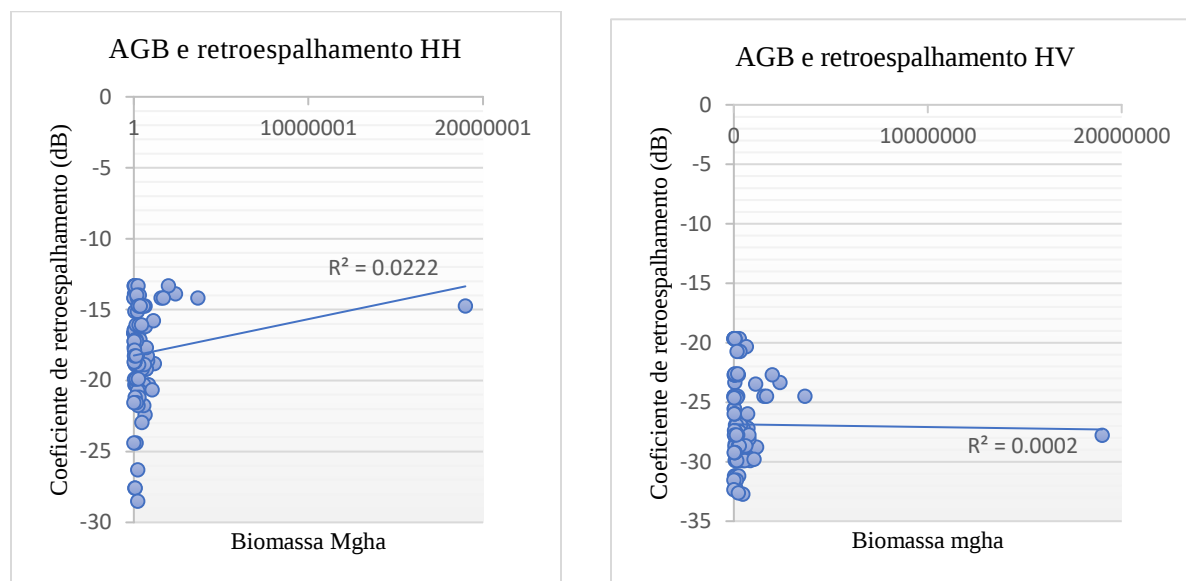


Gráfico 2: AGB (Mg/ha) e coeficiente de retroespalhamento (dB), polarização HH e HV

6.4. Modelagem e estimativa da biomassa usando dados do sensor ALOS-2/PALSAR-2

Uma regressão linear múltipla foi analisada entre a AGB e coeficiente de retroespalhamento das polarizações HH e HV das imagens ALOS-2/PALSAR-2. Onde obteve-se a estatística descritiva, vide na tabela (3).

Os resultados mostram que o modelo de regressão linear múltiplo com as polarizações HH e HV teve melhor resultado para estimar a biomassa acima do solo com o R^2 0.051 (5,1%) em relação a polarização simples HH que teve R^2 de 0.023 (2.3%), conforme representado na tabela (4).

Os coeficientes das polarizações HH e HV não tiveram impactos significativos na estimativa da biomassa acima do solo, tendo apresentado valores muito baixos. O modelo de regressão das polarizações HH e HV não são adequadas para espécies mistas de mangal, devido a natureza das espécies.

Tabela 3: Sumário da estatística descritiva da biomassa acima do solo de espécies mistas do mangal com n= 115

Min (Mg ha)	Max (Mg ha)	Média (Mg ha)	Desvio-padrão	Teste F	Teste t (HH)	Teste t (HV)
1747.69	18989029.86	528172.15	1817360.3	0.054	0.016	0.071

Tabela 4: Modelo de regressão de espécies mistas baseando-se na biomassa de mangal

Polarização	R ²	R ² ajustado	Modelo de regressão
HH	0.023	0.014	Y (biomassa) = 526497.303 + (-290.84) * σ° HH + (-195.19) * σ° HV
HH e HV	0.051	0.034	

6.5. Mapa da biomassa

Foi gerado um mapa da biomassa acima do solo para o rio Maputo usando a equação alométrica criada das polarizações HV e HH (Y (biomassa) = 526497.303 + (-290.84) * σ° HH + (-195.19) * σ° HV, ilustrado na figura 11.

A floresta registou uma variação de 523413.84 Mg/ha e 543848.50 Mg/ha da biomassa total com a precisão do modelo da pesquisa. A média foi de 533706.23 Mg/ha e o desvio padrão foi 2534.38 Mg/ha.

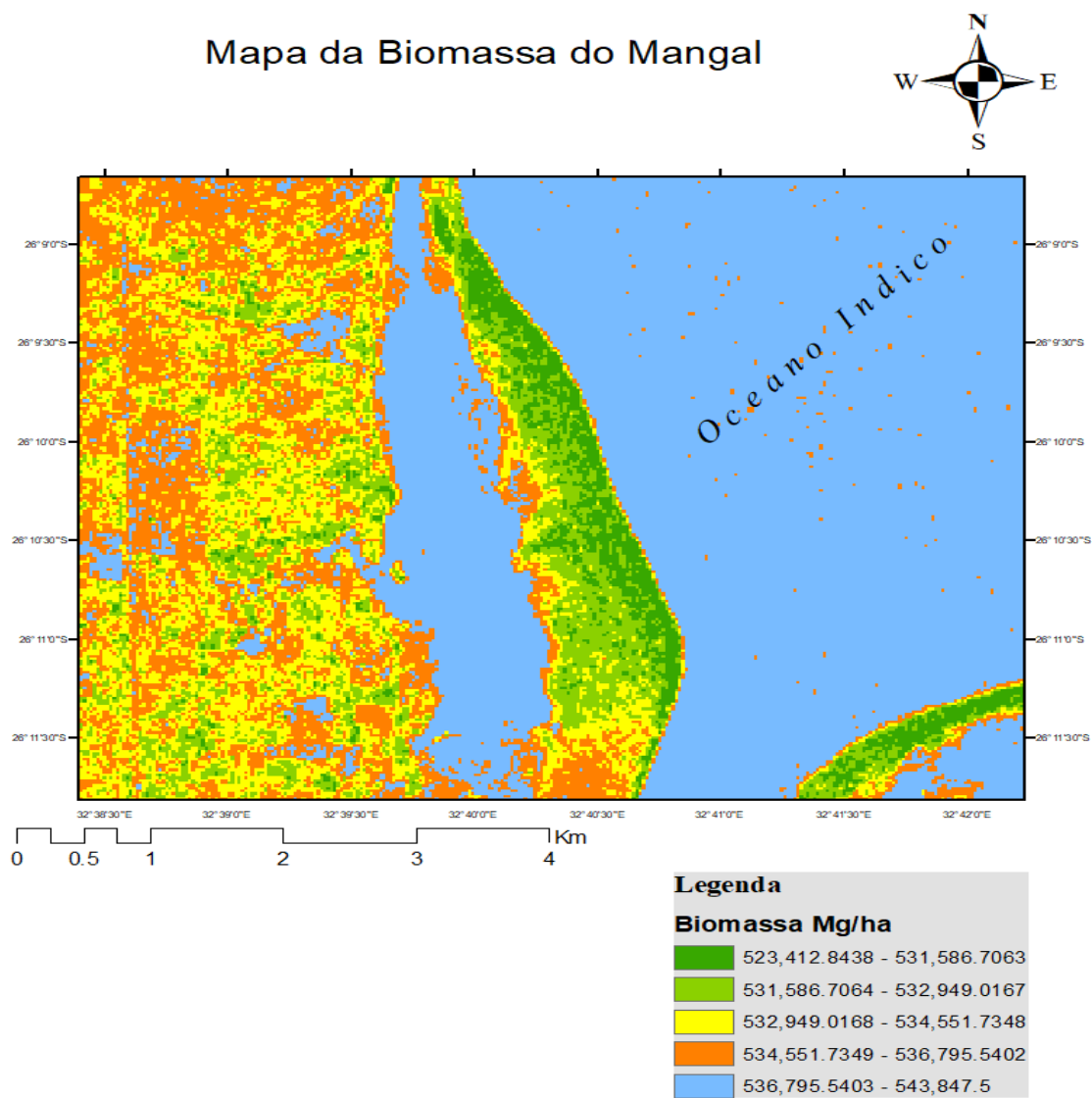


Figura 11: Mapa da biomassa acima do solo do mangal

7. Discussão

A composição florística e a distribuição espacial das florestas de mangal constituem variáveis fundamentais para orientar estratégias eficazes de conservação, bem como para orientar estudos científicos voltados à ecologia e dinâmica desses ecossistemas costeiros (Wang *et al.*, 2019). A estrutura do mangal é fortemente influenciada pela diversidade e abundância relativa das espécies arbóreas que a compõem, uma vez que diferentes táxons contribuem de maneira diferenciada para a produtividade primária e, conseqüentemente, para a biomassa aérea total (Indrayani *et al.*, 2021).

7.1. Estimativa da biomassa acima do solo do mangal do rio Maputo a partir de equações alométricas específicas

A relação alométrica entre o DAP e a biomassa aérea tem sido documentada por diversos pesquisadores, destacando-se os trabalhos de Comley e McGuinness (2005) e Indrayani *et al.*, (2021), que validaram empiricamente essa correlação para diferentes espécies de mangal.

Neste estudo, foram utilizadas equações alométricas específicas por espécie: para *Avicennia marina* e *Ceriops tagal* adotaram-se as equações propostas por Comley e McGuinness (2005); para *Bruguiera gymnorhiza*, as equações de Cole *et al.*, (1999) e Kauffman & Cole (2010); e para *Rhizophora mucronata*, utilizaram-se os modelos de Kauffman & Cole (2010). A escolha dessas equações buscou garantir maior precisão nas estimativas, considerando as variações morfológicas e ecológicas específicas de cada espécie.

As medições de DAP nas parcelas inventariadas apresentaram ampla variabilidade, oscilando entre 3,16 cm e 81,10 cm, com média de 26,91 cm. Esses valores contrastam significativamente com os observados por Nesha (2019), cujo intervalo foi de 11,90 cm a 22,93 cm, com média de 16,81 cm, sugerindo diferenças estruturais marcantes entre os sítios estudados, possivelmente atribuídas a fatores como idade do povoamento, regime de marés, grau de perturbação antrópica e características edáficas.

As estimativas de AGB obtidas com base nas equações alométricas para as 115 quadrículas analisadas resultaram numa média de 528.172,15 Mg/ha. Este valor é substancialmente superior à média reportada por Pham e Yoshino (2017), de 86,29 Mg/ha, o que reforça a influência do tipo de floresta, densidade de indivíduos e estrutura vertical sobre os padrões de acúmulo de biomassa. No que se refere ao uso de dados de radar, observou-se que os coeficientes de retroespalhamento nas polarizações HH e HV da banda L apresentaram comportamento decrescente com o aumento

da biomassa, particularmente entre os intervalos de 100 a 120 Mg/ha. Esse padrão está de acordo com o princípio físico de saturação do sinal de radar em áreas de alta biomassa, o que limita a capacidade de discriminação a partir de determinado limiar.

A biomassa acima do solo (AGB) é considerada uma variável-chave para descrever as características estruturais e funcionais dos ecossistemas florestais, representando toda a biomassa viva localizada acima da superfície do solo, incluindo caules, ramos e folhas (Antropov *et al.*, 2017). A magnitude da AGB varia entre espécies de mangal, sendo influenciada por múltiplos fatores, como o diâmetro das árvores, densidade do povoamento, fertilidade do solo e capacidade de sequestro de carbono (Kusmana *et al.*, 1992).

7.2. Parâmetros biofísicos

A análise de correlação entre os parâmetros biofísicos e os dados de retroespalhamento da banda L, especificamente nas polarizações HH e HV, revelou relações estatisticamente fracas. Observou-se que a correlação entre a biomassa acima do solo (AGB) e o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH foi pouco significativa, enquanto o σ^0 na polarização HV apresentou correlações não significativas com todos os parâmetros biofísicos analisados, incluindo DAP e a altura das árvores. Tais resultados são consistentes com os achados de Pereira *et al.*, (2016), que reportaram uma correlação negativa moderada entre o DAP e o σ^0 HH, bem como correlações fracas com o σ^0 HV.

Contudo, esses padrões contradizem estudos como os de Nesha (2019) e Pham e Yoshino (2017), nos quais foram identificadas correlações positivas e estatisticamente relevantes entre variáveis biofísicas e o retroespalhamento, sugerindo que a resposta do sinal de radar pode variar significativamente em função da estrutura da floresta, densidade do povoamento, umidade do solo, conteúdo de salinidade e condições atmosféricas no momento da aquisição das imagens.

A baixa correlação observada neste estudo entre os dados de radar e os atributos biofísicos limita a confiabilidade de modelos preditivos baseados exclusivamente em dados de retroespalhamento. Essa limitação evidencia a necessidade combinar diferentes fontes de dados para melhorar a acurácia das estimativas. A integração de variáveis biofísicas de campo com dados orbitais provenientes de sensores ativos, como o ALOS-2/PALSAR-2, pode oferecer uma visão mais abrangente da variabilidade estrutural dos mangais, permitindo o desenvolvimento de modelos híbridos mais robustos para a estimativa da biomassa aérea.

Adicionalmente, embora a resposta de retroespalhamento nas polarizações HH e HV não tenha se mostrado eficaz para a estimativa direta da biomassa neste caso, o seu potencial para aplicações em detecção de mudanças não pode ser negligenciado. A literatura aponta que a polarização HH tende a ser mais sensível a alterações estruturais iniciais, como a supressão parcial do dossel, ao passo que a polarização HV pode ser mais apropriada para identificar estágios mais avançados de degradação ou desmatamento intensivo. Portanto, mesmo diante das limitações identificadas na quantificação direta da biomassa, as polarizações da banda L ainda oferecem valor significativo no contexto do monitoramento dinâmico da integridade dos mangais.

7.3. Modelagem e estimativa da biomassa usando dados do sensor ALOS-2/PALSAR-2

Os dados de radar de abertura sintética (SAR) têm sido amplamente utilizados na estimativa da biomassa acima do solo (AGB) em ecossistemas florestais tropicais, incluindo os mangais, devido à sua capacidade de penetrar parcialmente no dossel vegetal e interagir com estruturas lenhosas como troncos e galhos — componentes que concentram a maior parte da biomassa aérea (Kuplich, 2003). Diversos estudos destacam a eficácia desses dados orbitais na quantificação da biomassa de mangais, tanto em escala local quanto regional (Hu *et al.*, 2020; Nesha *et al.*, 2020; Pham e Yoshino, 2017), corroborando seu valor aplicado no mapeamento de ecossistemas costeiros.

Além disso, diferentes autores têm demonstrado o potencial dos dados SAR no mapeamento da distribuição da biomassa acima do solo em mangais, com bons níveis de acurácia obtidos por meio de técnicas estatísticas e modelos empíricos de regressão (Fatoyinbo & Simard, 2013; Winarso *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2022). Entre essas abordagens, os modelos de regressão linear múltipla são amplamente utilizados na literatura por sua simplicidade e capacidade de capturar padrões entre variáveis biofísicas e espectrais (Zeng *et al.*, 2022). No entanto, os resultados obtidos neste estudo mostraram limitações na capacidade explicativa dos modelos gerados, com um coeficiente de determinação (R^2) de apenas 0,051, ou seja, os modelos explicaram apenas 5,1% da variação espacial da AGB.

Esse desempenho contrasta com os achados de Pham e Yoshino (2017), Nesha *et al.*, (2020) e Zeng *et al.*, (2022), cujos modelos, também baseados em dados ALOS-2/PALSAR-2, apresentaram maior poder preditivo e maior correlação com os dados de campo. De forma semelhante, Rovai *et al.*, (2015), ao empregar uma abordagem fundamentada na estatística geográfica e nos gradientes climáticos, baseando-se na hipótese de assinatura ambiental

(*environmental signature hypothesis*), obtiveram modelos com capacidade explicativa limitada, que explicavam apenas cerca de 20% da variação da AGB em mangais tropicais.

A variação nos resultados entre diferentes estudos pode ser atribuída a múltiplos fatores. Um dos mais relevantes diz respeito à seleção das equações alométricas utilizadas para a conversão dos dados de campo em valores de biomassa. A escolha inadequada ou generalizada dessas equações pode introduzir incertezas significativas nas estimativas. Outro fator importante é a representação espacial da vegetação através dos mapas de distribuição de mangais, que podem conter erros de classificação ou desajustes espaciais entre as unidades amostrais e os pixels das imagens orbitais. Adicionalmente, Fassnacht *et al.*, (2014), ao avaliar a influência do tamanho amostral, da natureza dos dados utilizados e dos métodos de predição, destacam que baixos valores de R^2 podem estar relacionados a intervalos estreitos nos dados de biomassa. Quando a variabilidade da biomassa nas áreas amostradas é pequena, a capacidade dos modelos estatísticos de capturar relações significativas com os dados espectrais ou estruturais torna-se limitada, comprometendo o desempenho geral do modelo. Esse aspecto pode ser um fator contribuinte para os resultados obtidos no presente estudo.

8. Conclusão

O principal objectivo do estudo foi avaliar a aplicabilidade das imagens de radar do sensor ALOS-2/PALSAR-2 no mapeamento da biomassa acima do solo (AGB) em florestas de mangal ao longo do rio Maputo. Para isso, foram analisadas as relações entre parâmetros biofísicos obtidos em campo (como o diâmetro à altura do peito e a altura das árvores) e os coeficientes de retroespalhamento das polarizações HH e HV, além da construção de modelos de regressão linear múltipla com base nesses dados.

Os resultados demonstraram correlações fracas entre as variáveis espectrais e os parâmetros biofísicos. O coeficiente de Pearson foi de apenas 0,151 para a polarização HH e -0,010 para a polarização HV, indicando baixa capacidade de explicação da variabilidade da biomassa a partir do sinal SAR. O modelo de regressão gerado apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,051, ou seja, explicou apenas 5,1% da variação da biomassa acima do solo. Esses valores indicam que, nas condições específicas deste estudo, o sensor ALOS-2/PALSAR-2 possui eficácia limitada para a modelagem quantitativa da AGB em mangais densos como os do rio Maputo.

Embora a biomassa total estimada tenha sido elevada 528172.15 Mg/ha, esse fator contribuiu para a saturação do sinal de radar, o que dificulta a distinção entre diferentes níveis de biomassa em áreas de alta densidade florestal. Adicionalmente, o intervalo estreito de variabilidade da biomassa e a possível influência das equações alométricas utilizadas também podem ter contribuído para a baixa performance dos modelos.

Portanto, conclui-se que, apesar do potencial das imagens ALOS-2/PALSAR-2 para aplicações em ambientes florestais, a sua eficácia no mapeamento da biomassa acima do solo de mangais densos é limitada quando utilizada de forma isolada. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a adoção de abordagens integradas, que combinem dados de radar e ópticos com variáveis biofísicas de campo e modelos alométricos ajustados ao contexto ecológico local, visando melhorar a precisão e a confiabilidade das estimativas de biomassa em ecossistemas costeiros complexos como os mangais.

9. Limitações e recomendações

- É essencial garantir que os pontos amostrados em campo, com base nas coordenadas geográficas obtidas por GPS, sejam corretamente posicionados sobre os dados da imagem, de modo a evitar erros espaciais que comprometem a correspondência entre os dados de campo e os valores espectrais;
- Devem ser criadas equações alométricas específicas da área de estudo;
- As etapas de correção geométrica, calibração radiométrica e aplicação de filtros de redução de ruído devem ser cuidadosamente conduzidas. Em particular, a escolha e configuração do filtro de speckle (ruído granular intrínseco aos dados SAR) devem ser feitas de forma criteriosa, evitando a perda de informações relevantes à variabilidade da AGB;
- A construção de modelos de regressão deve considerar separadamente as espécies arbóreas presentes, uma vez que a estrutura morfológica e as propriedades dielétricas variam entre espécies, influenciando a interação com o sinal de radar. Modelos específicos por espécie tendem a aumentar a acurácia das estimativas de biomassa.

10. Referências bibliográficas

- Adame, M., J.B. Kauffman, I. Medina, J.N. Gamboa, e O. Torres (2013). Carbon Stocks of Tropical Coastal Wetlands within the Karstic Landscape of the Mexican Caribbean. *PLos one*, 8(2), e56569.
- Afonso, C.M.L (2001). *Aspetos da Pesca e da Biologia de Penaeus monodon Fabricius, 1798 e Penaeus semisulcatus de Haan, 1844 na Pescaria Artesanal de Camarão da Baía de Maputo, Moçambique*. Tese de Licenciatura, 54 pp, Faro, Universidade do Algarve.
- Alencar, B. P.B (2013). *Análise de Áreas de Sombras em Imagens ALOS/PALSAR*. Tese de mestrado, Pp: 66. Brasil, Universidade Federal de Pernambuco.
- Antropov, O., Y. Rauste, T. Häme e J. Praks (2017). Polarimetric ALOS PALSAR Time Series in Mapping Biomass of Boreal Forests. *Remote Sensing*. 9:999, 2-14.
- Azlan, I., e R. Othman (2009). Monitoring of Mangrove Area Using Remote Sensing Toward Shoreline Protection, *GIS Ostrava*.
- Azyleah A, J.A. Castillo, e Y.J. Lee (2014). Species Diversity, Biomass, and Carbon Stock Assessments of a Natural Mangrove Forest in Palawan, Philippines. *Pakistan Journal of Botany*, 46(6): 1955-1962.
- Bacar, F.F., S. N. Lisboa e A. Siteo (2023). The Mangrove Forest of Quirimbas National Park Reveals High Carbon Stock Than Previously Estimated in Southern Africa. *Wetland Ecology*, 43:60, pp: 2.
- Balidy, H (2013). *Os Mangais*. Pp: 54.
- Baloloy, A.B., A.C. Blanco, C, G. Candido, R.J.L. Argamosa, J.B.L.C. Dumalag, L.L.C. Dimapilis, e E.C. Paringit (2018). Estimation of Mangrove Forest Aboveground Biomass Using Multispectral Bands, Vegetation Indices and Biophysical Variables Derived from Optical Satellite Imageries: Rapideye, Planetscope and Sentinel-2. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v: IV-3, 29-33.
- Bandeira, S. e J. Paula (2014). The Maputo Bay Ecosystem; *WIOMSA: Zanzibar Town, Tanzania*, p. 427.
- Barbosa, F.M.A., C.C. Cuambe, e S.O. Bandeira (2001). Status and Distribution of Mangroves in Mozambique. *South African Journal of Botany*, 67:393-398.
- Barros, J (2023). *O que é o Sensoriamento Remoto? Conceitos e Características*. <https://www.geoaplicada.com/sensoriamento-remoto/>, Junho de 2023, 19 de julho de 2024.

- Beneditti, C. A (2010). *Imagens Multitemporais ALOS/PALSAR Baseada em Orientação a Objeto na Discriminação da Cobertura da Terra*. Tese de mestrado, pp: 16. Brasil, Universidade Estadual Paulista.
- Beentje, H e S. Bandeira (2007). *Field Guide to the Mangrove Trees of Africa and Madagascar*. Kew Publishing, UK.
- Brito, S.H.B (2013). *O Espectro Eletromagnético na Natureza*. <http://labcisico.blogspot.com/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>, 5 de Março de 2013, 19 de Julho de 2024.
- Chein, F (2019). *Introdução aos Modelos de Regressão Linear. Um Passo Inicial para Compressão da Econometria como uma Ferramenta de Avaliação de Políticas Públicas*. Pp: 10-77, Enap, Brasília.
- Clough, B. F., e K. Scott (1989). Allometric Relationships for Estimating Above-ground Biomass in Six Mangrove Species. *Forest Ecology and Management*, 27(2), 117– 127.
- Cohen, R., J. Kaino, J.A. Okello, J.O. Bosire, J.G. Kairo, M. Huxham, e M. Mencuccini, (2013). Propagating Uncertainty to Estimates of Above-Ground Biomass for Kenyan Mangroves: A Scaling Procedure from Tree to Landscape Level. *For. Ecol. Manag.*, 310, 968–982.
- Cole, T.G., K. Ewel e N.N. Devoe, (1999). Structure of Mangrove Trees and Forests in Micronesia. *Forest Ecology and Management* 117: 95-109.6
- Comley, B. W. T., e K. A. McGuinness (2005) Above- and Belowground Biomass, and Allometry, of Four Common Northern Australian Mangroves. *Aust. J. Bot.*, 53, 431– 436.
- Conselho de Ministros (2020). *Estratégia de Gestão do Mangal 2020-2024*. Pp: 1.
- CRISP (Centre for Remote Imaging, S. and P.) (2001). *SAR Imaging - Frequency, Polarization and Incident Angle*.
- Cuamba, E., L. Vieira, e F. Morgado (2019). Condição Ecológica e Biomassa da Floresta de Mangal da Baía de Quionga no contexto das Alterações Climáticas (Norte Moçambique). *CAPTAR*, 8(1), 76-96.
- Cunha-Lignon, M e M. Kampel (2011). Análise Multitemporal de Imagens Landsat para Monitoramento de Áreas de Manguezal: Subsídio à Gestão Costeira do Litoral Sul do Estado de São Paulo. *INPE*, p:5032, Brasil.

- Di Maio, A. B.F.T. Rudorff, E.C. Morais, G. Pereira, M.A. Moreira, T.M. Sausen, e T. G. Florenzano, (2008). *Sensoriamento Remoto*. Edição 2008, MCT. AEB.
- Dias, P.L (2018). *Análise Multitemporal por Imagem de Satélite de Expansão Urbana da Sede Municipal de Abaetetuba-PA*. Tese de Licenciatura, pp:23, Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia.
- DLR (2013). *Microwaves and Radar Institute - Mission Concept-DLR*. Retrieved May 1, 2019, from https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-8113/14171_read-35852/.
- Dos Santos, E. M (2009). *Análise de Imagens do Satélite ALOS PALSAR (Banda-L, Modo Polarimétrico) para Discriminação de Coberturas de Terras do Distrito Federal*. Tese de mestrado, pp: 32, Brasília, Universidade de Brasília.
- Duke, N. C (2011). Mangroves. *ResearchGate*.
- Dutra, L. V., J.C. Mura, C. C.Freitas, J. R. Santos e M.T. Elmiro (2003). Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética- Princípios e Aplicações. *Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens*, pp:4-13.
- Erftemeijer, P., M. de Boer, e L. Hilarides (2022). Status of Mangrove in the Western Indian Ocean Region. *Wetlands International*.
- Fassnacht, F.E., F. Hartig, H. Latifi, C. Berger, J. Hernández, P. Corvalán e B. Koch (2014). Importance of Sample Size, Data Type and Prediction Method for Remote Sensing-Based Estimations of Aboveground Forest Biomass, *Remote Sensing of Environmental*. 154: 102-114, pp: 102-110.
- Fatoyinbo T. E, M. Simard, R.A Washington-Allen e H.H Shugart (2008). Landscape-scale Extent, Height, Biomass, and Carbon Estimation of Mozambique's Mangrove Forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data. *Journal of Geophysical Research*, 113: G02S06.
- Fatoyinbo, T.E., e M. Simard (2013). Height and Biomass of Mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2), 668-669pp.
- Fernandes, D e M.T.C. Fernandes (1998). *Imagens de Radar de Abertura Sintética como Instrumento de Auxílio na Avaliação do Impacto Ambiental*. Pp:734, Brasil, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

- Finatto, H (2021). *Proposta de Antena para Aplicação em Radar de Abertura Sintética na Banda C Embarcada em Veículo Aéreo de Pequeno porte*. Tese de bacharel, Alegrete, Universidade Federal do Pampa.
- Garrafiel, G, F (2018). *Mapeamento de Inundações Urbanas a partir de Imagens de Radar de Abertura Sintética do Programa Sentinel*. Tese de licenciatura. Pp:29-38, Brasil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Giri, C., E. Ochieng, L.L. Tieszen, Z. Zhu, A. Singh, T. Loveland, J. Masek e N. Duke (2010). Status and Distribution of Mangrove Forests of the World Using Earth Observation Satellite Data. *Global Ecology and Biogeography*, 1.
- Goulão, S. A (2018). *Radares de Abertura Sintética (SAR): Os Fundamentos e Potencialidade de Uso na Marinha Portuguesa*. Tese de mestrado, pp: 9-43, Alfeite, Escola Naval.
- Green, E.P., C.D. Clark, e A.J. Edwards (2000). Image Classification and Habitat Mapping. *ResearchGate*, Paris.
- Hu, T., Y. Zhang, Y. Su, Y. Zhung, G. Lin e Q. Guo (2020). Mapping the Global Mangrove Forest Aboveground Biomass Using Multisource Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 12: 3.
- Hughes, R.H., J.S. Hughes (1992). *A Directory of African Wetlands*. IUCN, Gland, Cambridge; UNEP, Nairobi; WCMC, Cambridge.
- Humboldt State University (2016). *Interpreting Imaging Radar*.
- Indrayani, E., J. D. Kalor, M. Warpur e B. Hamuna (2021). Using Allometric Equations to Estimate Mangrove Biomass and Carbon Stock in Demta Bay, Papua Province, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22 (5), 263-271, pp: 267-268, Indonesia.
- INOM (2022). *Guião de Técnicas básicas de Restauração de Mangal*. Pp: 7-9.
- JAXA (2008) *ALOS Data Users Handbook*.
- JAXA (2014). *Press Release. Advanced Land Observing Satellite. ALOS 2*.
- Jensen, J.R., e J.C.N. Epiphanyo (2011). Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma Perspectiva em Recursos Terrestres. *Parêntese*.
- Jesus, J. B e T. M Kuplich (2021). Utilização de Imagens SAR na Classificação de Formações Florestais Brasileiras. *Ci.Fl.v.31, n.3*, pp:12. Santa Maria.

- Ji, Minhe, J. Hu e J. Feng (2010). Measuring Mangrove Biomass via Remote Sensing Subpixel Analysis. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability VII*, vol.7809, pp: 1.
- Kathiresan, K, e B.I. Bingham (2001). Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 40: 81-251.
- Kauffman, J.B. e T. Cole (2010) Micronesian Mangrove Forest Structure and Tree Response to a Severe Typhoon. *Wetlands* 30: 1077-1084.
- Kauffman, J.B., e Donato, D.C. (2012). Protocols for the Measurement, Monitoring and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Forests. *CIFOR*, pp: 86. Bogor.
- Kramer, A (2003). Managing Freshwater Ecosystems of International Water Resources – The Case of the Maputo River in Mozambique. *Working Paper on Management in Environmental Planning* 07/2003, Pp: 17-26. Berlin.
- Kuplich, T. M (2003). Estudos Florestais com Imagens de Radar. *Espaço & Geografia*, 6 (1): 74-81.
- Kusmana C., S. Sabiham, K. Abe, e H. Watanabe (1992). An Estimation of Above Ground Tree Biomass of a Mangrove Forest in East Sumatera, Indonesia. *Tropics*, 1(4), 143–257.
- Kutner, M. H., C.J. Nachtsheim, J. Neter, e W. Li (2005). *Applied Linear Statistical Models*. Pp: 2, 5ªed, New York, McGraw-Hill/rwin.
- Latifi, H., F. E. Fassnacht, F. Hartig, C. Berger, J. Hernández, P. Corvalán e B. Koch (2015). Stratified Aboveground Forest Biomass Estimation by Remote Sensing Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38 (229-241).
- Le Toan, T., G. Picard, J.M. Martinez, P. Melon e M Davidson (2002). On the Relationships between Radar Measurements and Forest Structure and Biomass. In: *International Symposium on Retrieval of Bio and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*.
- Lee, J.S e E. Pottier (2009). Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. Chapman and Hall/CRC: ProQuest Ebook Central. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itc/detail.action?docID=427062>.

- Lewis, A.J., P.M. Henderson, e D.W. Holcomb (1998). Radar Fundamentals: the Geoscience Perspective. In: Lewis, A.J., F. M. Henderson (1998). *Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar*. 3ª Ed, pp: 866, New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Li, S., Z. Zhu, W. Deng, Q. Zhu, Z. Xu, B. Peng, F. Guo, Y. Zhang e Z. Yang (2024). Estimation of Aboveground Biomass of Different Vegetation Types in Mangrove Forests Based on UAV Remote Sensing. *Elsevier, Sustainable Horizons*, vol. 11, pp 1-4.
- Lin, Y, Y.C. Chen, Y.T. Kuo e W.A. Chao (2022). Performance Study of Landslide Detection Using Multi-Temporal SAR Images. *Remote sensing*, 14, 2444.
- Litulo, C., R.S. Fernandes, M. Soares e M.A.M. Pererira (2023). Estudo sobre os Mangais do Distrito da Matola e Estuário do Espírito Santo, Baía de Maputo. ResearchGate, pp: 3.
- Lopes, G. O e C.A. Lima (2009). *Características e Aplicações das Imagens SAR na Identificação de Alvos na Região Amazônica*. Pp:7329. INPE, Brasil.
- Luís, A. A (2011). *Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica e Detecção Remota no Monitoramento do Mangal da Cidade da Beira*. Tese de Mestrado, pp:27-28, Beira, Universidade Católica de Moçambique.
- Macamo, C., J. B. Adams., S. Bandeira, e H. Mabilana (2018). Spatial Dynamics and Structure of Human Disturbed Mangrove Forests in Contrasting Coastal Communities in Eastern Africa. *ResearchGate*. 38(1).
- Machava-António, V., A. Fernando, M. Cravo, M. Massingue, H. Lima, C. Macamo, S. Bandeira, e J. A. Paula (2022). Comparison of Mangrove Forest Structure and Ecosystem Services in Maputo Bay (Eastern Africa) and Príncipe Island (Western Africa). *Forest*, 13, 1466.
- Manavalan, R. (2018). Review of Synthetic Aperture Radar Frequency, Polarization, and Incidence Angle Data for Mapping the Inundated Regions. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(02), 1.
- Mariquele, S. A (2018). *Avaliação das Condições Hidrológicas de Maré para a Restauração do Mangal- Caso do Campo de Restauo de Mangal C do Bairro, Cidade de Quelimane*. Tese de licenciatura, pp: 3, Zambézia, Universidade de Eduardo Mondlane.

- Meera Gandhi, G.; S. Parthiban, N. Thummalu; e A. Christy (2015). NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis- A Case Study of Vellore District. *Elsevier*, (57) 1199-1210.
- Mikhail. E. M., J.S. Bethel e C. McGlone (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. *John Wiley*, pp: 479, Nova York.
- MITADER (2015). *Estratégia e Plano de Ação Nacional para Restauração de Mangal 2015-2020*. Draft, Centro de Desenvolvimento Sustentável para as Zonas Costeiras, Moçambique.
- Monzon, A.K., R. Ang. F. Tavora, E. Paringit, J.D. Alban e M. T. Estomata (2013). ALOS PALSAR 50-Meter Mosaic Step-by-step Processing Manual on Forest Cover Classification: A Training Manual (2012). *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*. Pp: 4, Philippines.
- Moraes, E.M.L de (2010). *Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações*. 4ªed, São Paulo: Edgar Blucher Ltda.
- Mundlovo, S (2006). *Tabela de Marés*. Instituto de Hidrografia e Navegação. Pp: 85.
- Natural Resources Canada. (2015a). *Polarimetric scattering*.
- Neta, S.R.A (2009). Uso de Imagens ALOS/PALSAR Multipolarizadas para Detecção de Incremento de Desflorestamento na Amazônia. Tese de mestrado, pp : 50-64, São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Nesha, K (2019). *Estimating and Mapping Aboveground Biomass/Carbon Stock Using ALOS-2 PALSAR-2 in the Mangrove Forest in East Kalimantan, Indonesia*. Tese de mestrado, pp: 7-11. Indonesia, University of Twente.
- Nesha, K., Y. A. Hussin, L. M. van Leeuwen e Y. B. Sulistioadi (2020). Modeling and Mapping Aboveground Biomass of the Restored Mangroves Using ALOS-2 PALSAR-2 in East Kalimantan, Indonesia. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 91 102158, pp: 1-4.
- Neves, R., R. Inácio., e V. Gomes (2005). *Mangais Berçário Biológico e o Boto o Habitante Especial*. Pp: 5. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Nhamuhuco, T.D (2021). Avaliação Espaço-Temporal da Cobertura de Mangal em Quionga- Distrito de Palma, Norte de Moçambique entre os Anos 1995, 2008 2 2019. Tese de Mestrado, pp: 20, Maputo, Universidade Eduardo Mondlane.

- Novo, E.M.L.M e F.J. Ponzoni (2001). *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. Pp: 6. São José dos Campos.
- Paradella, W.R.; A.R. Santos, P. Veneziani e E.S.P. Cunha (2005). Radars Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspetivas. *Revisão Brasileira de Cartografia*, v.57, n1, p:56-62.
- Paula, J., C. Macamo, e S. Bandeira. (2014). *Mangroves of Maputo Bay*.
- Pereira, F. R.S., M. Kampel e M. Cunha-Lignon (2016). Mangrove Vegetation Structure in Southeast Brazil from Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar Data. *J. Appl. Remote Sens.* 10 (3), pp: 036021-10.
- Pham, T. D., N. Yokota, D.T. Bui, K. Yoshino, e S.A. Friess (2019). Remote Sensing Approaches for Monitoring Mangrove Species, Structure, and Biomass: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*.
- Pham, T.D e K. Yoshino (2017). Aboveground Biomass Estimation of Mangrove Species. *Research Gate*, 11 (12), Vietnam.
- Podest, E. A. McCullum, J.L.T. Perez e S. McCartney (2020). Forest Mapping and Monitoring with SAR Data: *Mangrove Mapping*. NASA, pp: 22.
- Polidoro, B. A, K.A. Carpenter, L. Collins, N.C. Duke, A.M. Ellison, J.C. Ellison, E.J. Farnsworth, E.S. Fernando, K. Kathiresan, N.E. Kpedan, S.R. Livingstone, T. Miyagi, G.E. Moore, V.N. Nam, J.E. Ong, J.H. Primavera, S.G. Salmo, J.C. Sanciangco, S. Sukardjo, Y. Wang, e J.W.H. Yong (2010). The Loss of Species: Mangrove Extinction Risk and Geographic Areas of Global Concern. *PLoS One*, 5(4), e10095.
- Richmond, M.D (2011). *A Field Guide to the Seashores of Eastern Africa and the Western Indian Ocean Islands*. 3ªed, 17pp. Estocolmo, Sida/WIOMSA.
- Robelus, R. (1984): *Estuário de Maputo - levantamento da situação de poluição actual*. Instituto Nacional de Saúde, Maputo, Mozambique.
- Rovai, A. S., P. Riul, R.R. Twilley, E. Castañeda-Moya, V.H. Rivera-Monroy, A.A. Williams, M. Simard, M. Cifuentes-Jara, R. R. Lewis, S. Crooks, P.A. Horta, Y. Schaeffer-Novelli, G. Cintron-Molero, M.M. Pozo-Cajas e P.R.Paliosa (2015). Scaling Mangrove Aboveground Biomass from Site-Level to Continental Scale. *Global Ecology and Biogeography*, pp: 4-8.

- Schill, S., V. McNulty e D. Perez (2024). *Remote Sensing Techniques for Mapping and Monitoring Mangroves at Fine Scales*. Pp: 1-53, Roma, FAO.
- Servello, E. L (2010). *Dados Polarimétricos do RADARSAT-2 (Banda C) na Discriminação de Uso e Cobertura da Terra na Região da Floresta Nacional do Tapajós*. Tese de Mestrado São Paulo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Servino, R.N., L.E.O. Gomes, e A.F. Bernardino (2018). Extreme Weather Impacts on Tropical Mangrove Forests in the Eastern Marine Ecoregion of Brazil. 628-629:233, *ResearchGate*.
- Silva, W. F., D. A. Aguiar, B.F.T. Rudorff, A. R. Formaggio e W.R. Paradella (2011). Relação entre o Coeficiente de Retroespalhamento do SAR-R99B e o NDVI para a Cultura do Algodão. *ResearchGate*, pp:8334.
- Simard, M (2019 a). Appendix E, Mapping and Monitoring Mangrove Forests with Radar Remote Sensing- Chapter 6 Training Module. NASA.
- Simard, M (2019 b). Radar Remote Sensing of Mangrove Forests. SAR Handbook: Comprehensive Methodologies of Forest Monitoring and Biomass Estimation. NASA.
- Spalding, M. D e M. Leal (2021). O Estado dos Manguezais pelo Mundo 2021. *Global Mangrove Alliance*. Pp: 38.
- Touzi, R., M. Shimada e T. Motohka (2023). Calibration and Validation of Polarimetric ALOS2-PALSAR-2. remote sensing, 14 (2452): 1-2.
- Ulaby, F.T., C.T. Allen., G. Eger, e E. Kanemasu (1984). Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index. *Remote Sensing Environment*, v.14, n.1-3, pp: 113-133.
- Umarhadi, D.A e A. M. Syarif (2018). Regression Model Accuracy Comparison on Mangrove Canopy Density Mapping. *Physical Science and Enginnering*, 1: 1-11. Pp: 3.
- Vaiphasa, C (2006). *Remote Sensing Techniques for Mangrove Mapping*. Tese de Doutorado, pp: v-1, Netherlands, UniversidadeWegeningen.
- Wang, L., M. Jia, D. Yin e J. Tian (2019). A Review of Remote Sensing For Mangrove Forests: 1956-2018. *Remote Sensing Environment*, 231 (111223), pp: 8-11.
- Winarso, G., Y. Vetrita, A.D. Purwanto, N. Anggraini, S. Darmawan e D. M. Yuwono (2015). Mangrove Above Ground Biomass Estimation Using Combination of LANDSAT

8 and ALOS PALSAR Data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Scienses*, 12 (2): 85-96.

- Zeng, P., W. Zhang, Y. Li, J. Shi, e Z. Wang (2022). Estimativa da Biomassa Aérea Total e da Componente Florestal (AGB) através de Dados SAR Polarimétricos das Bandas C e L. *Florestas*, 13:442.