



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GEORGE ALVES MOURA**

**MÉTODOS DE ESTIMATIVAS PARA BIOMASSA RADICULAR EM FLORESTA  
TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**FORTALEZA**

**2026**

GEORGE ALVES MOURA

MÉTODOS DE ESTIMATIVAS PARA BIOMASSA RADICULAR EM FLORESTA  
TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo

Coorientadora: Dra. Eveline Menezes Rodrigues da Silva

FORTALEZA

2026

GEORGE ALVES MOURA

MÉTODOS DE ESTIMATIVAS PARA BIOMASSA RADICULAR EM FLORESTA  
TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Agronomia do Centro  
de Ciências Agrárias da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de Bacharel em Agronomia.

Aprovada em: 20/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Eveline Menezes Rodrigues da Silva (Coorientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Nazaré Suziane Soares  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Felipe Hermínio Meireles Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, João e Sandra,  
e à minha noiva, Júlia,  
com gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Batista, por ter me educado na minha primeira década de vida — sinto profundamente sua falta — e Fátima Sandra, por todo o esforço, apoio, dedicação e por ter acreditado em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha noiva, Júlia ‘Lia’ Storch, pela presença constante ao longo de toda a graduação, compartilhando dificuldades, conquistas e aprendizados. Nada disso teria sido possível sem você.

À professora Dr<sup>a</sup>. Isabel Cristina da Silva Araújo, pela oportunidade de atuar como seu bolsista e pelos ensinamentos construídos ao longo de três anos de convivência acadêmica, fundamentais para minha formação.

Ao professor Dr. Adunias dos Santos Teixeira, pelos ensinamentos em geoprocessamento, que marcaram minha trajetória e transformaram minha visão sobre a Agronomia.

Ao professor Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, que alavancou minha vida acadêmica, pelos aprendizados proporcionados e pelas amizades construídas no período como seu bolsista.

Aos membros da banca examinadora: Dr.<sup>a</sup> Eveline Menezes Rodrigues da Silva, Dr.<sup>a</sup> Nazaré Suziane Soares e Me. Felipe Hermínio Meireles Nogueira, da Universidade Federal do Ceará (UFC). Pelas valiosas contribuições, sugestões e considerações apresentadas ao longo da avaliação deste trabalho.

Aos amigos Davi, Gustavo, Gabriel, Jônathas, Ryan e demais colegas do grupo ‘CHONPS’, bem como a todos os outros que, direta ou indiretamente, tornaram essa jornada mais leve, oferecendo apoio, incentivo, companheirismo e momentos de descontração.

Ao grupo de pesquisa Manejo de Solo e Água no Semiárido (MASSA), pelo suporte científico e ambiente acadêmico favorável ao desenvolvimento deste trabalho.

À FUNCAP, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos, essencial para a realização desse trabalho.

À Universidade Federal do Ceará, pelas oportunidades acadêmicas e pelas bolsas de estudo concedidas ao longo da graduação.

“Roots are the hidden half of plant life.”  
(RUSSELL, 1977, p. 298).

## RESUMO

As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS), como a Caatinga, exercem papel relevante no ciclo global do carbono, sendo a biomassa radicular um componente fundamental tanto para o armazenamento de carbono subterrâneo quanto para a sustentação fisiológica das plantas em ambientes com elevada sazonalidade hídrica. Apesar de sua importância ecológica, a quantificação da biomassa radicular ainda apresenta desafios metodológicos. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar e comparar o desempenho de diferentes abordagens para a estimativa da biomassa radicular em uma área de Caatinga em pousio no estado do Ceará. Foram analisadas três estratégias: equações alométricas baseadas em atributos morfológicos radiculares, um modelo de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) obtido por dados hiperespectrais e modelos de regressão simples baseados em índices de vegetação derivados de imagens orbitais (MIO). A biomassa de referência foi obtida por meio do método destrutivo do núcleo de crescimento interno, com coletas realizadas em distintos períodos climáticos. Os resultados indicaram que as equações alométricas quando aplicadas a dados independentes apresentaram coeficientes de determinação intermediários ( $R^2_{\text{pred}}=0,66$ ) e erros de predição relativamente elevados ( $\text{RMSEP}=2,39 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). O modelo PLSR demonstrou potencial para a estimativa da biomassa radicular quando aplicado a dados independentes ( $R^2_{\text{pred}}=0,37$ ;  $\text{RMSEP}=3,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), evidenciando a necessidade de aprimoramento do modelo. Embora o modelo por imagens orbitais, baseado no índice VARI, tenha apresentado os melhores indicadores estatísticos de ajuste e validação, com maiores valores de  $R^2$  (0,975) e menores erros de predição ( $\text{RMSE}=0,371 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), o reduzido número amostral ( $n=6$ ) limita a robustez dos resultados, exigindo cautela em sua interpretação devido o risco de sobreajuste. Conclui-se que, embora todas as abordagens apresentem potencial para a estimativa da biomassa radicular até a profundidade de 30 cm na Caatinga, cada uma possui limitações específicas que devem ser consideradas.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática; Espectrorradiometria; Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

Seasonally Dry Tropical Forests (FTSS), such as the Caatinga, play a relevant role in the global carbon cycle, with root biomass being a fundamental component both for subsurface carbon storage and for the physiological support of plants in environments with high water seasonality. Despite their ecological importance, quantifying root biomass still presents methodological challenges. In this context, this study aimed to evaluate and compare the performance of different approaches for estimating root biomass in a fallow Caatinga area in the state of Ceará. Three strategies were analyzed: allometric equations based on root morphological attributes, a Partial Least Squares Regression (PLSR) model obtained from hyperspectral data, and simple regression models based on vegetation indices derived from orbital images (MIO). The reference biomass was obtained through the destructive ingrowth core method, with collections carried out in distinct climatic periods. The results indicated that the allometric equations, when applied to independent data, showed intermediate coefficients of determination ( $R^2_{\text{pred}}=0.66$ ) and relatively high prediction errors ( $\text{RMSEP}=2.39 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). The PLSR model demonstrated potential for estimating root biomass when applied to independent data ( $R^2_{\text{pred}}=0.37$ ;  $\text{RMSEP}=3.26 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), highlighting the need for model improvement. Although the orbital image model, based on the VARI index, presented the best statistical indicators of fit and validation, with higher  $R^2$  values (0.975) and lower prediction errors ( $\text{RMSE}=0.371 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), the small sample size ( $n=6$ ) limits the robustness of the results, requiring caution in their interpretation due to the risk of overfitting. It is concluded that, although all approaches show potential for estimating root biomass up to a depth of 30 cm in the Caatinga, each one has specific limitations that must be considered.

**Keywords:** Mathematical modeling; Spectroradiometry; Remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização da área de estudo: mapa do estado do Ceará, com destaque para o município de Pentecoste, a FEVC e a delimitação da área experimental (1,44 ha) .....	21
Figura 2 –	Caracterização da área experimental e exemplo de núcleo radicular. (a) Vista da área experimental do estudo; (b) núcleo de solo contendo sistema radicular após extração .....	23
Figura 3 –	Fluxograma para a obtenção da biomassa de referência .....	23
Figura 4 –	Etapas de obtenção e processamento de imagens para análise morfológica de raízes utilizando scanner de mesa e o software WinRHIZO .....	24
Figura 5 –	Exemplo de reflectância de uma amostra e sua respectiva derivada .....	26
Figura 6 –	Fluxograma para a estimativa da biomassa por modelo PLSR .....	27
Figura 7 –	Biomassa radicular total estimada por parâmetros radiculares em função da biomassa radicular observada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) .....	33
Figura 8 –	Biomassa radicular das raízes grossas ( $\text{Ø} > 2\text{mm}$ ) estimada por parâmetros radiculares em função da biomassa radicular observada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) .....	34
Figura 9 –	Relação entre biomassa radicular observada e estimada pelo modelo PLSR aplicada a dados independentes. A linha tracejada indica a relação 1:1 .....	35
Figura 10 –	Distribuição espacial da biomassa radicular estimada nos períodos seco, intermediário e chuvoso (2020-2023) .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Índices espectrais de vegetação utilizados no estudo, bandas espectrais associadas, sensibilidade biofísica e aplicações .....	20
Tabela 2 –	Comparação entre o estoque de biomassa radicular observado e estimado (Mg) por sensoriamento remoto orbital na área experimental (1,44 ha) .....	37
Tabela 3 –	Desempenho do modelo de regressão .....	38
Tabela 4 –	Comparação entre diferentes abordagens de estimativa da biomassa radicular .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Akaike Information Criterion
ESA	European Space Agency
EVI	Enhanced Vegetation Index
FEVC	Fazenda Experimental Vale do Curu
FTSS	Florestas Tropicais Sazonalmente Secas
LOOCV	Leave-One-Out Cross-Validation
ME	Mean Error (Erro Médio)
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PLSR	Partial Least Squares Regression (Regressão por Mínimos Quadrados Parciais)
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
RMSEP	Root Mean Square Error of Prediction (Raiz do Erro Quadrático Médio de Predição)
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
VARI	Visible Atmospheric Resistant Index
MIO	Modelo com dados obtidos por imagens orbitais

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Biomassa radicular da área experimental (Mg ha <sup>-1</sup> )
$\hat{B}$	Biomassa radicular estimada (Mg ha <sup>-1</sup> )
$\bar{B}$	Biomassa radicular média (Mg ha <sup>-1</sup> )
$\hat{B}_{(pix,i)}$	Biomassa estimada no pixel $i$ (Mg)
$\hat{B}_{(ha,i)}$	Biomassa estimada no pixel $i$ , expressa em Mg ha <sup>-1</sup>
$\hat{B}_{norm}$	Biomassa radicular estimada normalizada
$B_{max}$	Valor máximo da biomassa utilizado na normalização (Mg ha <sup>-1</sup> )
$B_{min}$	Valor mínimo de biomassa utilizado na normalização (Mg ha <sup>-1</sup> )
$\hat{B}_{gro}$	Biomassa radicular de raízes grossas (> 2 mm) em Mg ha <sup>-1</sup>
$\beta_0, \beta_1$	Coefficientes do modelo de regressão linear
$A_{pix}$	Área do pixel (m <sup>2</sup> )
$DMR_1$	Diâmetro médio das raízes menores que 2 mm (mm)
$DMR_2$	Diâmetro médio das raízes maiores que 2 mm (mm)
$VMR_1$	Volume das raízes menores que 2 mm (cm <sup>3</sup> )
$VMR_2$	Volume das raízes maiores que 2 mm (cm <sup>3</sup> )
$\lambda$	Comprimento de onda (nm)
$R(\lambda)$	Valor da primeira derivada da reflectância no comprimento de onda $\lambda$
B2	Banda azul do Sentinel-2 (490nm)
B3	Banda verde do Sentinel-2 (560 nm)
B4	Banda vermelha do Sentinel-2 (665 nm)
B8	Banda do infravermelho próximo do Sentinel-2 (842 nm)
$y_i$	Valor observado da biomassa radicular
$\hat{y}_i$	Valor predito da biomassa radicular
$\bar{y}$	Média dos valores observados de biomassa
$n$	Número de observações
$\emptyset$	Diâmetro (mm)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
2	OBJETIVOS .....	15
2.1	Objetivo geral .....	15
2.2	Objetivos específicos .....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
3.1	Biomassa vegetal e sua importância .....	16
3.2	Métodos de determinação e estimativa de biomassa radicular .....	17
3.2.1	<i>Determinação da biomassa radicular</i> .....	17
3.2.2	<i>Estimativas baseadas em parâmetros radiculares</i> .....	18
3.2.3	<i>Estimativas baseadas em espectrorradiometria</i> .....	19
3.2.4	<i>Estimativas baseadas em sensoriamento remoto orbital</i> .....	19
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	21
4.1	Área de estudo .....	21
4.2	Biomassa de referência .....	22
4.3	Estimativa da biomassa por equações alométricas .....	24
4.3.1	<i>Aquisição de parâmetros morfológicos das raízes</i> .....	24
4.3.2	<i>Aplicação das equações alométricas</i> .....	25
4.4	Estimativa da biomassa por modelo PLSR .....	25
4.4.1	<i>Preparação das amostras e aquisição de dados hiperespectrais</i> .....	25
4.4.2	<i>Pré-processamento espectral</i> .....	26
4.4.3	<i>Aplicação do modelo PLSR pré-calibrado</i> .....	27
4.5	Biomassa estimada por sensoriamento remoto orbital .....	28
4.5.1	<i>Aquisição e pré-processamento das imagens Sentinel-2</i> .....	28
4.5.2	<i>Cálculo dos índices de vegetação</i> .....	28
4.5.3	<i>Ajuste e validação dos modelos orbitais</i> .....	29
4.5.4	<i>Geração de mapas e estimativa do estoque total</i> .....	30
4.6	Avaliação do desempenho dos modelos e análise estatística .....	30
4.7	Incertezas e Limitações .....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33

5.1	<b>Desempenho das equações alométricas baseadas em parâmetros radiculares .....</b>	33
5.2	<b>Estimativa da biomassa radicular por modelo PLSR .....</b>	34
5.3	<b>Estimativas de biomassa radicular por sensoriamento remoto orbital .....</b>	35
5.4	<b>Comparação integrada entre métodos de estimativa .....</b>	38
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	41
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	42
	<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE DADOS DE CAMPO .....</b>	47
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DO MODELO PLSR .....</b>	49
	<b>APÊNDICE C – DETALHES DAS IMAGENS DE SATÉLITE UTILIZADAS .....</b>	50
	<b>APÊNDICE D – CORRELAÇÕES DE SPEARMAN .....</b>	51

## 1 INTRODUÇÃO

As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) constituem ecossistemas de elevada relevância ecológica, sendo fundamental no balanço global de carbono, na regulação climática e na manutenção da biodiversidade em regiões tropicais sujeitas à limitação hídrica sazonal (HIGA *et al.*, 2014; JAMAN *et al.*, 2022). Esses ecossistemas são caracterizados por uma marcada alternância entre períodos chuvosos e secos, o que condiciona fortemente a estrutura, o funcionamento e as estratégias adaptativas da vegetação.

A maior extensão contínua de FTSS localiza-se no Brasil, sendo representada pelo bioma Caatinga, que ocupa aproximadamente 10% do território nacional (KOCH *et al.*, 2017). Esse bioma apresenta elevada variabilidade climática interanual e forte sazonalidade hídrica, com precipitação média anual concentrada em poucos meses do ano, o que impõe severas restrições ao crescimento vegetal e favorece adaptações morfofisiológicas específicas, como sistemas radiculares profundos e altamente eficientes na exploração de água e nutrientes do solo (MOURA, 2022; SOUZA *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a biomassa radicular assume posição central na dinâmica do carbono e na resiliência das plantas ao estresse hídrico, atuando tanto como reservatório subterrâneo de carbono quanto como componente essencial da estratégia de sobrevivência da vegetação em ambientes semiáridos (JAMAN *et al.*, 2022). Em ecossistemas sazonais secos, a fração subterrânea da biomassa pode representar parcela significativa da biomassa total, sendo determinante para a estabilidade do sistema solo-planta-atmosfera.

Apesar de sua importância ecológica, a quantificação da biomassa radicular ainda representa um dos maiores desafios metodológicos nos estudos de ecossistemas terrestres. Métodos diretos, baseados na coleta destrutiva e na pesagem das raízes, são considerados mais precisos, porém apresentam elevada demanda de tempo, custo operacional elevado e forte impacto ambiental, além de inviabilizarem aplicações em larga escala (HIGA *et al.*, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2024). Como alternativa, métodos indiretos vêm sendo amplamente empregados, destacando-se as equações alométricas baseadas em parâmetros morfológicos das raízes e o uso da espectroscopia de reflectância proximal associada a modelos multivariados, como a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR).

Estudos anteriores desenvolvidos na mesma área experimental demonstraram o potencial dessas abordagens para a estimativa não destrutiva da biomassa radicular, com resultados promissores tanto para equações alométricas quanto para modelos hiperespectrais (CASTELO BRANCO, 2023). Entretanto, tais métodos permanecem intrinsecamente limitados à escala pontual ou de parcela, restringindo sua aplicação em análises espaciais mais

amplas. Este trabalho avança metodologicamente ao superar essa limitação de escala, testando especificamente modelos baseados em sensoriamento remoto orbital para estimar a biomassa radicular de forma espacialmente explícita.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital surge como uma ferramenta para contribuir para uma compreensão geoespecial aprimorada no comportamento da biomassa. Satélites de acesso livre, como o Sentinel-2 e o Landsat 8/9, disponibilizam séries temporais de dados multiespectrais a partir das quais são derivados índices de vegetação, como NDVI, EVI e SAVI, amplamente utilizados para inferir o vigor da vegetação, a cobertura vegetal e a biomassa aérea (ADWIN PRATAMA *et al.*, 2021; ISLAM *et al.*, 2021; TAM; LOI; TUAN, 2025). Esses índices refletem de forma integrada a resposta da vegetação à disponibilidade hídrica, à fenologia e às condições edáficas. A partir dessas estimativas torna-se possível obter inferências indiretas sobre a biomassa radicular.

Contudo, fica clara a necessidade de trabalhos que comparem diferentes abordagens, de modo a ampliar a compreensão da dinâmica da biomassa radicular em FTSS, especialmente na Caatinga.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar métodos de estimativa da biomassa radicular na Caatinga avaliando seu desempenho preditivo e analisando o potencial de aplicação espacial.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Quantificar a biomassa radicular de referência por meio de método destrutivo, com separação em classes de diâmetro, em diferentes períodos climáticos, visando à obtenção de dados de base para calibração e validação dos modelos indiretos;
2. Aplicar e avaliar equações alométricas baseadas em parâmetros morfológicos radiculares, obtidos por análise digital de imagens, para a estimativa da biomassa radicular total e por classes de diâmetro;
3. Avaliar o desempenho de um modelo gerado com dados hiperespectrais por PLSR, a partir de um espectrorradiômetro de precisão para a predição da biomassa radicular;
4. Analisar modelos de regressão baseados em índices espectrais orbitais, derivados de imagens Sentinel-2, como método indireto para a estimativa da biomassa radicular na área experimental.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Biomassa vegetal e sua importância

A biomassa vegetal é um dos principais componentes dos ecossistemas terrestres, essencial na regulação do ciclo do carbono e na mitigação das mudanças climáticas. A biomassa representa o conjunto de matéria orgânica acumulada pelas plantas através da fotossíntese, e sua mensuração é crucial para a avaliação dos estoques de carbono em ecossistemas florestais e savânicos (SILVA *et al.*, 2024).

A biomassa vegetal é comumente dividida em biomassa aérea, composta por caules, folhas e ramos, e biomassa radicular, composta por raízes e estruturas subterrâneas. Em FTSS como a Caatinga, a biomassa radicular pode representar até 40% da biomassa total, refletindo a adaptação das espécies às condições de escassez hídrica (CASTELO BRANCO, 2023). Essa característica é fundamental no semiárido brasileiro, onde o sistema radicular profundo contribui para a resiliência ecológica e o armazenamento de carbono no solo (FRANCISCO; CHAVES; CHAVES, 2020).

A Caatinga, por estar localizado predominantemente no semiárido, apresenta vegetação adaptada a longos períodos de estiagem. A capacidade dessas plantas de acumular biomassa e carbono mesmo sob condições extremas torna-se um indicador-chave da resiliência ambiental (GOMES, *et al.*, 2016). A biomassa aérea reflete a produtividade primária líquida, enquanto a biomassa subterrânea está diretamente associada ao sequestro de carbono no solo, processo crítico para o balanço global de gases de efeito estufa (NASCIMENTO, 2019).

Embora frequentemente tratada de forma integrada, a biomassa subterrânea compreende componentes distintos, incluindo a biomassa radicular viva e o carbono orgânico estabilizado no solo. A biomassa radicular representa o compartimento vivo responsável pela alocação de carbono recente, enquanto a matéria orgânica do solo corresponde a frações com diferentes graus de estabilidade e tempo de residência (CASTELO BRANCO, 2023).

A quantificação da biomassa radicular é particularmente desafiadora devido à sua elevada heterogeneidade espacial, dinâmica sazonal e dificuldade de acesso, o que resulta em uma sub-representação desse compartimento nos inventários de carbono, especialmente em FTSS.

### **3.2 Métodos de determinação e estimativa de biomassa radicular**

A biomassa radicular pode ser quantificada por meio de abordagens diretas e indiretas, as quais diferem quanto ao grau de precisão, custo operacional e impacto ambiental. De modo geral, os métodos diretos correspondem à determinação da biomassa por meio de medições físicas realizadas diretamente sobre o material vegetal coletado, enquanto os métodos indiretos consistem na estimativa da biomassa a partir de relações empíricas com variáveis de fácil obtenção, geralmente sem necessidade de remoção completa ou destruição do sistema radicular (HIGUCHI; CARVALHO JR., 1995).

#### **3.2.1 Determinação da biomassa radicular**

A determinação da biomassa radicular consiste na mensuração direta da massa das raízes por meio da coleta e posterior pesagem do material vegetal, sendo considerada o método mais preciso para quantificação desse compartimento (HIGUCHI; CARVALHO JR., 1995; RATUCHNE *et al.*, 2016). Essa abordagem envolve a remoção das raízes do solo, sua separação de impurezas, secagem até massa constante e determinação do peso seco em balança de precisão.

Em estudos florestais, a determinação direta da biomassa radicular pode ser realizada por diferentes técnicas, como escavação total, monólitos de solo, trincheiras ou núcleos de crescimento interno (*ingrowth cores*), cada uma apresentando vantagens e limitações quanto à representatividade espacial, profundidade amostrada e impacto sobre a vegetação (FEREZ, 2010). Independentemente da técnica adotada, o procedimento é considerado destrutivo, uma vez que implica a remoção parcial ou total do sistema radicular.

A determinação direta da biomassa radicular é amplamente utilizada como referência para a avaliação de métodos indiretos (FEREZ, 2010). Os valores obtidos por esse procedimento permitem a construção e validação de relações alométricas e modelos preditivos, bem como a estimativa confiável do estoque de carbono associado às raízes (MOKANY; RAISON; PROKUSHKIN, 2006; RATUCHNE *et al.*, 2016).

Em ecossistemas semiáridos, onde a biomassa subterrânea desempenha papel central na adaptação das plantas à escassez hídrica, a determinação direta da biomassa radicular fornece subsídios fundamentais para compreender a dinâmica do carbono no solo e a resiliência da vegetação frente às variações climáticas.

### 3.2.2 Estimativas baseadas em parâmetros radiculares

As estimativas baseadas em parâmetros radiculares constituem um conjunto de métodos indiretos que buscam inferir a biomassa subterrânea a partir de atributos morfológicos mensuráveis do sistema radicular, estabelecendo relações empíricas entre essas variáveis e a biomassa seca das raízes. Diferentemente da determinação direta, essas abordagens não exigem a remoção completa do sistema radicular, o que reduz o impacto ambiental e viabiliza aplicações em estudos de maior escala espacial (HIGUCHI; CARVALHO JR., 1995).

O princípio fundamental dessas estimativas reside na existência de relações alométricas entre a biomassa radicular e características estruturais das raízes, como comprimento total, diâmetro médio e volume radicular. Esses atributos refletem a arquitetura do sistema radicular e sua capacidade de exploração do solo, estando diretamente associados ao investimento da planta em estruturas subterrâneas para absorção de água e nutrientes (MOKANY; RAISON; PROKUSHKIN, 2006; RATUCHNE *et al.*, 2016).

As relações alométricas podem ser expressas por razões simples, como a razão raiz: parte aérea, ou por equações matemáticas ajustadas por regressão, utilizando uma ou mais variáveis independentes (HIGUCHI; CARVALHO JR., 1995; RATUCHNE *et al.*, 2016). Estudos demonstram que equações com número reduzido de variáveis explicativas podem apresentar desempenho semelhante as mais complexas, desde que calibradas adequadamente para as condições locais (HIGUCHI *et al.*, 1998).

O uso de parâmetros morfológicos radiculares tem sido amplamente favorecido pelo avanço de técnicas de digitalização e análise de imagens, que permitem a quantificação precisa de atributos como comprimento, diâmetro e volume das raízes por classes de diâmetro. Esses parâmetros são comumente obtidos por meio de scanners de mesa e softwares especializados, possibilitando análises detalhadas da estrutura radicular com elevado grau de reprodutibilidade (BORIANNE *et al.*, 2018; BURTON *et al.*, 2012; SEETHEPALLI *et al.*, 2021).

Entre as principais vantagens desse tipo de abordagem destacam-se o menor custo operacional em comparação aos métodos destrutivos extensivos, e a possibilidade de discriminação da biomassa por classes de diâmetro (SEETHEPALLI *et al.*, 2021). Em ecossistemas semiáridos e FTSS, essas características são particularmente relevantes, uma vez que o sistema radicular é fundamental para a resiliência da vegetação frente à variabilidade climática (CASTELO BRANCO, 2023).

Por outro lado, as estimativas baseadas em parâmetros radiculares apresentam

limitações associadas à elevada variabilidade espacial e temporal do sistema radicular, influenciada por fatores edáficos, climáticos e fenológicos. Essa variabilidade impõe a necessidade de calibrações locais e avaliações independentes do desempenho das equações alométricas, especialmente quando aplicadas fora das condições em que foram originalmente desenvolvidas (RATUCHNE, 2016).

### **3.2.3 Estimativas baseadas em espectrorradiometria**

A espectrorradiometria é uma técnica de sensoriamento remoto proximal que mede a refletância espectral da vegetação em diferentes comprimentos de onda, possibilitando a análise sobre o comportamento espectral dos alvos para a extração de informações como a pigmentos foliares (NOGUEIRA *et al.*, 2025), composição mineral ou orgânica dos solos (RIBEIRO *et al.*, 2024) ou qualidade da água (CARVALHO PONTE *et al.*, 2020). Essas variáveis espectrais estão fortemente correlacionadas à biomassa e à produtividade vegetal (MENDONÇA, 2018). Assim, a principal vantagem do método é a alta resolução espectral obtida por espectrorradiômetros, permitindo distinguir sutis variações sobre o comportamento espectral para aferições sobre a composição dos alvos.

No contexto de aplicações na Caatinga, a espectrorradiometria tem sido aplicada para caracterizar espécies endêmicas e estimar a resiliência ecológica frente às mudanças climáticas (GOMES *et al.*, 2016).

### **3.2.4 Estimativas baseadas em sensoriamento remoto orbital**

O sensoriamento remoto orbital constitui uma das principais ferramentas para o monitoramento da vegetação em escalas espaciais amplas, permitindo a análise contínua da dinâmica da cobertura vegetal e da biomassa ao longo do tempo, com elevada repetitividade temporal e cobertura regional (BORGES; SANO, 2014; JESUS, 2022). A partir da refletância registrada pelos sensores orbitais em diferentes regiões do espectro eletromagnético, é possível inferir atributos biofísicos da vegetação, como vigor, densidade foliar e produtividade primária.

Entre as abordagens mais difundidas no sensoriamento remoto da vegetação destacam-se os índices espectrais de vegetação, que combinam bandas espectrais específicas com o objetivo de realçar a resposta da vegetação e minimizar interferências do solo, da atmosfera e da geometria de iluminação (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015). Esses índices apresentam relação direta ou indireta com a biomassa vegetal, sendo amplamente utilizados em estudos de estimativa de biomassa aérea, monitoramento

fenológico e avaliação de estresse ambiental (NASCIMENTO, 2019).

Diferentes índices foram propostos para atender a contextos ambientais distintos. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é o índice mais clássico e amplamente aplicado, sensível à cobertura e ao vigor vegetal, porém sujeito à saturação em áreas com alta biomassa (HAQUE *et al.*, 2024; PERVEZ *et al.*, 2021; VERA-ESMERALDAS *et al.*, 2025). O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi desenvolvido para reduzir efeitos atmosféricos e de saturação, sendo mais adequado a ambientes com maior densidade de dossel (HAQUE *et al.*, 2024). Em regiões semiáridas e áreas com vegetação esparsa, índices como o SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e o MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) tornam-se particularmente relevantes por incorporarem mecanismos de correção do efeito do solo exposto (MZID *et al.*, 2020). Já o VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*), baseado exclusivamente em bandas do espectro visível, destaca-se por sua sensibilidade à fração verde da vegetação e por aplicações em condições de iluminação variável (VERA-ESMERALDAS *et al.*, 2025). A Tabela 1 apresenta um resumo das bandas espectrais envolvidas, da sensibilidade biofísica dominante e das principais aplicações desses índices.

Tabela 1 – Índices espectrais de vegetação utilizados no estudo, bandas espectrais associadas, sensibilidade biofísica e aplicações

<b>Índice</b>	<b>Bandas Utilizadas (Sentinel-2)</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Aplicações</b>
NDVI	Vermelho (B4) e NIR (B8)	Vigor e cobertura vegetal	Monitoramento de biomassa aérea, produtividade e sazonalidade
EVI	Azul (B2), Vermelho (B4) e NIR (B8)	Redução de efeitos atmosféricos e saturação em alta biomassa	Ambientes com vegetação densa
SAVI	Vermelho (B4) e NIR (B8)	Correção do efeito do solo exposto	Regiões semiáridas e áreas com baixa cobertura vegetal
MSAVI	Vermelho (B4) e NIR (B8)	Ajuste automático da influência do solo	Vegetação esparsa e transições solo-vegetação
VARI	Azul (B2), Verde (B3) e Vermelho (B4)	Sensível à fração verde e à iluminação	Estimativas rápidas de vigor usando apenas bandas visíveis

Fonte: Adaptado de Haque *et al.* (2024); Mzid *et al.* (2020); Pervez *et al.* (2021); Vera-Esmeraldas *et al.* (2025).

Em ecossistemas heterogêneos e sazonalmente secos, como a Caatinga e outras FTSS, a utilização combinada de diferentes índices espectrais permite capturar respostas

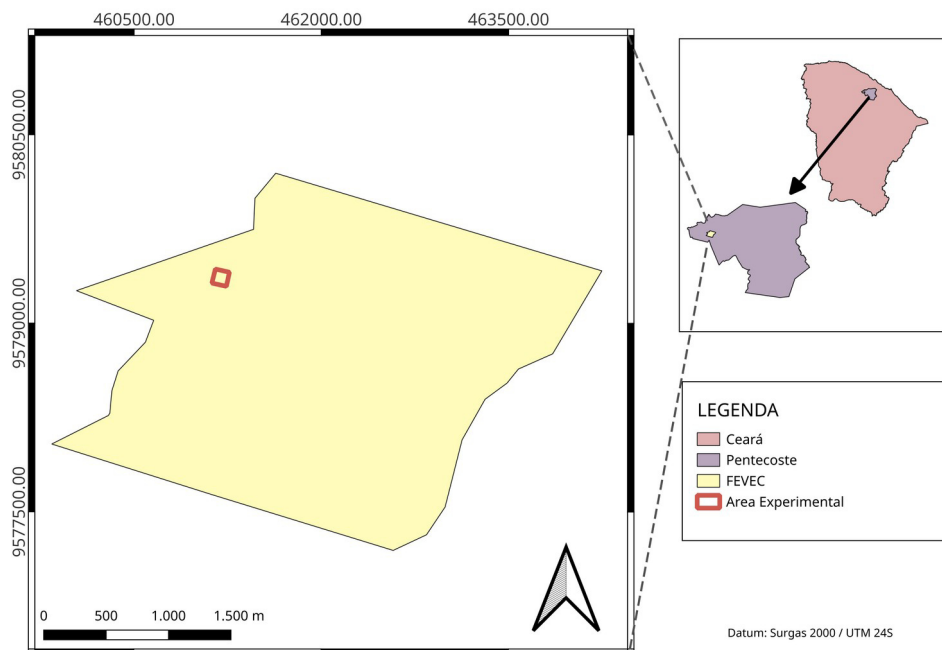
complementares da vegetação, considerando simultaneamente a influência do solo, da atmosfera e da estrutura do dossel (NASCIMENTO, 2019). Além disso, a integração entre dados orbitais, medições de campo e técnicas de sensoriamento remoto proximal tem se consolidado como uma abordagem híbrida promissora para estimativas mais robustas de biomassa e carbono (LIMA, 2021).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma FTSS localizada na Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC), pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC), no município de Pentecoste, Ceará, Brasil (Figura 1). A área situa-se na bacia hidrográfica do Rio Curu e apresenta clima semiárido quente, classificado segundo Köppen como Bsw'h' (CASTELO BRANCO, 2023).

Figura 1 – Localização da área de estudo: mapa do estado do Ceará, com destaque para o município de Pentecoste, a FEVC e a delimitação da área experimental (1,44 ha).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A precipitação média anual histórica da região é da ordem de 750–800 mm, concentrando-se principalmente entre os meses de janeiro e maio, enquanto a temperatura média anual situa-se em torno de 27 °C (SILVA, 2019). Os solos predominantes na área são classificados como Luvisolos Háplicos, com textura arenosa a franco-arenosa, conforme

descrito por Feitosa (2017).

A vegetação é típica da Caatinga, apresentando fisionomia arbóreo-arbustiva e caráter hiperxerófilo, com predomínio de espécies lenhosas adaptadas à sazonalidade hídrica. A área encontra-se em processo de regeneração natural desde 1985, após a interrupção do cultivo de *Cenchrus ciliaris* L., totalizando mais de três décadas de regeneração no início do experimento (FEITOSA, 2017; SILVA, 2019).

#### **4.2 Biomassa de referência**

O estudo se insere em um experimento de longa duração iniciado em julho de 2015, que conta com uma rede de 144 núcleos permanentes de coleta de raízes instalados sistematicamente em uma área experimental de aproximadamente 1,44 ha, com espaçamento regular de 10 x 10 m entre os pontos. Nesta pesquisa foi utilizada uma subamostra desse experimento, totalizando 35 núcleos distribuídos aleatoriamente: 11 coletados no presente estudo e 24 oriundos do trabalho de Castelo Branco (2023), que compartilha a mesma área experimental.

A metodologia empregada baseia-se no método do núcleo de crescimento interno (*ingrowth cores*) proposto por Persson (1980, 1983). Cada núcleo consiste em uma malha cilíndrica de polietileno de alta densidade, com 14 cm de diâmetro e 30 cm de profundidade, preenchido com solo peneirado em malha de 2 mm de abertura para remoção de raízes, permitindo o crescimento radicular natural ao longo do tempo. Os núcleos foram instalados em 2015, fazendo parte de um estudo de longa duração. As amostras foram identificadas por meio de uma etiqueta afixada na árvore mais próxima ao ponto amostral.

As amostras foram coletadas em dois períodos distintos: março de 2023 (período chuvoso; n = 5) e julho de 2023 (período intermediário; n = 6) (Figura 2a). Em cada coleta, os núcleos foram removidos manualmente (Figura 2b), acondicionados em sacos plásticos identificados e encaminhados ao laboratório para processamento.

Em laboratório, as amostras foram submetidas à lavagem em água corrente para remoção completa do solo aderido às raízes, conforme a Figura 3, e com auxílio de pinças foi feita a retirada de impurezas residuais, minimizando interferências na determinação da massa e então secas ao ar. As raízes foram separadas em classes de diâmetro utilizando peneira metálica com malha de 2 mm (PÉREZ-HARGUINDEGUY *et al.*, 2013).

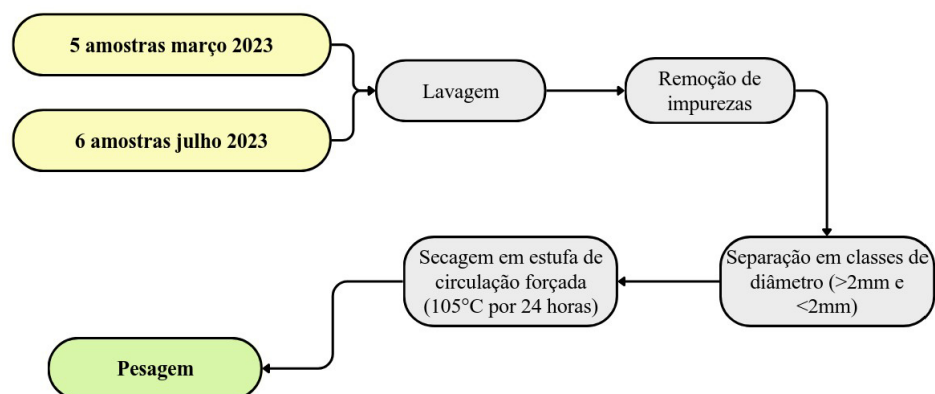
Figura 2 – Caracterização da área experimental e exemplo de núcleo radicular. (a) Vista da área experimental do estudo; (b) núcleo de solo contendo sistema radicular após extração.



Fonte: (a) acervo do autor; (b) adaptado de Castelo Branco (2023).

Após a separação, o material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 105°C por 24 horas, conforme procedimento padrão para determinação de biomassa seca (CASTELO BRANCO, 2023). A biomassa de cada classe foi determinada por pesagem em balança analítica com precisão de 0,001 g, sendo os valores convertidos para unidades de Mg ha<sup>-1</sup> com base na área amostrada por núcleo. A biomassa total foi obtida pela soma das frações de raízes finas e grossas, sendo considerada como biomassa de referência (valor observado) para as análises subsequentes.

Figura 3 – Fluxograma para a obtenção da biomassa de referência



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ressalta-se que os valores obtidos representam exclusivamente a biomassa radicular presente na camada de 0-30 cm do solo, não correspondendo à biomassa radicular de todo o sistema radicular.

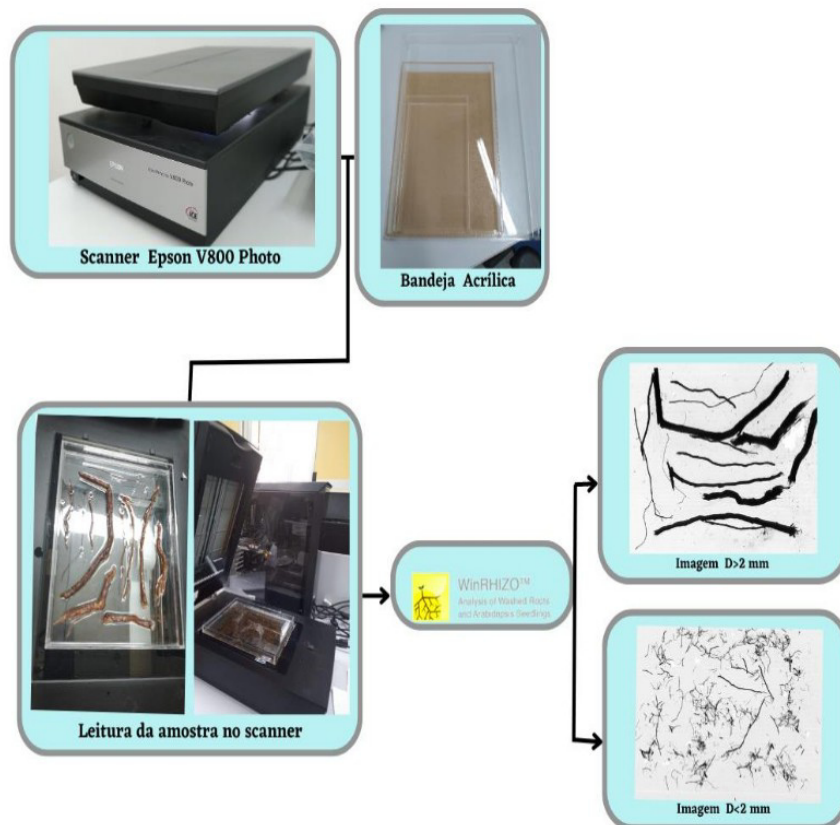
### 4.3 Estimativa da biomassa por equações alométricas

A estimativa indireta da biomassa radicular foi realizada por meio de equações alométricas baseadas em atributos morfológicos das raízes, obtidos a partir da análise digital de imagens. O procedimento envolveu duas etapas principais: (i) aquisição e quantificação dos parâmetros morfológicos radiculares e (ii) aplicação das equações alométricas previamente propostas na literatura.

#### 4.3.1 Aquisição de parâmetros morfológicos das raízes

Os parâmetros morfológicos das raízes foram obtidos por meio de digitalização e análise de imagens utilizando um scanner de raízes Epson Perfection V800 Photo, acoplado ao software WinRHIZO. As amostras foram distribuídas em bandejas acrílicas transparentes, evitando sobreposição de raízes, e digitalizadas em resolução de 400 dpi, em tons de cinza (Figura 4).

Figura 4 – Etapas de obtenção e processamento de imagens para análise morfológica de raízes utilizando scanner de mesa e o software WinRHIZO.



Para amostras com grande volume de material radicular, foram realizadas múltiplas digitalizações, garantindo maior precisão na extração das variáveis. O software WinRHIZO foi utilizado para quantificação do comprimento total, diâmetro médio e volume radicular, separadas por classes de diâmetro. Os arquivos foram exportados e organizados em planilhas para posterior aplicação das equações alométricas (Apêndice A).

#### 4.3.2 Aplicação das equações alométricas

A biomassa radicular foi estimada a partir das equações alométricas propostas por Castelo Branco (2023), baseadas em parâmetros morfológicos das raízes. As equações assumem foram:

$$\hat{B} = -0,19 + (-0,05 DMR_2) + (0,94 VMR_2) + (0,42 DMR_1) + (-0,06 VMR_1) \quad (1)$$

$$\hat{B}_{gro} = 0,04 + (-0,14 DMR_2) + (1,73 VMR_2) \quad (2)$$

Onde,  $\hat{B}$  representa a biomassa total em Mg ha<sup>-1</sup>;  $DMR_2$  o diâmetro médio das raízes maiores de 2 mm, em mm;  $VMR_2$  o volume das raízes maiores de 2 mm em cm<sup>3</sup>;  $DMR_1$  o diâmetro médio das raízes menores de 2 mm, em mm;  $VMR_1$  o volume das raízes menores de 2 mm, em cm<sup>3</sup>; e  $\hat{B}_{gro}$  a biomassa das raízes maiores de 2mm, em Mg ha<sup>-1</sup>.

Não houve recalibração ou ajuste dos coeficientes das equações com a finalidade de avaliar a aplicabilidade dos modelos a um conjunto de dados independentes. As estimativas de biomassa geradas foram comparadas com os valores observados de biomassa radicular obtidos pelo método destrutivo, sendo avaliadas por meio de métricas de desempenho amplamente adotadas em estudos de validação de modelos alométricos, incluindo erro absoluto, erro relativo (%), viés médio (ME), erro quadrático médio de predição (RMSEP) e coeficiente de determinação de predição ( $R^2_{pred}$ ) (MAYER; BUTLER, 1993).

#### 4.4 Estimativa da biomassa por modelo PLSR

##### 4.4.1 Preparação das amostras e aquisição de dados hiperespectrais

As amostras de raízes destinadas à análise espectral foram previamente secas em estufa, maceradas e homogeneizadas até obtenção de uma fração suficientemente fina e uniforme para leitura por contato. A homogeneização visou reduzir heterogeneidades de superfície e variação de empacotamento que afetam a reflectância (WORKMAN; WEYER,

2007).

As medidas de reflectância foram obtidas com um espectrorradiômetro portátil FieldSpec Pro FR 3 (Analytical Spectral Devices - ASD), faixa espectral 350–2500 nm, acoplado a uma sonda de contato do tipo Hi-Brite Contact Probe. As leituras foram realizadas em ambiente controlado (sala escura) para minimizar luz ambiente e refletância difusa. Para cada amostra foram realizadas 3 leituras, e as leituras individuais foram feitas em diferentes pontos na amostra homogeneizada para reduzir erros por empacotamento e microheterogeneidade (MILTON *et al.*, 2009).

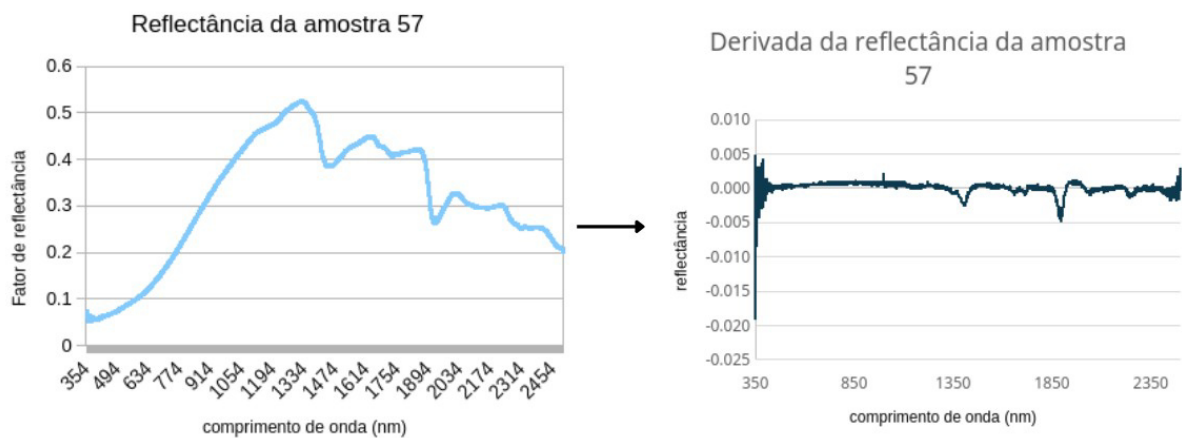
#### 4.4.2 Pré-processamento espectral

Os espectros obtidos foram submetidos à aplicação da primeira derivada, calculada por diferença centrada, com o objetivo de realçar variações espectrais associadas à composição físico-química das amostras (RIBEIRO, 2021). A equação utilizada para a derivada foi:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (3)$$

Onde,  $f'(x_i)$  representa a primeira derivada da reflectância no ponto  $i$ ; e  $x$  corresponde ao comprimento de onda. Um exemplo da reflectância e da derivada da reflectância está expresso na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de reflectância de uma amostra e sua respectiva derivada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4.3 Aplicação do modelo PLSR pré-calibrado

O modelo PLSR utilizado foi o modelo previamente calibrado por Castelo Branco (2023), desenvolvido para estimar biomassa radicular a partir de espectros de reflectância derivados. Neste estudo o modelo foi aplicado sem recalibração ou ajuste dos coeficientes originais, de modo a avaliar a transferibilidade do modelo para um conjunto de amostras independentes. O modelo proposto foi:

$$\hat{B}_{norm} = 0,093 - 397 * R(910) + 1542,8 * R(2147) + 280,55 * R(1932) + 423,028 * R(853) - 149,27 * R(929) + 337,32 * R(1164) \quad (4)$$

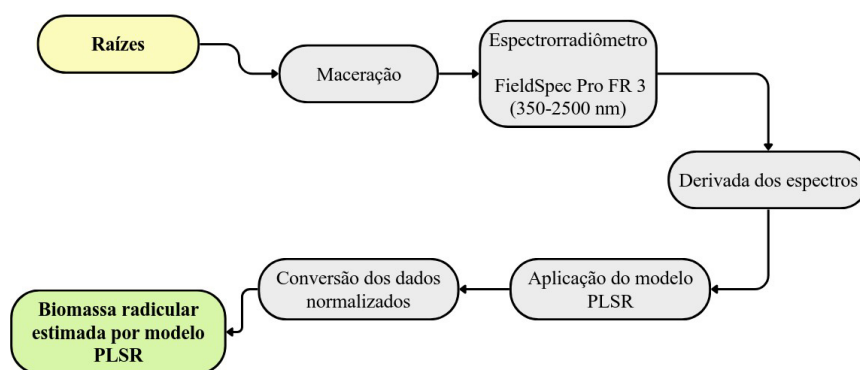
Onde,  $B_{norm}$  representa a biomassa radicular prevista pelo modelo, em escala normalizada (0-1); e  $R(\lambda)$  o valor da primeira derivada da reflectância espectral na banda de comprimento de onda  $\lambda$  (nm).

A fim de tornar as estimativas comparáveis à biomassa observada, as predições normalizadas foram convertidas para biomassa absoluta ( $Y$ ) por meio da inversão do procedimento de normalização tipo min-max, empregando os valores mínimo e máximo usados na calibração original. O fluxograma do processo de obtenção da biomassa estimada por modelo PLSR se encontra na Figura 6. A transformação inversa é dada por:

$$\hat{B} = B_{min} + \hat{B}_{norm} * (B_{max} - B_{min}) \quad (5)$$

Onde,  $\hat{B}$  representa a biomassa radicular estimada em  $Mg\ ha^{-1}$ ;  $\hat{B}_{norm}$  a resposta normalizada predita pelo PLSR;  $B_{min}$  e  $B_{max}$  são os valores mínimo e máximo de biomassa, respectivamente.

Figura 6 – Fluxograma para a estimativa da biomassa por modelo PLSR.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O desempenho do modelo PLSR foi avaliado por meio de validação externa, utilizando dados independentes que não participaram da calibração original do modelo. O conjunto de avaliação foi composto por 11 amostras ( $n = 11$ ).

## 4.5 Biomassa estimada por sensoriamento remoto orbital

### 4.5.1 Aquisição e pré-processamento das imagens Sentinel-2

Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, produto Level-2A (reflectância de superfície), obtidas a partir da plataforma Copernicus Open Access Hub (ESA, 2026). Esse produto inclui correção atmosférica prévia, o que permite sua aplicação direta em estudos ambientais e de vegetação.

Foram selecionadas 6 imagens correspondentes a períodos representativos das campanhas de campo, considerando uma janela temporal máxima de até 20 dias em relação às datas de coleta da biomassa (Apêndice B), em função da disponibilidade de cenas com baixa cobertura de nuvens e da resolução temporal da constelação Sentinel-2.

O pré-processamento das imagens foi realizado no software QGIS, versão 3.44.4-Solothurn (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025). As imagens foram recortadas ao limite do polígono da área experimental e reprojetaadas para o sistema de referência SIRGAS2000 / UTM, zona 24S.

### 4.5.2 Cálculo dos índices de vegetação

A partir das bandas espectrais do Sentinel-2 foram calculados os índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI, MSAVI e VARI. Os índices são definidos nas equações:

$$NDVI = \frac{B_8 - B_4}{B_8 + B_4} \quad (6)$$

$$EVI = 2,5 * \frac{B_8 - B_4}{B_8 + 6 B_4 - 7,5 B_2 + 1} \quad (7)$$

$$SAVI = \left( \frac{B_8 - B_4}{B_8 + B_4 + L} \right) * (1 + L), L = 0,5 \quad (8)$$

$$MSAVI = \frac{2 B_8 + 1 - \sqrt{(2 B_8 + 1)^2 - 8 (B_8 - B_4)}}{2} \quad (9)$$

$$VARI = \frac{B_3 - B_4}{B_3 + B_4 - B_2} \quad (10)$$

Onde,  $B_8$  representa a banda do infravermelho próximo (842 nm);  $B_4$  a banda do vermelho (665 nm);  $B_3$  a banda do verde (560 nm);  $B_2$  a banda do azul (490 nm).

Após o cálculo dos índices, foi extraído o valor médio de cada índice espectral para toda a área experimental. Assim, para cada imagem orbital foi gerado um vetor de variáveis espectrais médias:  $\overline{NDVI}$ ,  $\overline{EVI}$ ,  $\overline{MSAVI}$ ,  $\overline{SAVI}$  e  $\overline{VARI}$ .

Adicionalmente, foram calculadas variáveis pluviométricas representativas da precipitação acumulada nos 7, 30, 60 e 90 dias anteriores à data de aquisição de cada imagem orbital (CH7, CH30, CH60 e CH90), a partir da série histórica de dados meteorológicos locais. Essas variáveis foram incluídas com o objetivo de representar diferentes escalas temporais de resposta da vegetação à disponibilidade hídrica, considerando que a precipitação recente pode influenciar diretamente o vigor da parte aérea, enquanto a precipitação acumulada em períodos mais longos pode estar associada a processos fisiológicos e de crescimento radicular (FINÉR *et al.*, 2011). Dessa forma variáveis pluviométricas buscam captar os efeitos temporais da disponibilidade de água sobre a vegetação e sua relação indireta com a biomassa radicular.

#### 4.5.3 Ajuste e validação dos modelos orbitais

Foram testadas as variáveis espectrais médias e as covariáveis pluviométricas como preditoras da biomassa média da área ( $\bar{B}$ ). A seleção de variáveis exploratória foi realizada por inspeção de correlações de Spearman. Realizou-se a seleção automática de variáveis pelo método stepwise, com critério baseado no Akaike Information Criterion (AIC), ajustando-se modelos de regressão linear múltipla.

A validação do modelo foi conduzida por meio de leave-one-out cross-validation (LOOCV), procedimento particularmente indicado para conjuntos de dados com tamanho amostral reduzido. Em cada iteração, uma observação foi retirada do conjunto de dados, o modelo foi ajustado com as observações remanescentes e a biomassa da observação excluída foi estimada. Os valores preditos ( $\hat{y}_i$ ) foram então comparados com os valores observados ( $y_i$ ), permitindo o cálculo das métricas de desempenho descritas na seção metodológica de avaliação estatística. O uso de validação cruzada nesse contexto contribui para reduzir vieses associados ao ajuste do modelo e fornece uma estimativa mais realista de sua capacidade preditiva (STONE, 1974; WEESE; SMUCKER; EDWARDS, 2025)

#### 4.5.4 Geração de mapas e estimativa do estoque total

Para a geração dos mapas espaciais de biomassa radicular, o modelo de regressão selecionado foi aplicado pixel a pixel sobre o raster do índice de vegetação correspondente, conforme a equação geral:

$$\hat{B}_{ha,i} = \beta_0 + \beta_1 * IV_{pix} \quad (11)$$

Onde,  $\hat{B}_{ha,i}$  representa a biomassa estimada do pixel em Mg ha<sup>-1</sup>;  $\beta_0$  e  $\beta_1$  correspondem aos coeficientes estimados do modelo de regressão; e  $IV_{pix}$  representa o valor do índice de vegetação no pixel.

Como a equação fornece biomassa em Mg ha<sup>-1</sup>, para obter a biomassa absoluta contida em cada pixel (Mg pixel<sup>-1</sup>) utilizou-se a relação:

$$\hat{B}_{(pix,i)} = \hat{B}_{(ha,i)} * \frac{A_{pix}}{10.000} \quad (12)$$

Onde,  $\hat{B}_{(pix,i)}$  representa a biomassa contida na área de cada pixel, em Mg; e  $A_{pix}$  corresponde a área do pixel em metros quadrados (m<sup>2</sup>). Os valores de área de pixel utilizados para cada imagem encontram-se detalhados no Apêndice B.

O estoque total de biomassa da área experimental foi obtido pela soma das estimativas de biomassa de todos os pixels contidos no polígono da área de estudo. Esses valores foram posteriormente comparados com a biomassa observada em campo, convertida para estoque total da área, permitindo a avaliação da consistência espacial e quantitativa das estimativas orbitais.

#### 4.6 Avaliação do desempenho dos modelos e análise estatística

Para avaliar a capacidade preditiva e a adequação dos modelos ajustados. Foram calculadas e analisadas métricas de previsão e procedimentos de diagnóstico de regressão. As métricas utilizadas foram: erro médio (ME), erro quadrático médio de predição (RMSE/RMSEP) e coeficiente de determinação de predição ( $R^2/R^2_{pred}$ ).

Ressalta-se que o RMSE e o RMSEP, bem como o  $R^2$  e o  $R^2_{pred}$ , possuem a mesma expressão matemática, diferindo apenas quanto ao conjunto de dados utilizado em seu cálculo: os termos RMSE e  $R^2$  foram empregados quando a avaliação foi realizada sobre os dados utilizados no ajuste do modelo, enquanto RMSEP e  $R^2_{pred}$  foram adotados quando a

métrica foi calculada a partir de valores preditos obtidos por validação com dados independentes. Quando aplicável, as métricas foram calculadas a partir dos valores gerados por LOOCV. As expressões adotadas são:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

Onde  $y_i$  representa o valor observado da biomassa radicular; ( $\hat{y}_i$ ) o valor predito pelo modelo,  $\bar{y}$  a média dos valores observados e  $n$  o número de observações no conjunto de avaliação. Valores de RMSEP baixos indicam maior precisão das estimativas, enquanto valores de ( $R^2_{pred}$ ) próximos de 1 indicam melhor capacidade explicativa e preditiva dos modelos. O erro médio (ME) foi utilizado como indicador de viés sistemático, sendo valores diferentes de zero indicativos de superestimativa ou subestimativa consistente.

Todas as análises estatísticas, ajustes de modelos, validações cruzadas e geração de gráficos foram conduzidas no ambiente R (R CORE TEAM, 2025), utilizando-se a interface RKWard (RKWARD DEVELOPMENT TEAM, 2025) como ambiente de desenvolvimento integrado.

#### 4.7 Incertezas e Limitações

Apesar dos cuidados metodológicos adotados, este estudo apresenta limitações e fontes de incerteza que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Uma das principais limitações refere-se ao deslocamento temporal entre as datas de coleta da biomassa em campo e as datas de aquisição das imagens orbitais, que atingiu até 20 dias. Essa janela temporal foi definida em função da resolução temporal da constelação Sentinel-2 e da restrição imposta pela disponibilidade de cenas com baixa cobertura de nuvens. No entanto, em ecossistemas de FTSS mudanças rápidas no estado fisiológico e fenológico da vegetação podem ocorrer em escalas temporais curtas (CASTELO BRANCO, 2023; GONZALEZ DEL

CASTILLO *et al.*, 2018). Dessa forma, parte da variabilidade espectral captada pelas imagens pode refletir alterações fenológicas da vegetação aérea que não estão perfeitamente sincronizadas com a condição da biomassa radicular medida em campo, introduzindo incertezas na relação entre índices de vegetação e biomassa subterrânea.

Outra limitação relevante diz respeito à profundidade de amostragem do sistema radicular, restrita à camada de 0-30 cm do solo. Embora essa profundidade concentre uma parcela expressiva das raízes finas e metabolicamente ativas, especialmente em ambientes semiáridos com solos rasos e elevada limitação hídrica (PÉREZ-HARGUINDEGUY *et al.*, 2013; FEITOSA, 2017), as estimativas obtidas não representam o estoque total de biomassa radicular das espécies lenhosas da Caatinga. Estratégias adaptativas comuns nesse bioma incluem o desenvolvimento de sistemas radiculares profundos, capazes de explorar camadas subsuperficiais do solo durante períodos prolongados de déficit hídrico (SILVA, 2019). Assim, os valores estimados devem ser interpretados como biomassa radicular superficial, limitada à camada amostrada.

O tamanho amostral reduzido, particularmente para o conjunto utilizado na validação externa do modelo hiperespectral por PLSR ( $n = 11$ ), constitui outra fonte de incerteza. Conjuntos de dados pequenos tendem a aumentar a sensibilidade das métricas de desempenho a valores extremos e a reduzir a robustez estatística das inferências (MAYER; BUTLER, 1993). Embora o uso de validação externa represente um avanço metodológico importante, a ampliação do número de amostras independentes poderia reduzir a incerteza associada às estimativas e fornecer avaliações mais estáveis da capacidade preditiva do modelo.

O modelo com dados obtidos por imagens orbitais (MIO) foi ajustado com apenas seis imagens, o que representa um conjunto de dados bastante restrito para modelagem estatística. Mesmo com a adoção da validação cruzada leave-one-out, procedimento indicado para amostras pequenas (STONE, 1974; WEESE; SMUCKER; EDWARDS, 2025), esse número reduzido de observações aumenta o risco de sobreajuste (*overfitting*) e limita a capacidade de generalização temporal do modelo.

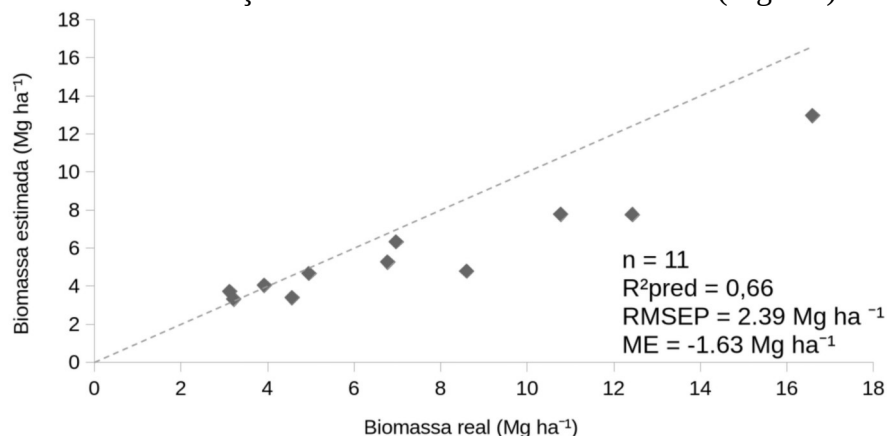
Por fim, ressalta-se que as incertezas associadas às estimativas orbitais refletem não apenas limitações estatísticas, mas também a natureza indireta da relação entre a reflectância da vegetação e a biomassa radicular, mediada por processos fisiológicos, fenológicos e hidrológicos (MILTON *et al.*, 2009).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Desempenho das equações alométricas baseadas em parâmetros radiculares

A comparação entre a biomassa radicular estimada pelas equações alométricas e os valores observados experimentalmente evidenciou um desempenho satisfatório do modelo para a estimativa da biomassa total (Figura 7). O coeficiente de determinação preditivo ( $R^2_{pred} = 0,66$ ) indicou uma correlação moderada entre os valores observados e estimados, demonstrando que aproximadamente 66% da variabilidade observada foi explicada pelas equações alométricas aplicadas. O erro quadrático médio de predição ( $RMSEP = 2,39 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e o viés médio negativo ( $ME = -1,63 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) sugerem uma leve tendência à subestimativa das previsões, especialmente em amostras com maiores valores observados de biomassa radicular. Esse comportamento é visualmente perceptível no gráfico de dispersão, no qual os pontos tendem a se posicionar abaixo da linha 1:1 nas classes superiores de biomassa.

Figura 7 – Biomassa radicular total estimada por parâmetros radiculares em função da biomassa radicular observada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )



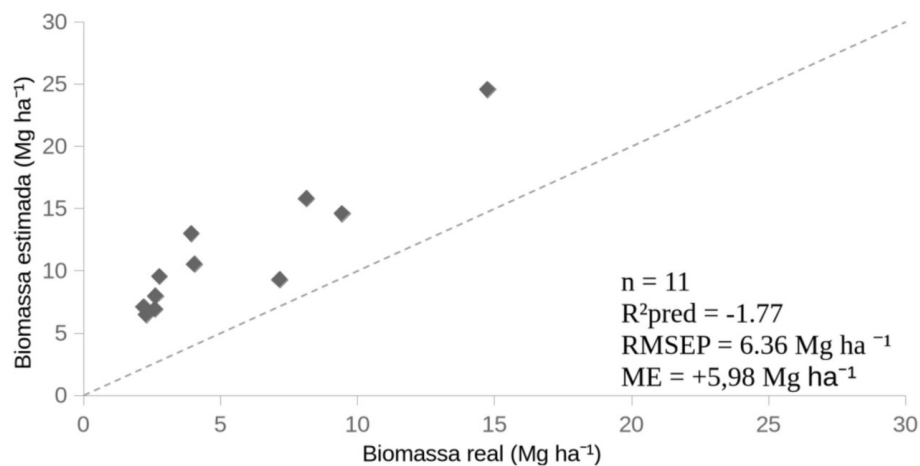
Fonte: Elaborada pelo autor.

Resultados semelhantes foram relatados em estudos realizados em FTSS, onde as equações alométricas apresentaram limitações na predição de valores extremos de biomassa devido à alta heterogeneidade estrutural do sistema radicular (FINÉR *et al.*, 2011; JACKSON *et al.*, 1996; MOKANY; RAISON; PROKUSHKIN, 2006). Essa subestimação pode ser atribuída à variação local da densidade radicular e ao predomínio de raízes finas, cuja contribuição à biomassa total é difícil de capturar por variáveis morfológicas agregadas (POORTER *et al.*, 2012).

Por outro lado, para a biomassa das raízes grossas ( $\varnothing > 2 \text{ mm}$ ), observou-se baixa capacidade preditiva ( $R^2_{pred} = -1,77$ ;  $RMSEP = 6,36 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $ME = 5,98 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), com

tendência acentuada de superestimativa (Figura 8). Valores negativos de  $R^2_{pred}$  indicam que o modelo apresentou desempenho inferior ao uso da média dos valores observados como estimador. Esse padrão indica que as equações, originalmente ajustadas a partir de um conjunto mais equilibrado entre classes de diâmetro, podem não ter captado adequadamente a variação morfológica associada às raízes estruturais mais espessas, cujo diâmetro e volume são fortemente influenciados por características edáficas e ontogenéticas (LYNCH, 1995; PREGITZER *et al.*, 2002).

Figura 8 – Biomassa radicular das raízes grossas ( $\varnothing > 2\text{mm}$ ) estimada por parâmetros radiculares em função da biomassa radicular observada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )



Fonte: Elaborada pelo autor.

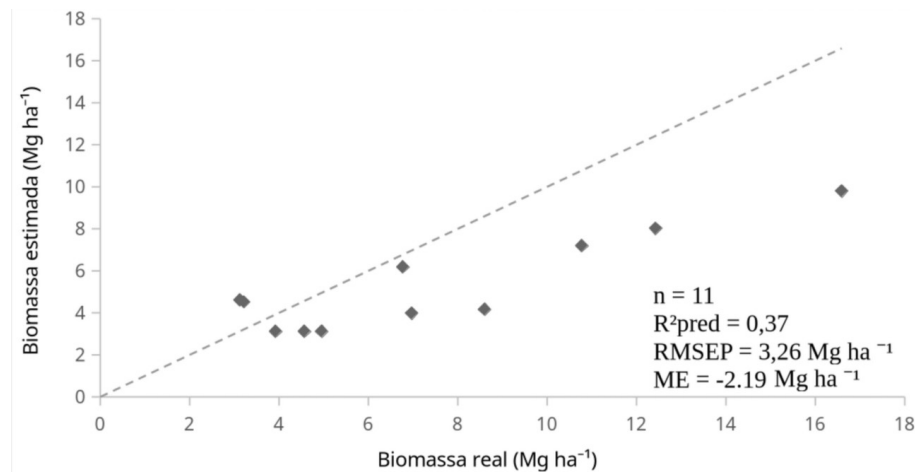
A comparação dos resultados com a literatura confirma que equações alométricas baseadas em atributos morfológicos são ferramentas eficazes para estimar a biomassa radicular total, embora apresentem limitações associadas à heterogeneidade morfológica e à proporção de raízes finas e grossas no sistema radicular (FINÉR *et al.*, 2011). Em FTSS, a variabilidade edáfica e a adaptação morfológica das raízes às condições de seca prolongada exercem influência marcante sobre o diâmetro e a densidade das raízes, impactando diretamente a acurácia das estimativas (JACKSON *et al.*, 1996).

## 5.2 Estimativa da biomassa radicular por modelo PLSR

A aplicação do modelo PLSR previamente calibrado por Castelo Branco (2023) aos dados hiperespectrais obtidos neste estudo resultou em desempenho preditivo limitado para a estimativa da biomassa radicular em FTSS. A relação entre os valores observados e estimados encontra-se apresentada na Figura 9. A tabela completa com os valores observados

e preditos para cada amostra está disponível no Apêndice C.

Figura 9 – Relação entre biomassa radicular observada e estimada pelo modelo PLSR aplicada a dados independentes. A linha tracejada indica a relação 1:1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O coeficiente de determinação de predição foi baixo ( $R^2_{pred} = 0,37$ ), indicando que apenas 37% da variabilidade observada na biomassa radicular foi explicada pelo modelo quando aplicado a dados independentes. O erro quadrático médio de predição ( $RMSEP = 3,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi elevado em relação à amplitude dos valores observados, revelando baixa precisão das estimativas. Adicionalmente, o erro médio negativo ( $ME = -2,19 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) indica a presença de viés sistemático, com tendência à subestimativa da biomassa radicular pelo modelo.

Resultados semelhantes têm sido reportados em estudos que avaliam a transferibilidade de modelos PLSR baseados em espectroscopia de reflectância, especialmente quando aplicados a conjuntos de dados independentes ou obtidos em períodos distintos daqueles utilizados na calibração original (JI *et al.*, 2024; SHEN *et al.*, 2025). A espectroscopia hiperespectral é altamente sensível à composição físico-química do material analisado, bem como a variações no preparo das amostras, granulometria, teor de umidade residual e condições temporais de coleta, fatores que podem comprometer a robustez do modelo quando aplicado fora de seu domínio de calibração.

### 5.3 Estimativas de biomassa radicular por sensoriamento remoto orbital

A estimativa da biomassa radicular por sensoriamento remoto orbital foi realizada a partir de modelos de regressão ajustados com índices espectrais médios da área

experimental, derivados de imagens Sentinel-2. Inicialmente, procedeu-se à análise exploratória das relações entre a biomassa radicular observada e as variáveis espectrais e pluviométricas disponíveis, por meio de correlações de Spearman (Apêndice D), com o objetivo de identificar associações monotônicas e reduzir problemas de colinearidade entre os preditores (MAYER; BUTLER, 1993).

Os resultados dessa análise indicaram elevada correlação entre os índices espectrais baseados em bandas do vermelho e do infravermelho próximo (NDVI, EVI, SAVI e MSAVI), evidenciando redundância de informação espectral. Com base nesse diagnóstico inicial, procedeu-se ao ajuste de modelos lineares múltiplos, submetidos à seleção automática de variáveis pelo método Stepwise, com critério baseado no AIC. Esse procedimento resultou na seleção de um modelo unimodal, no qual o índice VARI foi mantido como único preditor significativo da biomassa radicular média da área experimental. A equação final ajustada é expressa por:

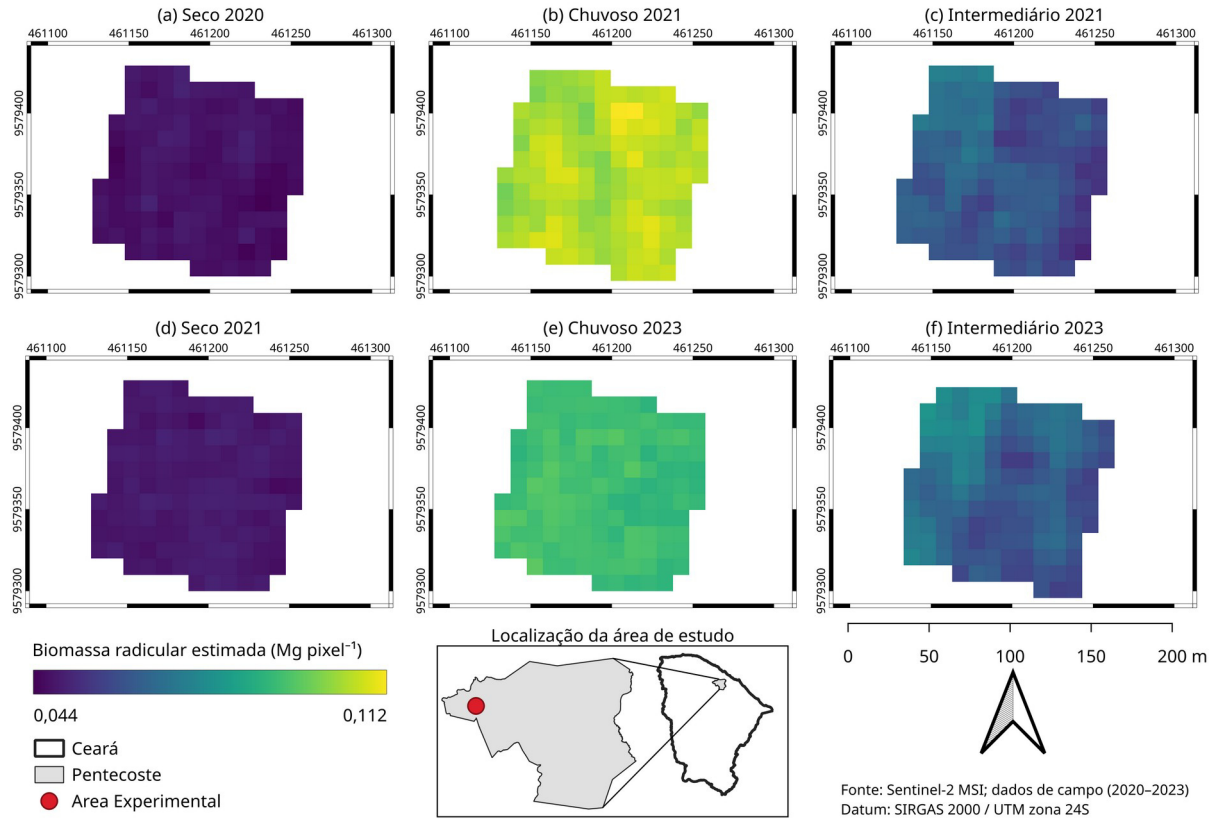
$$\hat{B} = 6,5666 + 6,7845 * VARI \quad (16)$$

Em que  $\hat{B}$  representa a biomassa radicular estimada ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e VARI corresponde ao valor médio do índice de vegetação da área experimental.

A partir da Equação 1, o modelo foi aplicado espacialmente sobre os rasters do índice VARI correspondentes a cada período analisado, permitindo a geração de mapas de distribuição espacial da biomassa radicular estimada por pixel. A Figura 10 apresenta a distribuição espacial da biomassa radicular estimada para os períodos seco, intermediário e chuvoso ao longo do intervalo 2020-2023.

Os mapas evidenciam um padrão espacial coerente com a sazonalidade climática da região, com maiores valores estimados de biomassa radicular concentrados nos períodos chuvosos e redução progressiva durante os períodos seco e intermediário. Observa-se também heterogeneidade espacial na área, indicando que, mesmo em uma área relativamente pequena (1,44 ha), a biomassa radicular não se distribui de forma homogênea, refletindo variações locais de solo, vegetação e histórico de regeneração.

Figura 10 – Distribuição espacial da biomassa radicular estimada nos períodos seco, intermediário e chuvoso (2020-2023)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A integração espacial das estimativas pixel a pixel permitiu o cálculo do estoque total de biomassa radicular da área experimental para cada período analisado. Esses valores foram comparados com os estoques observados em campo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre o estoque de biomassa radicular observado e estimado (Mg) por sensoriamento remoto orbital na área experimental (1,44 ha)

Período	Estoque real de biomassa radicular (Mg)	Estoque estimado de biomassa radicular (Mg)	Erro absoluto (Mg)	Erro relativo (%)
Seco 2020	6,50	6,34	0,16	2,47%
Chuvoso 2021	14,51	14,06	0,45	3,07%
Intermediário 2021	8,19	8,41	0,22	2,64%
Seco 2021	7,15	6,54	0,61	8,56%
Chuvoso 2023	12,27	12,25	0,02	0,16%
Intermediário 2023	8,18	8,65	0,47	5,75%

Fonte: elaborada pelo autor.

A comparação entre os estoques observados e estimados indica elevada concordância entre os valores, com erros relativos inferiores a 10% em todos os períodos analisados e, em alguns casos, inferiores a 1%. O desempenho estatístico global do modelo é sintetizado na Tabela 3, que apresenta as métricas de ajuste e validação cruzada LOOCV.

Tabela 3 – Desempenho do modelo de regressão

Métrica	Valor
R <sup>2</sup> ajustado	0,975
RMSE (ajuste)	0,371 Mg ha <sup>-1</sup>
R <sup>2</sup> (LOOCV)	0,955
RMSE (LOOCV)	0,458 Mg ha <sup>-1</sup>
ME (LOOCV)	0,077 Mg ha <sup>-1</sup>

Fonte: elaborada pelo autor.

Os elevados valores de coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado = 0,975) e de predição ( $R^2$  (LOOCV) = 0,955), associados aos baixos valores de RMSE e RMSE (LOOCV), indicam excelente capacidade explicativa e preditiva do modelo. O valor reduzido do erro médio (ME (LOOCV) = 0,077 Mg ha<sup>-1</sup>) evidencia ausência de viés sistemático relevante, sugerindo que o modelo não apresenta tendência consistente de superestimativa ou subestimativa. Contudo, ressalta-se que o número reduzido de observações pode levar a um modelo com sobreajuste e impõe limitações à generalização dos resultados (STONE, 1974).

#### 5.4 Comparação integrada entre métodos de estimativa

A comparação integrada entre as diferentes abordagens de estimativa da biomassa radicular evidencia contrastes relevantes quanto ao desempenho preditivo, à natureza dos dados empregados e ao potencial de aplicação espacial dos métodos avaliados. A Tabela 4 sintetiza os principais resultados quantitativos e qualitativos obtidos para as equações alométricas baseadas em parâmetros radiculares, para o modelo PLSR previamente calibrado e para o modelo de regressão baseado em índices espectrais orbitais.

As equações alométricas apresentaram desempenho intermediário na estimativa da biomassa radicular total, com coeficiente de determinação preditivo moderado ( $R^2_{pred} = 0,66$ ) e erro quadrático médio de predição superior ao observado no MIO. Observou-se ainda a presença de viés sistemático negativo, indicando tendência à subestimativa da biomassa em amostras com maiores valores observados. Esse comportamento é consistente com limitações

previamente descritas para equações alométricas aplicadas a ambientes caracterizados por elevada heterogeneidade estrutural e forte controle edáfico, comuns em florestas tropicais sazonalmente secas (MOKANY; RAISON; PROKUSHKIN, 2006). Apesar dessas restrições, trata-se de um método conceitualmente robusto, fortemente fundamentado em medições diretas de campo e amplamente empregado como referência em estudos locais e experimentais de biomassa subterrânea (CHAVE *et al.*, 2014).

Tabela 4 – Comparação entre diferentes abordagens de estimativa da biomassa radicular.

Critério	Abordagem de estimativa		
	Equação alométrica	Modelo PLSR	MIO
Tipo de dado	Morfologia radicular	Reflectância hiperespectral radicular	Índices espectrais
Tipo de validação	Externa	Externa	Interna
Tamanho amostral (n)	11	11	6
R <sup>2</sup> (ajuste)	0,71	0,79	0,97
R <sup>2</sup> (validação)	0,66	0,37	0,95
RMSE (Mg ha <sup>-1</sup> )	2,39	3,26	0,46
ME (Mg ha <sup>-1</sup> )	-1,63	-2,19	0,08
Principal vantagem	Simplicidade	Alta resolução espectral	Aplicabilidade espacial
Principal limitação	Sensível à heterogeneidade radicular	Baixa transferibilidade	Depende de imagens sem nuvens

Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo PLSR apresentou o menor desempenho entre as abordagens avaliadas, com baixo coeficiente de determinação de predição ( $R^2_{pred} = 0,37$ ), elevado erro de predição (RMSEP = 3,26 Mg ha<sup>-1</sup>) e viés negativo persistente. Esses resultados evidenciam limitações associadas à aplicabilidade temporal e contextual de modelos hiperespectrais, especialmente quando calibrados a partir de conjuntos de dados específicos e posteriormente aplicados a amostras independentes coletadas sob diferentes condições ambientais e sazonais (JI *et al.*, 2024; SHEN *et al.*, 2025) e quando transformados de biomassa normalizada para biomassa absoluta. A composição florística dos pontos de coleta, onde cada espécie contribui em proporções diferentes com a biomassa radicular, também pode influenciar a acurácia desse modelo. Apesar do desempenho insatisfatório observado, o método mantém elevado potencial exploratório, sobretudo quando calibrado localmente, devido à sua capacidade de capturar informações físico-químicas diretamente associadas à composição do material radicular, não acessíveis por índices espectrais de banda larga (SHEN *et al.*, 2025).

Em contraste, o MIO apresentou o melhor desempenho global, com elevado

coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,95$ ), baixos valores de erro tanto no ajuste quanto na validação cruzada ( $RMSE_{LOOCV} = 0,46 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e viés médio próximo de zero. Esses resultados indicam elevada consistência entre as estimativas orbitais e a biomassa de referência obtida em campo, mesmo diante do reduzido tamanho amostral disponível, mas podem indicar também sobreajuste do modelo.

Além do desempenho estatístico, destaca-se como principal vantagem do MIO a possibilidade de representar a biomassa radicular de forma espacialmente contínua, permitindo a análise da variabilidade interna e dos padrões de distribuição dentro da área experimental. Enquanto as equações alométricas e o modelo hiperespectral dependem de medições pontuais e dados laboratoriais, limitando sua extrapolação espacial.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a aplicabilidade e a eficiência de diferentes abordagens para a estimativa da biomassa radicular até 30 cm de profundidade em uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca da Caatinga, atendendo aos objetivos propostos. Os resultados indicaram que todos os métodos puderam ser aplicados no contexto do experimento, embora com eficiências e limitações distintas.

As equações alométricas baseadas em parâmetros morfológicos radiculares apresentaram desempenho satisfatório para a estimativa da biomassa total ( $R^2 = 0,66$ ), sendo adequadas para aplicações pontuais e locais, mas com limitações na estimativa por classes de diâmetro, especialmente para raízes grossas, e tendência à subestimativa. O modelo PLSR apresentou desempenho modesto ( $R^2 = 0,37$ ), possivelmente devido à transformação dos dados, e análise pontual. Ainda assim, mostrou-se promissor ao manter relação estatística com a biomassa mesmo sem ajustes adicionais.

O MIO baseado no índice VARI, selecionado a partir do método Stepwise e derivado de imagens Sentinel-2, destacou-se pelo excelente desempenho estatístico e baixos erros de predição, além de possibilitar o mapeamento da biomassa radicular e a estimativa de estoques totais. Contudo, sua robustez é limitada pelo reduzido número de observações utilizadas no ajuste ( $n = 6$ ), o que exige cautela na generalização dos resultados.

De forma geral, o estudo confirma que foi possível aplicar e avaliar diferentes métodos indiretos de estimativa da biomassa radicular em uma FTSS, com eficiências distintas conforme a abordagem, destacando-se o potencial de modelos de imagens orbitais, por sua aplicabilidade espacial. Ainda assim, os resultados devem ser interpretados à luz das limitações metodológicas e do escopo específico de cada método.

## REFERÊNCIAS

- ADWIN PRATAMA, W. S. *et al.* Estimation of above ground carbon stock using multiple vegetation index on Sentinel-2 imagery (case study: Samarinda, East Kalimantan). In: **SEVENTH GEOINFORMATION SCIENCE SYMPOSIUM**, 22 dez. 2021, Yogyakarta, Indonesia. *Anais...* Yogyakarta, Indonesia: SPIE, 2021. p. 22. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12082/2617722/Estimation-of-above-ground-carbon-stock-using-multiple-vegetation-index/10.1117/12.2617722.full>>. Acesso em: 26 dez. 2025.
- BORGES, E. F.; SANO, E. E. Séries temporais de EVI do MODIS para o mapeamento de uso e cobertura vegetal do oeste da Bahia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 526-547, 2014.
- BORIANNE, P. *et al.* GT-RootS: An Integrated Software for Automated Root System Measurement from High-Throughput Phenotyping Platform Images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 150, p. 328-342, 2018.
- BURTON, A. L. *et al.* RootScan: Software for High-Throughput Analysis of Root Anatomical Traits. **Plant and Soil**, v. 357, n. 1, p. 189-203, 2012.
- CARVALHO PONTE, N. S. *et al.* Estimating concentrations of chlorophyll-a and suspended sediments in a continental aquatic ecosystem using remote sensing. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 14, 2020.
- CASTELO BRANCO, A. L. C. **Dinâmica da biomassa radicular e carbono em floresta tropical seca no semiárido brasileiro**. Orientadora: Isabel Cristina da Silva Araújo. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- CHAVE, J. *et al.* Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY . **Sentinel-2 Level-2A data (Surface Reflectance)**. Copernicus Open Access Hub, 2026. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/>. Acesso em: 01 jan. 2026.
- FEITOSA, R. C. **Estoque de carbono em floresta tropical sazonalmente seca no Nordeste do Brasil: uma comparação entre dois usos do solo**. Orientadora: Eunice Maia de Andrade. Coorientador: Rubens Sonsol Gondim. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- FEREZ, A. P. C. **Efeito de práticas silviculturais sobre as taxas iniciais de sequestro de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica**. Orientador: José Luiz Stape. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Recursos Florestais, opção em Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- FINÉR, L. *et al.* Factors Causing Variation in Fine Root Biomass in Forest Ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 2, p. 265–277, 2011.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. de B.; CHAVES, L. H. G. **Bioma caatinga e degradação**. [S.l.]: Epgraf, 2020.

GOMES, V. P. *et al.* Sensoriamento remoto hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas (Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome caatinga susceptibility to climate change). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 1122–1136, 2016.

GONZALEZ DEL CASTILLO, E. *et al.* Integrating proximal broad-band vegetation indices and carbon fluxes to model gross primary productivity in a tropical dry forest. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 065017, 2018.

HAQUE, M. A. *et al.* Effects of Environmental Conditions on Vegetation Indices from Multispectral Images: A Review. **Korean Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 4, p. 319–341, 2024.

HIGA, R. C. V. *et al.* Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2014. 68 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 266). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1011409>. Acesso em: 8 jan. 2026.

HIGUCHI, N. *et al.* Biomassa da parte aérea da vegetação da Floresta Tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 153–153, 1998.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JR., J. A. Biomassa florestal e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. **Em: Emissão x Seqüestro de CO<sub>2</sub> - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil**. CVRD. pp. 125-153, 1995.

ISLAM, Md. M. *et al.* Development of Remote Sensing-Based Yield Prediction Models at the Maturity Stage of Boro Rice Using Parametric and Nonparametric Approaches. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100494, 2021.

JACKSON, R. B. *et al.* A Global Analysis of Root Distributions for Terrestrial Biomes. **Oecologia**, v. 108, n. 3, p. 389–411, 1996.

JAMAN, Md. S. *et al.* Contrasting Responses of Plant above and Belowground Biomass Carbon Pools to Extreme Drought in Six Grasslands Spanning an Aridity Gradient. **Plant and Soil**, v. 473, n. 1–2, p. 167–180, 2022.

JESUS, Janisson Batista de. **Estimativa de biomassa acima do solo de Caatinga através de imagens SAR**. Orientadora: Tatiana Mora Kuplich. 2022. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

JI, F. *et al.* Unveiling the Transferability of PLSR Models for Leaf Trait Estimation: Lessons from a Comprehensive Analysis with a Novel Global Dataset. **New Phytologist**, v. 243, n. 1, p. 111–131, 2024.

KOCH, R. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: Combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. **Journal for nature conservation**, v. 35, p. 24-39, 2017.

LIMA, M. M. P. **Uso de imagens Sentinel para estimativa do estoque de carbono e biomassa acima do solo no bioma Caatinga**. Orientador: Carlos Alexandre Gomes Costa. Coorientadora: Isabel Cristina da Silva Araújo. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

LYNCH, J. Root Architecture and Plant Productivity. **Plant Physiology**, v. 109, n. 1, p. 7–13, 1995.

MAYER, D. G.; BUTLER, D. G. Statistical Validation. **Ecological Modelling**, v. 68, n. 1–2, p. 21–32, 1993.

MENDONÇA, J. C. **Dinâmica de atributos limnológicos e uso de sensoriamento remoto para estimar as concentrações de clorofila-a em reservatório no semiárido**. Orientador: Fernando Bezerra Lopes. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MILTON, E. J. *et al.* Progress in Field Spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S92–S109, 2009.

MOKANY, K.; RAISON, R. J.; PROKUSHKIN, A. S. Critical Analysis of Root: Shoot Ratios in Terrestrial Biomes. **Global Change Biology**, v. 12, n. 1, p. 84–96, 2006.

MOURA, F. de B. P. **Restauração na Caatinga**. 2. ed. rev. e ampl. Maceió, AL: Edufal, 2022.

MZID, N. *et al.* The Application of Ground-Based and Satellite Remote Sensing for Estimation of Bio-Physiological Parameters of Wheat Grown Under Different Water Regimes. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2095, 2020.

NASCIMENTO, D. M. **Desenvolvimento de um sistema de estimativa de biomassa vegetal através de sensores remotos para o semiárido pernambucano**. Orientador: Rômulo Simões Cezar Menezes. Coorientador: Aldo Torres Sales. 2019. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

NOGUEIRA, F. H. M. *et al.* A Handheld Multispectral Device for Assessing Leaf Nitrogen Concentrations in Maize. **Sensors**, v. 25, n. 13, p. 3929, 2025.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. *et al.* New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167-234, 2013.

PERSSON, H. Å. *Fine-root dynamics in a Scots pine stand with and without near optimum nutrient and water regimes*. **Acta Forestalia Fennica**, 167: 1–27. 1980.

PERSSON, H. Å. The Distribution and Productivity of Fine Roots in Boreal Forests. **Plant**

**and Soil**, v. 71, n. 1, p. 87–101, 1983.

PERVEZ, S. *et al.* Vegetation Monitoring Optimization With Normalized Difference Vegetation Index and Evapotranspiration Using Remote Sensing Measurements and Land Surface Models Over East Africa. **Frontiers in Climate**, v. 3, p. 589981, 2021.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2015.

POORTER, H. *et al.* Biomass Allocation to Leaves, Stems and Roots: Meta-analyses of Interspecific Variation and Environmental Control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.

PREGITZER, K. S. *et al.* FINE ROOT ARCHITECTURE OF NINE NORTH AMERICAN TREES. **Ecological Monographs**, v. 72, n. 2, p. 293–309, 2002.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.44.4-Solothurn. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2025. Software. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 01 jan. 2026.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 01 jan. 2026.

RATUCHNE, L. C. *et al.* Estado da Arte na Quantificação de Biomassa em Raízes de Formações Florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 450–462, 2016.

RIBEIRO, J. A. H. *et al.* Ecosystem importance of roots: A literature review. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 3, p. e0313345177, 2024.

RIBEIRO, S. G. **Espectroscopia de reflectância na avaliação do carbono orgânico em solos do semiárido**. Orientador: Adunias dos Santos Teixeira. Coorientadora: Isabel Cristina da Silva Araújo. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

RKWARD DEVELOPMENT TEAM. **RKward: a comprehensive graphical user interface and integrated development environment for statistical analysis with R**. 2025. Disponível em: <https://rkward.kde.org/>. Acesso em: 01 jan. 2026.

SEETHEPALLI, A. *et al.* RhizoVision Explorer: open-source software for root image analysis and measurement standardization. **AoB PLANTS**, v. 13, n. 6, p. plab056, 2021.

SHEN, J. *et al.* Assessing the Transferability of Models for Predicting Foliar Nutrient Concentrations Across Maize Cultivars. **Remote Sensing**, v. 17, n. 4, p. 652, 2025.

SILVA, Antônio Givanilson Rodrigues da. **Dinâmica na produção de biomassa radicular em anos secos, em floresta tropical seca, Caatinga**. Orientador: Fernando Bezerra Lopes. Coorientadora: Eunice Maia de Andrade. 2019. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SILVA, J. N. B. *Et al.* Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2024. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1610>. Acesso em: 26 dez. 2025.

SOUZA, M.T.C. *et al.* Caracterização climática e o efeito do estresse hídrico sob as plantas nativas da caatinga. **PUBVET**, Londrina, V. 8, N. 1, Ed. 250, Art. 1655, 2014.

STONE, M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v. 36, n. 2, p. 111–133, 1974.

TAM, N. H.; LOI, N. V.; TUAN, H. H. Establishing Models for Predicting Above-Ground Carbon Stock Based on Sentinel-2 Imagery for Evergreen Broadleaf Forests in South Central Coastal Ecoregion, Vietnam. **Forests**, v. 16, n. 4, p. 686, 2025.

VERA-ESMERALDAS, A. *et al.* UAV-Based Spectral and Thermal Indices in Precision Viticulture: A Review of NDVI, NDRE, SAVI, GNDVI, and CWSI. **Agronomy**, v. 15, n. 11, p. 2569, 2025.

WEESE, M. L.; SMUCKER, B. J.; EDWARDS, D. J. **The use of cross validation in the analysis of designed experiments**. [S.l.]: arXiv. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2506.14593>>. Acesso em: 05 jan. 2026. 2025

WORKMAN, Jr., Jerry; WEYER, L. **Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2007. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781420018318>>. Acesso em: 13 dez. 2025.

**APÊNDICE A – PLANILHA DE DADOS DE CAMPO**

<b>PERÍODO</b>	<b>amostra</b>	<b>profundidade (cm)</b>	<b>comprimento &gt;2mm (cm)</b>	<b>diâmetro &gt;2mm (mm)</b>	<b>volume &gt;2mm (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>comprimento &lt;2mm (cm)</b>	<b>diâmetro &lt;2mm (mm)</b>	<b>volume &lt;2mm (cm<sup>3</sup>)</b>
mar/23	083	0-10	501.142	0.860	2.914	2742.276	0.458	4.517
		10-20	604.209	0.493	1.155	1814.045	0.380	2.053
		20-30	645.010	0.541	1.480	1784.592	0.352	1.737
	004	0-10	861.960	0.737	3.672	4830.755	0.418	6.643
		10-20	463.350	0.770	2.158	2256.556	0.405	2.908
		20-30	553.158	0.627	1.709	2157.495	0.351	2.091
	099	0-10	778.506	0.592	2.139	4637.073	0.468	7.979
		10-20	664.974	0.464	1.125	2088.857	0.353	2.049
		20-30	1771.385	0.682	5.891	3911.026	0.332	3.393
	093	0-10	996.618	1.301	9.919	1869.994	0.338	1.677
		10-20	935.096	0.525	2.027	2739.201	0.318	2.176
		20-30	613.625	0.693	2.316	2148.523	0.326	1.798
	038	0-10	504.572	0.580	1.335	764.607	0.344	0.712
		10-20	438.996	0.429	0.634	1624.494	0.316	1.274
		20-30	1097.076	0.487	2.040	3279.838	0.347	3.092

jul/23	005	0-10	839.602	0.539	1.912	1436.845	0.343	1.324
		10-20	788.568	0.536	1.781	1623.647	0.346	1.522
		20-30	405.404	0.541	0.933	1046.733	0.358	1.051
	057	0-10	751.550	0.506	1.510	1374.544	0.338	1.233
		10-20	494.484	0.593	1.364	906.747	0.323	0.743
		20-30	378.201	0.547	0.887	566.085	0.308	0.422
	063	0-10	409.057	0.499	0.800	258.268	0.253	0.129
		10-20	696.636	0.604	1.998	637.861	0.233	0.271
		20-30	778.570	0.464	1.317	577.718	0.272	0.337
	021	0-10	793.945	0.775	3.748	4212.543	0.406	5.462
		10-20	279.551	0.867	1.650	1329.850	0.355	1.314
		20-30	328.757	0.530	0.724	278.013	0.300	0.196
	091	0-10	780.732	0.788	3.811	688.781	0.291	0.457
		10-20	982.651	0.664	3.402	576.362	0.276	0.344
		20-30	669.663	0.488	1.252	782.263	0.278	0.473
	028	0-10	874.644	0.547	2.051	1498.046	0.332	1.295
		10-20	757.761	0.646	2.485	1152.447	0.300	0.815
		20-30	839.307	0.360	0.852	1541.274	0.308	1.148

**APÊNDICE B – DETALHES DAS IMAGENS DE SATÉLITE UTILIZADAS**

<b>Data_Aquisicao</b>	<b>Periodo_correspondente</b>	<b>ID_Cena</b>	<b>Nivel_Pocessamento</b>	<b>Area_do_pixel_(m2)</b>
2020-11-14	Seco 2020	24MVA	2A	99.0234696369626
2021-05-23	Chuvoso 2021	24MVA	2A	99.0237763617593
2021-08-01	Intermediario 2021	24MVA	2A	99.0234696369626
2021-11-04	Seco 2021	24MVA	2A	99.0234696369626
2023-03-09	Chuvoso 2023	24MVA	2A	99.0234696369626
2023-07-22	Intermediario 2023	24MVA	2A	99.0236839468074

**APÊNDICE C – RESULTADOS DO MODELO PLSR**

Identificação		Derivada de 1ª ordem da reflectância espectral						Biomassa normalizada	Biomassa (Mg/ha)		
Data	Amostra	853	910	929	1164	1932	2147	Y	Real	Estimada	Erro
Mar-23	004	0.0008	0.0008	0.0008	0.0005	0.0010	-0.0003	0.0641	6.97	3.99	2.98
	099	0.0010	0.0008	0.0010	0.0002	0.0008	0.0000	0.3638	12.43	8.02	4.40
	093	0.0010	0.0010	0.0010	0.0000	0.0005	0.0003	0.4957	16.59	9.80	6.79
	083	0.0005	0.0005	0.0010	0.0003	0.0007	-0.0003	0.0000	4.96	3.13	1.83
	038	0.0008	0.0008	0.0008	0.0000	0.0005	-0.0002	0.0000	4.57	3.13	1.44
Jul-23	057	0.0008	0.0008	0.0010	0.0000	0.0005	0.0000	0.1035	3.22	4.52	1.30
	063	0.0010	0.0010	0.0010	0.0000	0.0005	0.0000	0.1100	3.13	4.61	1.48
	005	0.0005	0.0010	0.0008	0.0005	0.0008	-0.0003	0.0000	3.92	3.13	0.80
	091	0.0010	0.0010	0.0007	0.0003	0.0007	0.0000	0.3018	10.77	7.19	3.58
	021	0.0005	0.0007	0.0005	0.0002	0.0007	0.0000	0.2269	6.77	6.18	0.59
	028	0.0010	0.0005	0.0010	0.0003	0.0008	-0.0003	0.0773	8.60	4.17	4.44

