



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIA AGRÁRIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANA LIA CAETANO CASTELO BRANCO**

**DINÂMICA DA BIOMASSA RADICULAR E CARBONO EM FLORESTA  
TROPICAL SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**FORTALEZA**

**2023**

ANA LIA CAETANO CASTELO BRANCO

DINÂMICA DA BIOMASSA RADICULAR E CARBONO EM FLORESTA TROPICAL  
SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo.

FORTALEZA

2023

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

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

---

- C345 Castelo Branco, Ana Lia Caetano.  
Dinâmica da biomassa radicular e carbono em florestas tropical seca no semiárido brasileiro / Ana Lia Caetano Castelo Branco. – 2023.  
95 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Profª. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo.
1. florestas tropicais secas . 2. carbono . 3. biomassa radicular . I. Título.

CDD 630

---

ANA LIA CAETANO CASTELO BRANCO

DINÂMICA DA BIOMASSA RADICULAR E CARBONO EM FLORESTA TROPICAL  
SECA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido

Aprovada em:27/04/2023

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Fernanda Kelly Gomes da Silva  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

---

Profa. Dra. Bruna de Freitas Iwata  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Senhor e Salvador Jesus Cristo, que me guia e me dá condições para tudo, e sem Ele eu nada seria ou teria. E tudo que sou, que tenho e possa querer ter ou ser é para honra e Glória Dele. E que acima de tudo foi por causa Dele que tive força para continuar e chegar até aqui.

Aos meus pais Fernando e Silvia por estar comigo, cuidando e apoiando em todos os sentidos.

À Professora Dr. Isabel Cristina da Silva Araújo, não só pela excelente orientação, porque ela foi mais que orientadora, foi amiga. Dando apoio, compreendendo, incentivando. Muito obrigada professora por tudo.

À Professora Dr. Eunice Maia de Andrade pela idealização do projeto de pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Adunais dos Santos Teixeira, Fernanda Kelly Gomes da Silva, Bruna de Freitas Iwata pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos e colegas da Universidade que me ajudaram com seu apoio, contribuindo para houvesse eficácia nas atividades necessárias, e pelo qual muitas coisas não teriam sido possíveis principalmente aos meus amigos Arnaldo Sales e George Moura. Como também Aluísio, Sharon Ribeiro, Filipe Hermínio, Marcio Regys, Nilson, Yves, Rickson e Julyanne Braga.

À Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC) e todos os funcionários que nos receberam com carinho e dedicação, em especial ao Seu Zé Hamilton que sem o qual não seria possível as coletas amostrais do experimento, ele foi alguém muito essencial para o sucesso das coletas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola e a Universidade Federal do Ceará por oferecer as condições de infraestrutura de laboratórios, salas e equipamentos para a realização dessa pesquisa.

À Instituição CNPq pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Além disso, queria agradecer a todas as pessoas que mesmo não estando ligadas a universidade ou diretamente ao mestrado me ajudaram com um conselho, incentivando e orientando, á amigos e pessoas próximas. Muito Obrigada!

“... Não se glorie o sábio na sua sabedoria,  
nem o forte, na sua força, nem o rico, nas suas  
riquezas; mas o que se gloriar, glorie-se nisto:  
em me conhecer e saber que eu sou o  
SENHOR e faço misericórdia, juízo e justiça  
na terra; porque destas coisas me agrado, diz o  
SENHOR.!” Jeremias 9.23-24

## RESUMO

As Floresta Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) são apontadas como ambientes de exuberância florística mesmo em condições climática de escassez hídrica, e, portanto, com um alto potencial de produção de biomassa. Apesar disso, são ambientes ainda pouco pesquisados e estudados, principalmente frente a sua relação com a dinâmica do carbono, ainda mais quando se afunila para biomassa radicular, aquela encontrada abaixo do solo. Assim o método mais abordado para entender a relação dos reservatórios de carbono e a dinâmica da biomassa florestal, incluído a radicular, está em estimativas dessa biomassa por meios diretos ou indiretos. Com isso, o presente trabalho teve como objetivo, avaliar a relação que a dinâmica intra e interanual da biomassa radicular apresenta com a dinâmica do Carbono Orgânico do solo em FTSS no Semiárido Brasileiro. Os dados de biomassa radicular e de solo, foram obtidos a partir de coletas em campo definidas por período sazonal (chuvoso, intermediário e seco), sendo coletadas 6 amostras/período, totalizando na pesquisa de 24 amostras de cada. As amostras de biomassa foram processadas, pesadas e ainda analisadas quanto aos parâmetros morfológicos radiculares obtidos via scanner e software WinRhizo. Já das amostras de solo em análise de laboratório obtiveram-se o Carbono Orgânico Total do solo (COTs) e raízes (COTr) e Matéria Orgânica do solo (MO). Todos os dados foram analisados estatisticamente quando a dinâmica temporal, correlação de Spearman e análise de componentes principais (ACP). Para estimar a biomassa por métodos indiretos utilizou-se de métodos de análise estatística multivariada a RLM para gerar equações alométricas, e modelo de predição por dados espectrais obtidos com sonda de contato e espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR 3 (350-2500 nm). Para período do estudo observaram-se duas peculiaridades no comportamento temporal da dinâmica da biomassa radicular em relação a sazonalidade, como consequência da sensibilidade às variações pluviométricas entre o período chuvoso-intermediário-seco. Observou-se ainda que os valores proporcionais de raízes grossas superaram os de raízes finas, apresentando comportamento invertido a partir de 2019 em relação aos 4 primeiros anos de estudo (2015-2018). Os dados de COTs, MO e de COTr não apresentaram variância temporal estatisticamente significativa, porém a ACP e análise de correlação de Spearman apontaram que esse carbono no solo é respondido principalmente pelas raízes finas, e que o carbono nas raízes é influenciado principalmente pelas raízes grossas. A partir dos dados espectrais pela PLRS obteve-se um modelo de predição da biomassa radicular para FTSS, com  $R^2$  ajustado = 0,79 e RPD=2,04. Já em relação as equações alométricas foi possível utilizar os parâmetros morfológicos diâmetro

médio e volume de raízes para prever a BIOT ( $p < 0,001$ ;  $R^2 = 0,71$ ) e a BIO 2 ( $p < 0,001$ ;  $R^2_{ajust} = 0,80$ ), porém não a BIO1. Assim verificou-se que apesar do carbono no solo ser resultado preferencialmente da decomposição de raízes finas, as análises apontaram que isso não significa dizer que o aporte de biomassa no solo que possa ocorrer entre um período sazonal e outro afetará significativamente o carbono no solo da FTSS. Além disso, foi possível gerar modelos estimativos da biomassa radicular na FTSS pelos métodos de espectroscopia de reflectancia e por relações alométricas estabelecidas entre os parâmetros morfológicos, porém necessitando de validações com dados inéditos para aumento da confiabilidade desses modelos, e assim a sua utilização em estudos futuros do estoque de C abaixo do solo.

**Palavras-chave:** biomassa radicular; dinâmica do carbono; espectrorradiometria.

## ABSTRACT

The Seasonally Dry Tropical Forests (SDTFs) are known for their rich floral diversity even under conditions of water scarcity, and therefore have a high potential for biomass production. However, these environments are still poorly researched and studied, especially regarding their relationship with carbon dynamics, particularly for root biomass. Thus, the most commonly used method to understand the relationship between carbon reservoirs and forest biomass dynamics, including root biomass, is by estimating biomass using direct or indirect methods. The present study aimed to evaluate the relationship between intra- and inter-annual dynamics of root biomass and soil organic carbon dynamics in SDTFs in the Brazilian Semiarid region. Data on root and soil biomass were collected in the field during the rainy, intermediate, and dry seasons, with six samples collected per season, totaling 24 samples. Root biomass samples were processed, weighed, and analyzed for root morphological parameters obtained through scanning and WinRhizo software. Soil samples were analyzed in the laboratory for total soil and root organic carbon, and soil organic matter. All data was statistically analyzed in terms of temporal dynamics, Spearman correlation, and principal component analysis (PCA). To estimate biomass using indirect methods, multivariate statistical analysis was used to generate allometric equations using RLM, and a prediction model was created using spectral data obtained with a contact probe and FieldSpec Pro FR 3 spectroradiometer (350-2500 nm). For the study period, two peculiarities were observed in the temporal behavior of root biomass dynamics regarding seasonality, as a consequence of sensitivity to variations in rainfall between the rainy, intermediate, and dry periods. It was also observed that the proportional values of coarse roots exceeded those of fine roots, with an inverted behavior observed from 2019 compared to the first four years of the study (2015-2018). The data for total soil organic carbon, organic matter, and root organic carbon did not show statistically significant temporal variance, but PCA and Spearman correlation analysis indicated that soil carbon is primarily influenced by fine roots, while root carbon is primarily influenced by coarse roots. Using spectral data obtained through PLSR, a root biomass prediction model for SDTFs was obtained, with  $R^2$  adj = 0.79 and RPD = 2.04. With respect to allometric equations, it was possible to use the morphological parameters of average diameter and root volume to predict BIOT ( $p < 0.001$ ;  $R^2 = 0.71$ ) and BIO 2 ( $p < 0.001$ ;  $R^2$  adj = 0.80), but not BIO1. Therefore, although soil carbon is primarily a result of the decomposition of fine roots, the analyses indicated that this does not necessarily mean that the input of biomass in the soil between seasons will significantly affect

soil carbon in SDTFs. Additionally, it was possible to generate root biomass estimation models in SDTFs using reflectance spectroscopy and allometric relationships established using morphological parameters, but further validation with new data is required to increase the reliability of these models and enable their use in future studies on belowground carbon stocks.

**Keywords:** root biomass; carbon; estimate; spectroradiometry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Distribuição Global da Floresta Tropical Sazonalmente Seca – FTSS .....	4
Figura 2	– Representação do espectro eletromagnético.....	10
Figura 3	– Comportamento espectral de diferentes alvos.....	11
Figura 4	– Localização da área de estudo.....	12
Figura 5	– Etapas de coletas, processamento e obtenção da biomassa radicular.....	17
Figura 6	– Fluxograma da análise nas raízes pelo scanner e software WinRHIZO.....	19
Figura 7	– Etapas da análise de Carbono Total no Solo (COT) e nas raízes da FTSS.....	21
Figura 8	– Amostras de biomassa radicular processadas e acondicionadas no recipiente polipropileno para as leituras no espectrorradiômetro.....	24
Figura 9	– Aquisição de dados hiperespectrais: (a) geometria de aquisição dos dados; (b) coleta dos dados.....	25
Figura 10	– Box plot da Avaliação temporal da dinâmica relacionada a biomassa radicular Total; a testemunha (jul/15); Períodos iniciais da pesquisa referentes a 2015 2018 (cor verde), coletas referentes a 2019 (cor laranja) e o período de 2020 2021 (cor azul) .....	31
Figura 11	– Precipitação mensal e acumulada de 3 meses (PA3m) ao período de coleta para os anos de 2019, 2020 e 2021 medidas na FEVC, Pentecoste/CE.....	32
Figura 12	– Comportamento temporal da Biomassa Total (BIOT) em relação a proporção de raízes maiores de 2 mm e menores de 2 mm.....	34
Figura 13	– Análise quantitativa dos parâmetros Diâmetro médio e Volume de Raiz por período de coleta e por classificação de diâmetro radicular.....	36
Figura 14	– Avaliação temporal do parâmetro diâmetro por profundidade para os períodos e entre a classificação.....	37

Figura 15 – Avaliação temporal do parâmetro volume por profundidade para os períodos e entre a classificação.....	39
Figura 16 – Avaliação das imagens obtidas do scanner na aquisição do parâmetro para biomassa >2 mm (a-c) e (d-f) menor de 2 mm.....	41
Figura 17 – Avaliação Temporal da dinâmica do (a) Carbono Total no solo; (b) Matéria Orgânica; e (c) Carbono Total na Raízes na FTSS – Caatinga.....	43
Figura 18 – Balanço da produtividade radicular entre períodos sazonais em relação a dinâmica de carbono na FTSS.....	44
Figura 19 – Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis BIO 1, BIO 2, VMR1 VMR2, DMR1, DMR2, COTs, COTr e MO.....	46
Figura 20 – Comportamento espectral descritivo para os dados de biomassa coletados no período seco (a) e chuvoso (b). As Média (linhas) e desvio padrão (bordas) da resposta espectral das amostras.....	51
Figura 21 – (a) Análise do comportamento espectral segundo o teor de biomassa. As Média (linhas) e desvio padrão (bordas) da resposta espectral das amostras; (b) Análise do comportamento espectral a partir dos tratamentos dos dados pela transformação da primeira.....	53
Figura 22 – Correlação de Pearson (r) entre as concentrações de Biomassa e a reflectância (a) como com a primeira derivada (b).....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Especificações dos pontos coletados na condução da pesquisa de 2020-2021.....	16
Tabela 2	– Interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson (r).....	26
Tabela 3	– Interpretação dos resultados de RPD para modelos de previsão.....	28
Tabela 4	– Estatística geral dos dados Biomassa radicular para o período de (Nov/20 – Nov/21) .....	30
Tabela 5	– Apresentação dos resultados de comprimento total.....	40
Tabela 6	– Dados de Carbono na Raíz e no solo e Matéria Orgânica para o período avaliado (Nov/20 -Nov-21) .....	42
Tabela 7	– Coeficiente de correlação de Spearman entre os parâmetros entre Biomassa $\varnothing \leq 2\text{mm}$ (BIO 1), Biomassa $\varnothing > 2\text{ mm}$ (BIO 2), Biomassa Total (BIOT), Diâmetro Médio Raízes $\leq 2\text{ mm}$ (DMR1), Volume Raízes $\leq 2\text{ mm}$ (VMR1), Diâmetro Médio Raízes $> 2\text{ mm}$ (DMR2), Volume $> 2\text{ mm}$ (VMR2), Carbono Total no Solo (COT), Carbono Total na Raíz (COTr) e Matéria Orgânica (MO).....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FTSS	Floresta Tropical Sazonalmente Seca
COT	Carbono Orgânico Total
MO	Matéria Orgânica
BIOT	Biomassa Total
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
FEVC	Fazenda Experimental do Vale do Curu
MASSA	Grupo de Pesquisa e Extensão de Manejo de água e solo no Semiárido
ND	Número Digital
SR	Sensoriamento Remoto
REM	Radiação Eletromagnética
PLSR	Regressão por Mínimos Quadrados Parciais
RPD	Taxa de desvio da performance
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$R^2$	Coeficiente de determinação
$R^2_{\text{ajust}}$	Coeficiente de determinação ajustado
$r$	Coeficiente de correlação de Pearson
$\rho$	Fator de reflectância

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESE .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>4.1</b>	<b>Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS).....</b>	<b>4</b>
<b>4.2</b>	<b>Floresta Tropical Seca do Brasil – Caatinga.....</b>	<b>5</b>
<b>4.3</b>	<b>Biomassa radicular e a dinâmica do carbono na Caatinga.....</b>	<b>7</b>
<b>4.4</b>	<b>Estimativa de biomassa radicular por métodos indiretos.....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>Dinâmica da biomassa radicular e do carbono na Caatinga.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1.1</b>	<i>Descrição da área estudada, experimento e obtenção dos dados de biomassa.....</i>	<b>12</b>
<b>5.1.2</b>	<i>Obtenção dos parâmetros radicular pelo analisador de raízes – WinRHIZO.....</i>	<b>18</b>
<b>5.1.3</b>	<i>Quantificação da Matéria Orgânica do Solo.....</i>	<b>20</b>
<b>5.1.3.1</b>	<i>Obtenção e processamento das amostras de solo.....</i>	<b>20</b>
<b>5.1.3.2</b>	<i>Análise do Carbono Orgânico Total (COT) do solo.....</i>	<b>20</b>
<b>5.1.4</b>	<i>Obtenção de dados de precipitação.....</i>	<b>22</b>
<b>5.1.5</b>	<i>Análise Estatística.....</i>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>Estimativa da biomassa por métodos indiretos.....</b>	<b>23</b>
<b>5.2.1</b>	<i>Estimativa com os dados hiperespectrais.....</i>	<b>23</b>
<b>5.2.2</b>	<i>Estimativa da biomassa por equações alométricas.....</i>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1</b>	<b>Dinâmica da Biomassa Radicular e do Carbono em uma FTS-Caatinga.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1.1</b>	<i>Avaliação da Dinâmica da Biomassa Radicular na FTSS – Caatinga entre períodos sazonais.....</i>	<b>30</b>
<b>6.1.2</b>	<i>Caracterização das amostras de biomassa maiores e menores de 2 mm pelo diâmetro médio, volume de raízes e comprimento de raízes (parâmetros radiculares) .....</i>	<b>36</b>

6.1.3	<i>Dinâmica do Carbono Orgânico Total no Solo (COTs) e a sua relação com a Biomassa Radicular na FTS-Caatinga.....</i>	41
6.2	<b>Estimativa da biomassa radicular por métodos indiretos: utilizando-se da espectroscopia de reflectância e de relações alométricas.....</b>	51
6.2.1	<i>Modelo preditivo da biomassa com os dados hiperespectral.....</i>	51
6.2.1.1	<i>Análise dos dados Hiperespectral de biomassa radicular.....</i>	51
6.2.1.2	<i>Coefficientes de Correlação de Pearson.....</i>	54
6.2.1.3	<i>Estimativa da Biomassa radicular por Regressão dos Mínimos Quadrados Parciais (PLSR).....</i>	55
6.2.2	<b>Equação alométricas para predição da biomassa abaixo do solo.....</b>	57
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	58
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	59
	<b>APÊNDICE A – DADOS POR AMOSTRA DE BIOMASSA, PARÂMETROS RADICULARES, CARBONO E MATÉRIA ORGÂNICA .....</b>	66
	<b>APÊNDICE B – IMAGENS OBTIDAS NO SCANNER POR AMOSTRA E PROFUNDIDADE DA BIOMASSA MAIOR DE 2 mm.....</b>	67
	<b>APÊNDICE C – CONJUNTO DE DADOS TOTAIS DOS PARÂMETROS RADICULARES POR AMOSTRA, PROFUNDIDADE E DIÂMETRO.....</b>	75

## 1 INTRODUÇÃO

As chamadas Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS), são classificadas assim por estarem inseridas em ambientes que em determinados período do ano sofre com condições de déficit hídrico, apresentando realidades pluviométricas médias anuais variando de 500 a 1.800 milímetros, com chuvas concentradas em 4 a 7 meses (BANDA et al., 2016; FAO, 2012).

No entanto, tais condições, não diminuem a capacidade desses ecossistemas de serem dotados e possuidores de grande exuberância florística e de ambiente, tendo de forma peculiar em comparação a outras Florestas Tropicais, uma especificidade em hábitos das plantas, apresentando diferentes padrões de crescimento, incorporação de biomassa, deposição de serapilheira, renovação do sistema radicular e densidade da madeira. Sendo, essa especificidade um dos fatores preponderantes para que estudos e pesquisas voltados para esses ambientes sejam priorizados, pois esses ambientes ainda são negligenciados em termo de pesquisa.

E um dos pontos crucias a serem pesquisados nesses ambientes são as questões de aquecimento climático e como ocorre a dinâmica de carbono com a produção de biomassa acima e abaixo do solo. Já que a capacidade de produção de biomassa de uma floresta fornece estimativas dos reservatórios de carbono na sua vegetação, e conseqüentemente, representa a quantidade potencial de carbono que pode ser adicionada à atmosfera como dióxido de carbono, principalmente quando a floresta é desmatada e/ou queimada.

Se a biomassa de FTSS associada a dinâmica do carbono é um assunto ainda pouco pesquisado, quando comparados a outras classificações de Florestas Tropicais, a conhecida biomassa radicular, aquela encontrada abaixo do solo, é que faltam dados que esclareçam essa relação. Apesar dessa limitação, a biomassa abaixo do solo, mas especificamente as raízes finas, já são apontadas como as principais contribuintes para o aporte de matéria orgânica no solo, principalmente devido a processo de senescência durante a época seca, em relação as entradas que vem acima do solo, e, portanto, estão mais associadas a dinâmica do carbono nessas florestas do que outros reservatórios de biomassa.

Assim o método mais abordado para entender a relação dos reservatórios de carbono e a relação da biomassa florestal, incluído a radicular, está em estimativas dessa biomassa, seja por métodos diretos ou métodos indiretos. No método direto são coletadas amostras em campo e determinadas a sua massa, e apesar de serem os métodos mais usuais são

considerados mais destrutivos, principalmente quando estudos iniciados em novos sítios, onde ainda não há informações sobre a biomassa abaixo do solo. Por outro lado, os métodos indiretos que visam a estimativa da biomassa podem se apresentar como alternativas viáveis, promissora e alternativa as técnicas mais usuais de obtenção dessa biomassa radicular. Esses métodos por sua vez utilizam-se de informações morfológicas e/ou espectrais para a construção de modelos matemáticos que estimem a biomassa radicular.

O Método de estimativa mais utilizado tem sido relações empíricas ou relações alométricas, entre a biomassa e outras variáveis obtidas em inventário florestal. Para além das equações alométricas metodologias como a espectroscopia de reflectância, associada a técnicas multivariadas são muito usuais para construção de modelos de predição de atributos do solo e está começando a ser utilizada para o estudo da biomassa radicular.

## **2. HIPÓTESE**

A partir disso, é tomada como primeira hipótese que o teor do Carbono Orgânico Total no solo (COT) na FTSS, é afetado pelo aporte dinâmico da biomassa radicular frente a sazonalidade climática da região. Segunda hipótese que a partir da espectroscopia de reflectância e de relações alométricas estima-se biomassa radicular de FTSS.

## **3.OBJETIVO**

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a relação que a dinâmica intra e interanual da biomassa radicular apresenta com a dinâmica do teor de Carbono Orgânico do solo em Floresta Tropical Sazonalmente Seca no Semiárido Brasileiro.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- 1.** Determinar o Carbono Orgânico Total (COT) no solo e nas raízes e correlacionar com a dinâmica da biomassa radicular intra e interanual.
- 2.** Avaliar atributos morfológicos da biomassa radicular para correlação com o aporte de Carbono Orgânico Total no solo.
- 3.** Gerar uma equação alométrica para estimar biomassa radicular abaixo do solo por meio de atributos morfológicos.

4. Gerar um modelo preditivo de biomassa radicular para uma região de Floresta Tropical Sazonalmente Seca por dados hiperespectrais (350-2500 nm) da biomassa de raízes.

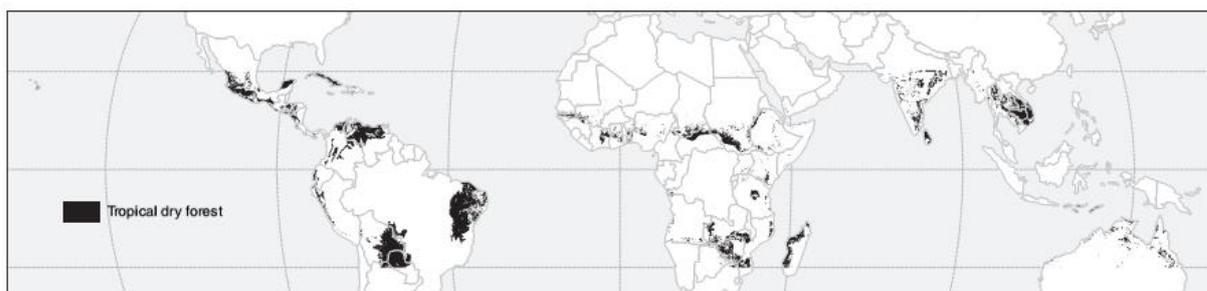
## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS)

As chamadas Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) são definidas por diversos autores como um bioma caracterizado por apresentar uma área com baixa precipitação anual, inferior a 1.100 mm/ano, com uma estação seca de pelo menos 5-6 meses de duração, com chuvas abaixo de 100 mm. E como resposta as tais condições, apresenta, uma flora dominada por espécies adaptadas morfológicamente para essa estação seca prolongada (SÄRKINEN *et al*, 2011; MURPHY e LUGO,1986; JANZEN, 1988).

Em termos territoriais, esse bioma está distribuído em uma área de 1.048.700 km<sup>2</sup> (Figura 1), sendo que a maior proporção está concentrada na região da América do Sul, com os maiores núcleos sendo encontrados no nordeste do Brasil (Caatinga), nos sistemas dos rios Paraguai-Paraná (Misiones), e no sudoeste da Bolívia e noroeste da Argentina (Piemonte). No entanto, esses núcleos encontram-se extremamente fragmentado devido a fatores naturais (como por exemplo, fatores climáticos e flutuações) e principalmente por distúrbios humanos (SÄRKINEN *et al*, 2011; MILES *et al.*, 2006).

**Figura 1-** Distribuição Global da Floresta Tropical Sazonalmente Seca - FTSS



Fonte: MILES *et al.*, 2006

Esses fatores tornam esse ecossistema um dos mais ameaçados, que aliado com a escassez de estudos envolvendo sua região, aumenta ainda mais a sua vulnerabilidade. Os distúrbios antrópicos estão associados ao intenso contingente populacional presente ocupado por áreas em torno dessa região. Estima-se que até um terço da população global viva em área sazonalmente secas (MILES *et al.* 2006), sendo ela predominantemente pobre, e utilizando-se

das FTSS como meio de subsistência (CAMPBELL 1996; CUNNINGHAM *et al.*, 2008; WAEBER *et al.*, 2012).

Essa enorme pressão antrópica em que estão sendo submetida a essas florestas segundo FEITOSA (2017), pode acarretar e influenciar a redução do potencial produtivo de biomassa desses ecossistemas, e que, portanto, afetar no potencial de sequestro e estoque do carbono desses ecossistemas. E por isso, aliado aos poucos estudos envolvendo o tema para a dinâmica de carbono nas FTSS que se faz necessário maiores investigações.

## **4.2 Floresta Tropical Sazonalmente Seca do Brasil**

Um dos maiores núcleos, em termos de área das FTSS na América do Sul está localizado no nordeste do Brasil. O bioma Caatinga, como é denominado a vegetação que cobre a maior parte da região árida e semiárida do nordeste brasileiro, ocupa uma área de aproximadamente 844.453 km<sup>2</sup>, cerca de 9,9% do território brasileiro (IBGE, 2004). Caracterizando-se em termo edafoclimático em relação as FTSS existentes no globo, como a região de menor disponibilidade hídrica (COSTA *et al.*, 2014), com índices pluviométricos variando, em torno de 250 a 900 mm anuais (ALVES, 2009).

Apesar dessas condições climáticas adversas, o bioma apresenta uma surpreendente diversidade de ambientes, proporcionados por um mosaico de tipos de vegetação, em geral caducifólia, xerófila e, por vezes, espinhosa, variando com o mosaico de solos e a disponibilidade de água (VELLOSO *et al.*, 2002). Os solos, que são em sua maioria assentados sobre terrenos cristalinos com poucas regiões sedimentares, se distribuem-se predominantemente nas classes dos Vertissolos, Luvisolos, Neossolos, Planossolos e Latossolos (AB'SABER, 1974; PRADO, 2003; SILVA, 2019).

A vegetação encontrada na caatinga é constituída por uma grande diversidade de espécies vegetais, muitas das quais endêmicas ao bioma, e outras que podem exemplificar relações biogeográficas que ajudam a esclarecer a dinâmica histórica vegetacional da própria Caatinga e de todo o leste da América do Sul (ANDRADE LIMA 1981, 1989). E desse conjunto diverso, rica em espécies de cactáceas e bromeliáceas, apresenta percentualmente 23% de espécies lenhosas de pequeno porte, dotadas de espinhos, sendo, geralmente, caducifólias, perdendo suas folhas no início da estação seca.

Essa diversidade torna-a possuidora de uma alta riqueza de recursos genético, dado a sua alta biodiversidade quando comparada a outras regiões semiáridas no mundo (FERNANDES; QUEIROZ, 2018; AQUINO, 2015; CALIXTO JÚNIOR *et al*, 2014; PESSOA *et al*, 2008; PEREIRA JÚNIOR *et al*, 2012). Essa riqueza implica em uma especificidade em hábitos das plantas, com diferentes padrões de crescimento, incorporação de biomassa, deposição de serapilheira, renovação do sistema radicular, densidade da madeira etc., de forma que todos esses componentes integram a dinâmica do carbono nesse ecossistema florestal (SILVA,2019).

Estudos e pesquisas desde os mais antigos aos mais recentes realizados em áreas de Caatinga testificam essa riqueza da biodiversidade vegetal, como também o potencial produtivo de biomassa nesses ecossistemas. TIESSEN *et al.* em 1998, afirma em seu estudo que em áreas de Caatinga que apresentam uma vegetação mais aberta, pode expressar um potencial de produção de biomassa que variava de 5 a 10 Mg há<sup>-1</sup>, mas por outro lado, em áreas com florestas mais adensadas esse potencial pode chegar a aproximadamente 100 Mg há<sup>-1</sup>. Já CAMPO *et at.* em 2020, mostrou o quanto esse potencial produtivo de sua vegetação pode ser influenciado negativamente quando esse ecossistema é submetido a pressões climática extremas, como o de secas prologadas, havendo a redução mais 20% da produção de biomassa no bioma. A partir disso, a compreensão da distribuição vegetal da Caatinga e a sua relação com a produção de biomassa, torna-se essencial para o planejamento estratégico do desenvolvimento, preservação das funções, serviços humanos e biodiversidade desse bioma (MILES *et al.* 2006; ANDREA D.A. CASTANHO *et al.*, 2020).

Apesar disso, esse bioma tem sido considerado o menos estudado em relação à flora quando comparado ao demais biomas brasileiros, como também um dos que têm sofrido maior degradação, pelo uso desordenado e predatório de atividades agropecuárias que ocupam várias extensões no semiárido, nos últimos 400 anos. Assim dado a essa realidade diversos pesquisadores e autores reafirmam a necessidade urgente de estudos mais aprofundados para o conhecimento do bioma Caatinga com intuito da criação de medidas que venham promover a sua conservação (ARAÚJO & FERRAZ, 2008; RODAL *et al.*, 2008; SOUZA & RODAL, 2010; PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2012).

### 4.3 Biomassa radicular e a dinâmica do carbono na Caatinga

A biomassa é definida como todo material orgânico, não fóssil, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais (OMACHI, I.H. *et al.*, 2004). Em florestas, a biomassa viva inclui tronco, galhos, raízes, cascas, sementes e folhagens. A biomassa morta inclui serrapilheira, galhos e troncos caídos, além da biomassa morta abaixo do solo, e a biomassa total é o somatório de todos esses componentes (HIGA *et al.*, 2014).

Diversos autores apontam a estreita ligação e importância que a estimativa da biomassa florestal possui com o estoque de carbono presente nas mesmas, sendo considerado por alguns, como o aspecto mais importante para o estudo do C nas florestas (BROWN, 1997; SANQUETTA *et al.*, 2002; HIGA *et al.*, 2014). Principalmente porque biomassa das florestas também é muito relevante para questões relacionadas a mudanças globais, já que essa biomassa nas florestas fornece estimativas dos reservatórios de carbono na sua vegetação, e conseqüentemente, representa a quantidade potencial de carbono que pode ser adicionada à atmosfera como dióxido de carbono, quando a floresta é desmatada e/ou queimada (BROWN, 1997). Para isso muitos estudos tem se utilizado de métodos de quantificação dessa biomassa para compreender essa relação com a dinâmica do carbono.

Portanto, quando se trata da mensuração da biomassa florestal, seja em florestas plantadas ou naturais, implicará na quantificação de quatro reservatórios de carbono: biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo (raízes), serrapilheira e necromassa (BIRDSEY, 2006). E desses quatro reservatórios a estimativa da biomassa de raízes tem sido sem dúvidas a menos avaliada quando comparada as dos componentes aéreos das florestas (AQUINO, 2015; BARDGETT; MOMMER DE VRIES, 2014; ERKTAN; MCCORMACK; ROUMET, 2018; GREEN *et al.*, 2005; LIMA; MIRANDA; VASCONCELOS, 2012). Apesar dessa escassez em pesquisas, alguns estudos já apontam que elas desempenham diversas interações com o ambiente (BARDGETT; MOMMER; DE VRIES, 2014), e tem se mostrado importante em processos que contribui para o aporte de C no solo (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016; MOKANY *et al.*, 2006; MURPHY e LUGO, 1986).

E um dos processos que as raízes nas FTSS realizam e que tem relação direta com essa dinâmica do carbono florestal é o “turnover” radicular, ou taxa de renovação radicular

(LUKAC, 2011), geralmente expressa por ano (ano-1). No qual, é feito pelas raízes finas, ou seja, raízes com até 2 mm de diâmetro (ADDO-DANSO; PRESCOTT; SMITH, 2016), essas raízes são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes, além de juntamente com os outros tipos de raízes, responderem por cerca de 33% da produção primária líquida global do C em florestas (JACKSON; MOONEY; SCHULZE, 1997). E é devido à sua rápida produção, senescência e decomposição, que as raízes finas contribuem significativamente para o aporte de matéria orgânica no solo, influenciando no fluxo C do solo na FTSS.

Já com relação as raízes médias e grossas, ou raízes com diâmetro maior que 2 mm, que atuam no apoio a rede de raízes finas, e no suporte da estrutura da planta (KEPLIN, B. & HÜTTL, R. F, 2001; TOBIN, B. *et al*, 2007), a sua participação na dinâmica do carbono está mais fluente a longo prazo, como consequência da sua lenta decomposição, e tendo a sua importância na rotatividade de C e nutrientes mais voltada para a produtividade do ecossistema (RAZ-YASEEF, N., KOTEEN, L. & BALDOCCHI, D. D., 2013; LANGLEY, J. A. & HUNGATE, B. A, 2003).

Outro ponto de importância no papel que as raízes exercem no aporte de C no solo é que em geral, além de ser a maior contribuinte de entrada Matéria Orgânica no Solo (MOS) no solo em comparação a entradas que vem acima do solo (BALESDENT e BALABANE, 1996 ; GHAFOOR *et al.*, 2017 ; RASSE *et al.*, 2005), elas são também influenciadoras na qualidade desse C, podendo influenciar por meio das suas características nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica no nível da comunidade (POIRIER *et al*, 2018). POIRIER *et al*, (2018), identificou em seu estudo quais características de raízes são mais suscetíveis a influenciar os mecanismos de estabilização da MOS tanto na camada superior do solo (ou seja, os primeiros 20-30 cm do solo) e no subsolo (ou seja, camadas subjacentes do solo). O autor chegou a identificar 18 características principais, expondo quais característica influenciava mais nessa estabilização quer negativamente ou positivamente. Mostrando assim também, que aumento da biomassa da raiz no solo, é importante para aumentar os estoques de carbono orgânico no solo.

Assim, sob uma perspectiva de vulnerabilidade climática da região cada vez mais afetada pelas mudanças climáticas globais, e, portanto, afetando a disponibilidade de água para essa população vegetal, é que investigações para entender como essa relação de produção de biomassa radicular pode influenciar na dinâmica do carbono nas FTSS, e como isso pode trazer

esclarecimentos que promovam políticas de conservação e preservação desse bioma tal rico mas ao mesmo tempo tão vulnerável às mudanças climáticas globais como a ação antrópica.

#### 4.4 Estimativa de biomassa radicular por métodos indiretos

A mensuração da biomassa radicular tem sido feita partir de métodos diretos (determinação) e indiretos (estimativas) (HIGUCHI & CARVALHO, 1994). A determinação significa uma medição real feita diretamente na biomassa, a partir de um instrumento como a balança, por exemplo. Já a estimativa de biomassa pelo método indireto consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal.

As estimativas da biomassa total ou por diâmetro de raízes por relações alométricas podem ser utilizadas com confiabilidade para estimar a biomassa de raízes finas e, conseqüentemente, calcular o estoque de C nesse compartimento da árvore (MELLO & GONÇALVES, 2008; SILVEIRA *et al.*, 2008). Podendo serem feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões (HIGUCHI & CARVALHO, 1994; RATUCHNE LC, *et al.*, 2016).

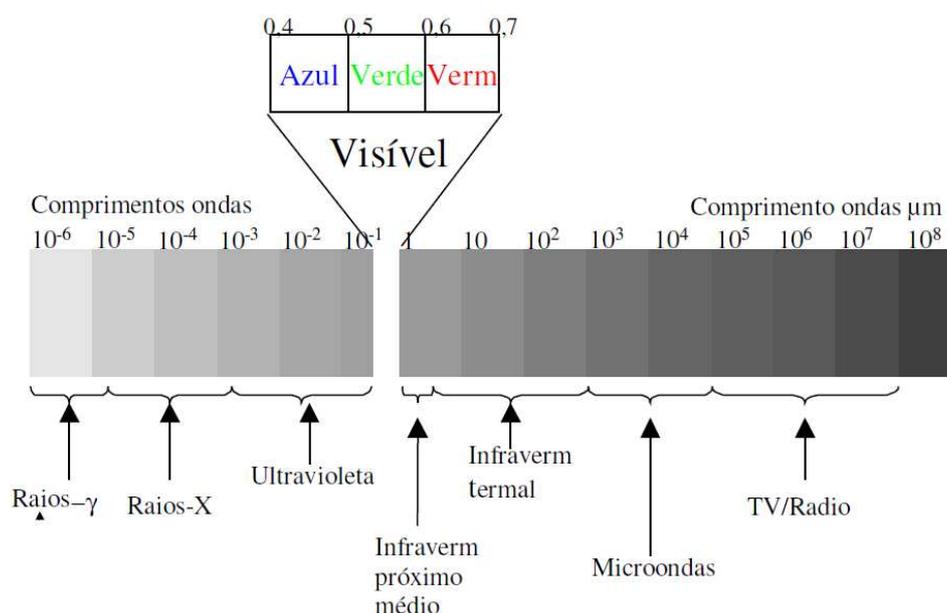
Para isso é necessário relacionar os dados com caracteres biométricos, tendo-se assim uma relação chamada “alométricas” (RATUCHNE LC, *et al.*, 2016). Com relação ao número de variáveis independentes, HIGUCHI *et al.* (1998) citam que equações alométricas, com apenas uma variável independente, podem apresentar resultados tão consistentes quanto os modelos que utilizam várias variáveis.

Além dessas relações empíricas para geração de modelos, a técnica da espectroscopia de reflectância ainda que de forma tímida está em ascensão nas pesquisas na construção de modelos que predizem a biomassa radicular. Entre esses estudos e pesquisas estão aqueles que buscam avaliar a capacidade da técnica de prever, por exemplo, densidade de raízes, como o de XU *et al.* (2016; 2017), que buscou determinar se a espectroscopia VIS-VNIR poderia prever a densidade de raízes em núcleos de arroz, além de comparar os diferentes modelos de calibração multivariados (PCR, PLSR e SVMR) para essa estimativa a partir de espectros VIS-VNIR. RUMBAUGH *et al.* (1988); PICON-COCHARD *et al.* (2009); KUSUMO *et al.* (2010, 2011) também usaram da técnica para estimar densidade de raízes, porém em plantas de pastagem sequeiro. Como também até para quantificar a fração de massa

da raiz de cada espécie em misturas de raízes (SOUSSANA et al., 2005; ROUMET et al, 2006) e para uma estratégia para a análise de raízes finas (TANIKAWA et al, 2019; NAKAJI et al.,2008; REWALD AND MEINEN 2013; DOMISCH et al. 2015).

A espectroscopia de reflectância é uma técnica do Sensoriamento Remoto – SR, ou seja, refere-se em definição clássica na aquisição de dado onde a relação sensor e alvo não existe contato direto, físico. O método é considerado uma medida de obtenção de dados, alternativa, não invasiva, rápida e livre de qualquer reagente químico (BROWN et al., 2006). Esses dados são obtidos a partir da energia eletromagnética, ou radiação eletromagnética (REM) quantificada por sensores, e ordenada de maneira contínua em função do seu comprimento de onda, ou de sua frequência, sendo esta disposição denominada de espectro eletromagnético (Figura 2), o qual varia desde as radiações gama com os menores comprimentos de onda (cerca de  $10^{-6}$   $\mu\text{m}$  ou  $10^{-3}$  nm) até as ondas de rádio com comprimentos de onda de até 100 m ( $10^7$   $\mu\text{m}$ ), sendo a faixa mais utilizada a da região do visível (0,4  $\mu\text{m}$  – 0,7  $\mu\text{m}$ ) (SLATER, 1980; STEFFEN et al. 1996).

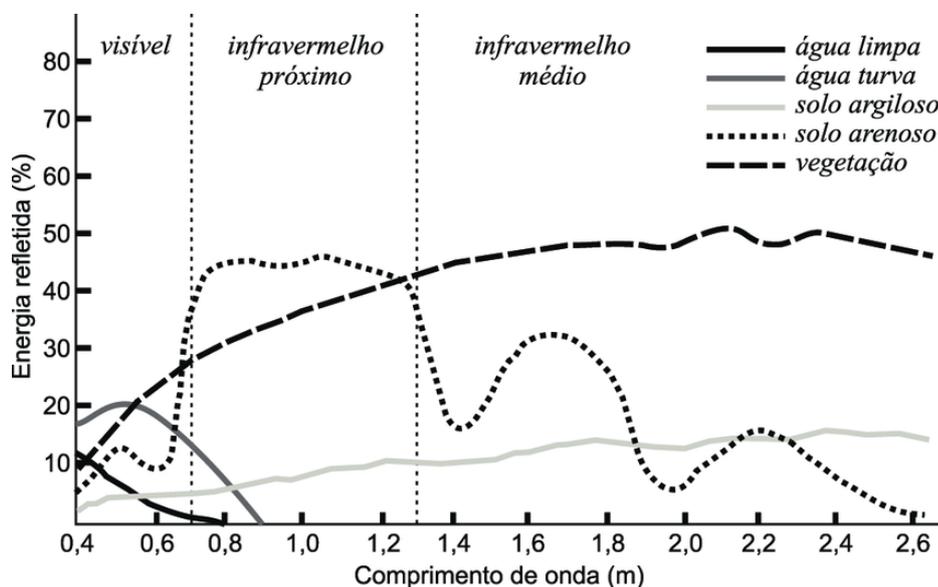
**Figura 2** – Representação do espectro eletromagnético.



Fonte: Figueiredo, D. (2005)

Essa disposição se organiza de forma singular para cada objetivo (HORG, 2006; JENSEN, 1983), tendo nisso, a chamada assinatura espectral dos alvos, ou ainda comportamento espectral (Figura 3). Funcionando da seguinte forma: 1) a partir de uma fonte de energia natural ou artificial, o sensor capta REM que pode ser emitida ou refletida pelo alvo; 2) que em seguida será organizada ao longo de cada comprimento de onda em picos de reflectância ou de absorbância. E o estudo dessa interação da REM com determinado alvo em função do comprimento de onda em que a radiação está sendo refletida ou espalhada é chamado de espectroscopia.

**Figura 3** - Comportamento espectral de diferentes alvos



Fonte: Florenzano (2002).

Assim o uso da espectroscopia de reflectância, vem sendo uma alternativa potencial em diferentes aspectos para o estudo de raízes, principalmente no que diz respeito para a predição da densidade de raízes. No entanto, apesar da crescente na pesquisa envolvendo o uso da espectroscopia voltado para biomassa radicular, elas ainda são consideradas escassas se comparado à outros alvos como o solo, água e aqueles que prever características, como morfologia foliar, pigmentos fotossintéticos (ou seja, clorofila e carotenóides), ainda mais quando se trata de pesquisas que envolva biomassa radicular e carbono do solo para as condições de uma FTSS como a Caatinga.

Assim dado o potencial que a espectroscopia de reflectância possui na análise quantitativa e de predição para o estudo do carbono orgânico do solo e da biomassa radicular, permitindo essa correlação, e afim de se trazer uma abordagem diferenciada, inovadora, alternativa e até mais eficiente as técnicas tradicional para o estudo da biomassa radicular e sua relação com dinâmica do carbono na Caatinga e assim abranger uma melhor compreensão do assunto, é que se faz necessário estudos direcionados com essa técnica

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

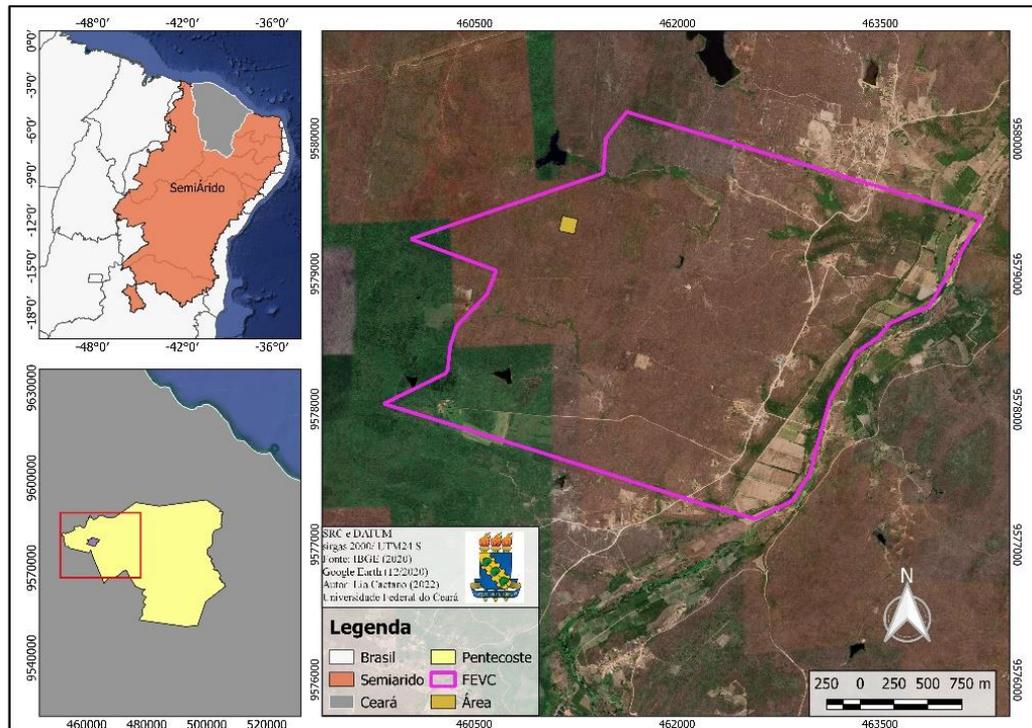
A parte metodológica do estudo divide-se em dois segmentos, primeiramente na obtenção dos dados para o estudo da dinâmica de raízes correlacionado com a dinâmica do carbono no solo da Caatinga, e em seguida no estudo da estimativa de biomassa a partir de métodos indiretos, como a espectroscopia de reflectância e relações alométricas.

### **5.1 Dinâmica da biomassa radicular e do carbono na Caatinga**

#### *5.1.1. Descrição da área estudada, experimento e obtenção dos dados de biomassa*

O estudo faz parte de um projeto em andamento em FTSS, com início em 2015, a partir da instalação dos núcleos de crescimento interno na área de estudo, localizada na Fazenda Experimental Vale do Curu – FEVC, no município de Pentecoste-CE (Figura 4), pelo grupo de pesquisa e extensão de Manejo de Água e Solo no Semiárido – MASSA, da Universidade Federal do Ceará.

**Figura 4** – Localização da área de estudo situada na Fazenda Experimental Vale do Curu – FEVC, no município de Pentecoste-CE



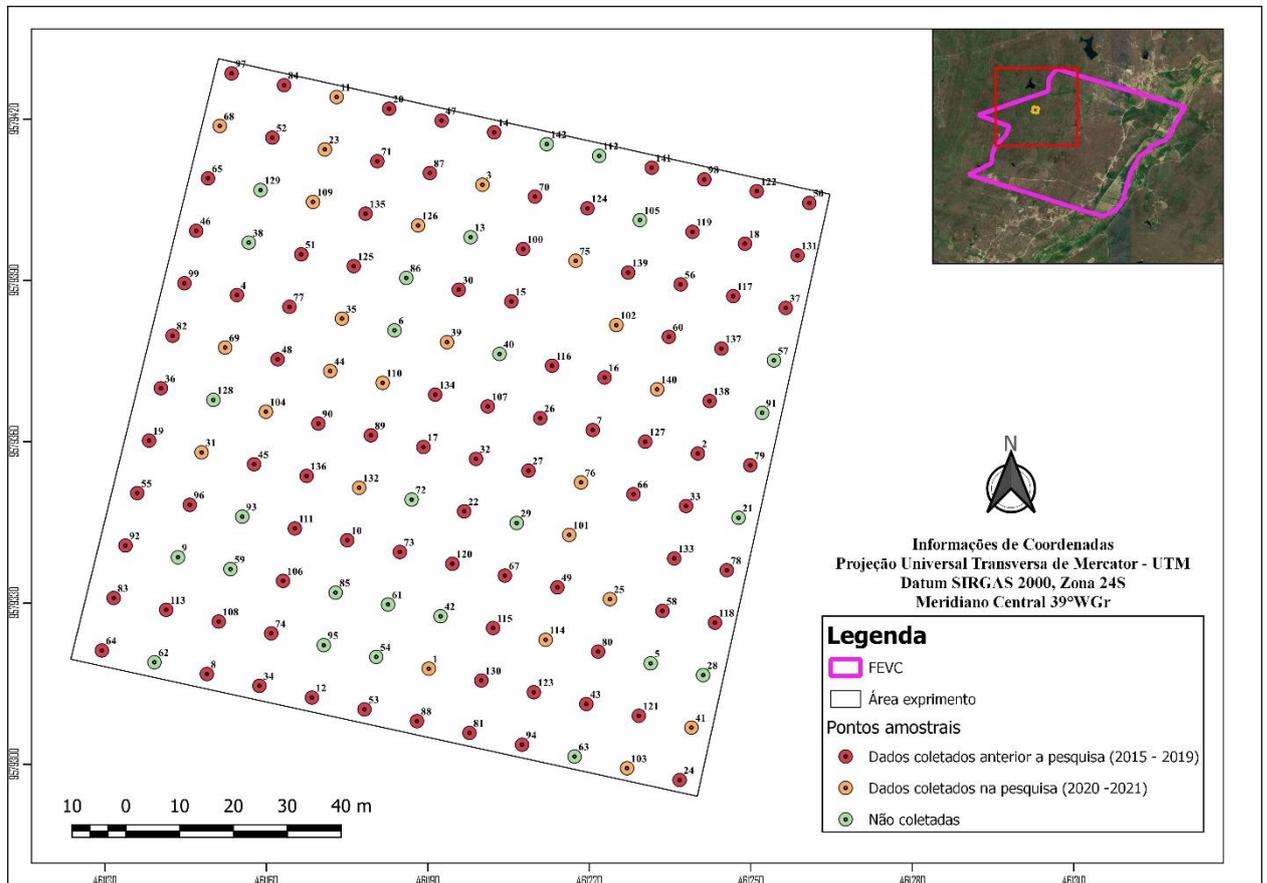
Fonte: Autor

A área de estudo pertence a uma região caracterizada em termos climáticos, como semiárido quente e seco com chuvas de verão-outono, e temperaturas médias mensais superiores a 18 °C. Com base nos dados coletados na estação meteorológica da FEVC, para o período de 1970-2021, a precipitação pluviométrica média anual é de 817,7 mm, e a temperatura média anual é de 27,3 °C. Segundo Feitosa (2017), a classe de solos dominante na área de estudo são os Luvisolos Háplicos. Com relação as características florísticas, na área prevalece a existência de 18 espécies, sendo os indivíduos dominantes pertence às espécies *Sebastiania macrocarpa* Müll. Arg., *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud., *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke, *Croton blanchetianus* Baill. e *Poincianella bracteosa* (Tul.) L. P.

O Estudo em questão avaliou 24 pontos de uma malha de monitoramento de 144 pontos instalada em uma área experimental de 1,44 hectares desde de 2015. Considerando-se o estudo como de longa duração, tendo seu início já citado em 2015, os dados iniciais e os resultados dos primeiros anos de pesquisa (2015-2018) foram citados no estudo de SILVA (2019).

Assim, nessa pesquisa serão abordados principalmente os dados para os anos de 2020 e 2021, citando os dados anos anteriores a fim de fazer uma panorâmica do comportamento da biomassa radicular na Caatinga. Vale ressaltar ainda com relação ao ano de 2019, que são dados inéditos coletados anteriormente a pesquisa atual, porém que não forma citados no estudo de SILVA (2019), e por isso também serão utilizados para essa panorâmica. A espacialização dos pontos amostrais na área experimental, bem como os período de coletada pesquisa atual e do período que compreendeu de 2015-2019 estão expressos na Figura 5.

**Figura 5** - Área experimental com os pontos amostrais classificados pelo período de coleta, na Fazenda Experimental Vale do Curu – FEVC, no município de Pentecoste-CE



Fonte: Autor

A metodologia empregada para a coleta dessa biomassa radicular foi a núcleo de crescimento interno - (ingrowth core), descrito por Persson (1980, 1983) que consiste em uma sacola de malha preenchida com solo livre de raízes, que permite as raízes crescerem para dentro, e são então coletados após um período determinado. Esse período determinado para o estudo em questão, foi alinhado com o período sazonal de precipitação regional, ou seja, as coletas acontecem em intervalos de 4 meses sendo realizadas uma no período chuvoso, outra no período intermediário entre chuvoso e seco, e por fim, uma no período seco, a cada período 6 pontos amostrais.

A malha utilizada para aplicação do método foi construída em formato cilíndrico com malha de polietileno de alta densidade, abertura da malha de  $\sim 1,0$  cm, com dimensões de 14 cm de diâmetro x 30 cm de profundidade (Figura 6).

**Figura 6** - Malha junto com solo utilizada na aplicação do método ingrowth core.



Fonte: Autor

E na Tabela 1 estão apresentadas as especificações dos pontos amostrais e suas respectivas coordenadas e períodos, coletados no período da atual pesquisa. As coletas referentes ao período chuvoso e intermediário de 2020 ficaram impossibilitadas de serem feitas, pois o período abrangeu o início e pico da epidemia do vírus Covid-19, e, portanto, tornou-se inviável o procedimento de pesquisa, impossibilitados de acontecerem conforme os decretos estaduais que tornava suspensas quaisquer atividades educacionais presenciais em todas as escolas, universidades e faculdades das redes de ensino pública.

**Tabela 1** - Especificações dos pontos coletados na condução da pesquisa de 2020-2021

Amostra	Longitude (X)	Latitude (Y)	Período de coleta
103	461230,338	9579301,410	Nov/2020
110	461184,232	9579369,040	
104	461156,477	9579361,180	
41	461245,766	9579315,896	
35	461173,014	9579378,541	
25	461223,442	9579331,473	
1	461192,913	9579317,202	Maio/2021
114	461214,674	9579322,958	
132	461180,240	9579354,668	
3	461201,204	9579407,293	
126	461190,993	9579397,782	
39	461194,996	9579383,525	
68	461153,233	9579419,653	Jul/2021
102	461232,523	9579388,624	
23	461172,779	9579410,487	
75	461224,526	9579395,475	
11	461173,218	9579421,319	
109	461170,230	9579398,216	

140	461236,302	9579378,899	Nov/2021
69	461148,923	9579369,136	
101	461220,548	9579348,495	
76	461216,326	9579354,351	
31	461146,709	9579354,323	
44	461172,130	9579367,598	

Fonte: Autor.

No processo de coleta as amostras foram determinadas por ordem de sorteio. Ao adentrar na área elas eram localizadas e identificadas (Figura 7a-b), com placas de identificação e pelas malhas expostas superficialmente, que em seguida eram removidas do orifício e alocadas em sacos plásticos (Figura 7c-d). Após alocadas as amostras foram encaminhadas para a etapa de processamento.

Na fase de processamento, as amostras foram alocadas para laboratório para o procedimento de lavagem das raízes, com a remoção de todo solo, e de resíduos presentes com o auxílio de uma pinça para remove-los (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013), evitando assim, possíveis interferências no peso das raízes. Assim, cada núcleo teve sua malha separado em três partes de profundidade igual a 10 cm (Figura 7e), para a obtenção da biomassa nos primeiros 30 cm de profundidade. Após separação seguiu-se para etapa de lavagem e secagem ao ar das raízes (Figura 7f); uma vez secas, as raízes de cada profundidade foram separadas por diâmetro, em maiores de 2mm (raízes grossas) e menores de 2 mm (raízes finas) com o auxílio de peneiras, para então serem obtidos em balanças de precisão de 0,001g, o peso de cada amostra com suas respectivas profundidades e diâmetros.

**Figura 5** - Etapas de coletas, processamento e obtenção da biomassa radicular



Fonte: Autor

### 5.1.2. Obtenção dos parâmetros radicular pelo analisador de raízes – WinRHIZO

Os principais parâmetros morfológicos radiculares como comprimento total de raízes (cm), diâmetro médio (mm) e volume de raízes (cm<sup>3</sup>) foram obtidos a fim de avaliar a caracterização da dinâmica da biomassa na FTSS e ainda correlacioná-los com a Matéria Orgânica do solo.

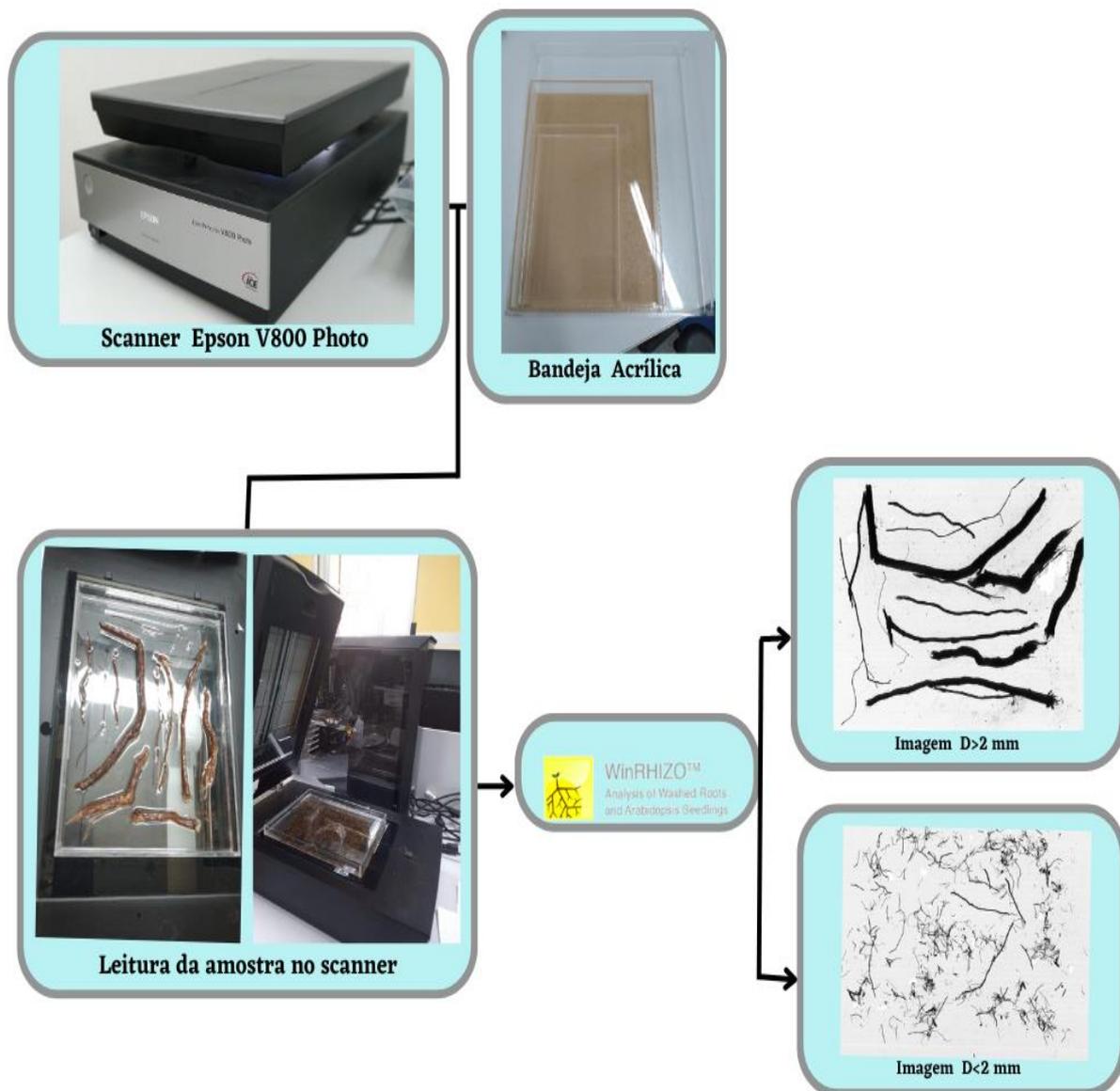
A análise foi realizada no laboratório de Geoprocessamento, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias do Ceará com o scanner de raízes da marca Epson, modelo Perfection V800 Phot associado ao software WinRHIZO.

As amostras de raízes foram analisadas em função da profundidade e por diâmetro, e devido algumas apresentarem considerável quantidade de material houve separação do material e obtenção de imagens em mais de um escaneamento, buscando evitar sobreposição de raízes e a redução na precisão da análise.

As etapas para a análise seguiam o seguinte processo, conforme pode ser visualizado na Figura 8, o material era disposto em uma bandeja acrílica transparente de

dimensão 20 x 25 cm, e em seguida posto acoplado no scanner para a obtenção da imagem. Os parâmetros de aquisição foram: prioridade em velocidade (speed priority), imagens do tipo tons de cinza (grey levels), resolução média (400 dpi) e sistema de posicionamento via bandeja (tray) de 20 cm (MAYER et al., 2018). Com a imagem gerada e salva no formato TIF, o software analisa a imagem determinando os parâmetros morfológicos, trazendo um arquivo de saída no formato TXT. Esse arquivo foi importado para a extensão do sistema WinRHIZO (XLRHIZO), convertendo o arquivo em TXT para planilha

**Figura 6** - Fluxograma da análise nas raízes pelo scanner e software WinRHIZO.



### *5.1.3 Quantificação da Matéria Orgânica do Solo*

#### *5.1.3.1 Obtenção e processamento das amostras de solo*

As amostras de solos foram coletadas simultaneamente com as amostras de biomassa radicular. Próximos aos pontos no qual, coletou-se a malha cilíndrica contendo as raízes, também se coletou o solo em amostras deformadas, acondicionadas em seguida por sacos plásticos e direcionadas para o processo de preparação das amostras para análise de laboratório.

Para a realização dessa preparação, seguiu-se três etapas: i) Cada amostra foi submetida ao método Terra Fina Seca ao Ar (TFSA); ii) em seguida a secagem prévia em estufa a 105°C no período mínimo de 24 horas, visando eliminar toda a água presente; e por fim, iii) foram maceradas em almofariz de porcelana.

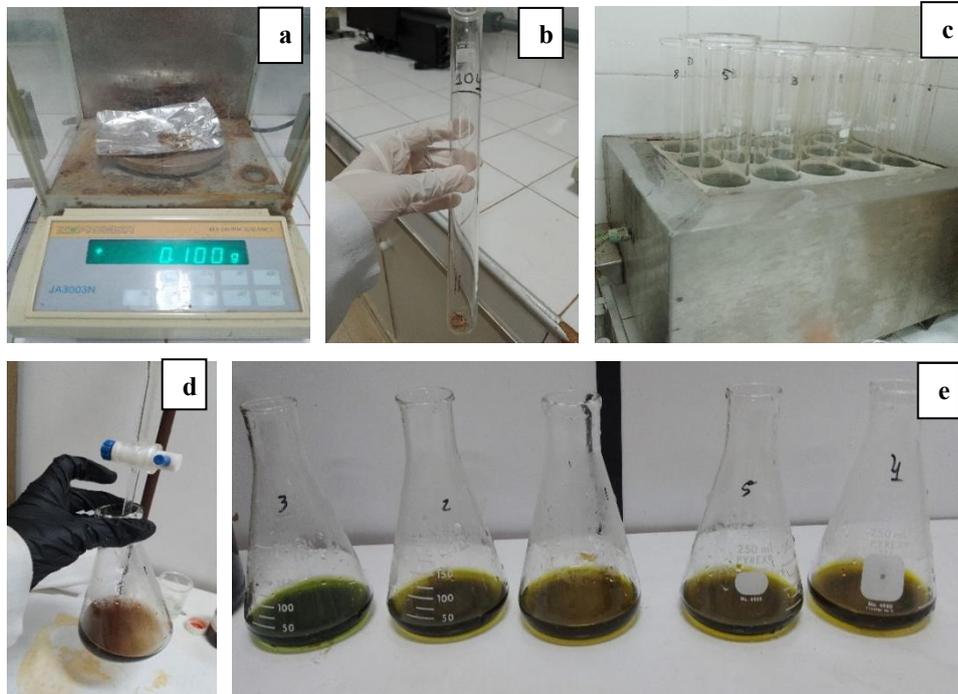
#### *5.1.3.2 Análise do Carbono Orgânico Total (COT) do solo*

A quantificação do Carbono Orgânico Total (COT), foi realizada no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará-UFC, sendo feita através do procedimento de oxidação por via úmida (YEOMANS; BREMNER, 1988), conforme adaptação descrita por Mendonça e Matos (2005).

As amostras foram primeiramente pesadas em balança de precisão em torno 0,100 g e colocadas para a digestão em tubo de ensaio em dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) e ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) [98%]. O uso do dicromato em meio ácido é responsável por oxidar em torno de 77% do carbono na amostra, portanto, para maximizar o processo e assegurar que aproximadamente 100% do carbono total seja digerido, foi utilizado um bloco digestor como fonte externa de calor para acelerar a reação de oxidação, onde as amostras ficaram por um período de 30 minutos (Figura 9).

Com o fim do período de aquecimento, a fase que seguiu-se foi a de titulação com sulfato ferroso amoniacal ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ), que reage com o excedente do dicromato que não foi consumido na combustão. O volume titulado era obtido a cada ponto de virada da reação, identificado a partir da mudança de coloração de verde para castanho-avermelhado.

**Figura 7** - Etapas da análise de Carbono Total no Solo (COT) e nas raízes da FTSS, localizada na Fazenda Experimental Vale do Curu – FEVC, no município de Pentecoste-CE



Fonte: Autor.

O teor de carbono orgânico do solo foi calculado com base no volume da solução gasto na titulação da amostra ( $V_{am}$ ), do branco aquecido ( $V_{ba}$ ) e do branco não aquecido ( $V_{bn}$ ), conforme as equações (1) e (2):

$$A = \left[ \frac{(V_{ba} - V_{am})(V_{bn} - V_{ba})}{V_{bn}} \right] + (V_{ba} - V_{am}) \quad (1)$$

Onde,  $V_{ba}$  = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento;  $V_{bn}$  = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento;  $V_{am}$  = Volume gasto na titulação da amostra.

$$CTO \text{ (dag. kg)} = \frac{(A)(\text{molaridade do Sulf. Ferroso})(3)(100)}{\text{peso da amostra (mg)}} \quad (2)$$

Comumente utiliza-se o carbono orgânico para estimar o teor de matéria orgânica do solo por meio de sua multiplicação por um fator, baseando-se na premissa que a matéria orgânica possui 58% de carbono orgânico, o fator 1,724 vem sendo utilizado para esta conversão (Embrapa, 2003). No entanto, a fim de obter um dado não vinculado a outro, utilizou-se o método via seca, na determinar o teor de matéria orgânica. A metodologia aplicada foi pela Murfla seguindo-se o método estabelecido por Goldin (1987), e modificado por Carmo & Silva (2012).

Previamente os cadinhos foram submetidos a secagem para a remoção de toda umidade, para que posteriormente com as amostras, serem acondicionados em forno do tipo mufla e incinerados em uma temperatura de 550 °C, por 3 h. Após esse período, o conjunto (cadinho+resíduos) foi acondicionado em dessecador e, em seguida, pesado. O teor de matéria orgânica foi determinado em razão da perda de massa do resíduo incinerado, considerando-se o material perdido pela queima no intervalo de variação da temperatura de 105 °C a 550 °C. Conforme a equação (3):

$$MO(\%) = \frac{P-(T-C)}{P} \times 100 \quad (3)$$

Onde, P = peso da amostra (g) depois de aquecida a 105 °C; C = tara do cadinho (g); e T = peso da cinza + cadinho (g).

#### *5.1.4 Obtenção de dados de precipitação*

Os dados referentes a precipitação diária da região de estudo foram obtidos na estação meteorológica da FEVC da UFC durante todo o período de investigação para avaliação da influência da condição climática teve no comportamento de biomassa Inter e intranual na Caatinga e essa na dinâmica do Carbono na Caatinga. Sendo avaliado Precipitação mensal e Precipitação Acumulada de 3 meses (PA3m) nos períodos avaliados.

### 5.1.5 Análise Estatística

As análises estatísticas foram feitas com o auxílio do software IBM SPSS Statistics® e RStudio, e os gráficos foram feitos no software Microsoft Excel® 365. Todos os dados foram analisados inicialmente quanto ao comportamento descritivo e a Normalidade (Shapiro Wilk,  $p < 0,05$ ).

Com relação aos dados de biomassa, com a constatação da não normalidade dos dados procedeu-se o teste de Kruskal-Wallis para comparação dos períodos. Para os dados de parâmetros morfológicos, carbono orgânico do solo e das raízes e matéria orgânica foi aplicado a análise de variância (ANOVA), para a constatação da significância entre os períodos avaliados.

Todas as variáveis ainda foram analisadas segundo coeficiente de correlação de Spearman  $p < 0,05$  e a Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais. A análise agrupa os indivíduos de acordo com sua variação em outras palavras, a técnica irá agrupar os indivíduos em uma população segundo a variação de suas características (HONGYU *et al*, 2015).

## 5.2 Estimativa da biomassa por métodos indiretos

### 5.2.1 Estimativa com os dados hiperespectrais

Para a construção do modelo de estimativa de biomassa radicular a partir dos dados hiperespectral seguiu-se as seguintes etapas metodológicas e de análise dos dados: i) Processamento e preparação das amostras de raízes; ii) Aquisição dos dados Hiperespectrais; iii) Tratamento dos dados, análise descritiva e de correlação dos dados; v) Seleção das variáveis preditivas e Construção do modelo de predição da biomassa.

#### (i) Processamento e preparação das amostras

As amostras de raízes foram previamente preparadas e processadas para as leituras e coleta dos dados hiperespectral. Essa preparação consistiu na secagem do material em estufa

a 65 °C por 24 horas, em seguida cada amostra passou por um processo de moagem, para padronização e uniformidade das amostras de raízes para análise espectral.

Dado o conjunto de dados coletados no período de nov-20 à nov-21 ter sido testado com insuficiente para a construção do modelo de predição, alguns dados referentes a coletas anteriores (2019) e posteriores (2022) ao período avaliado foram inseridas no conjunto de dados. A partir disso totalizou-se 48 amostras de raízes que foram processadas para as leituras espectrais

### *(ii) Aquisição dos dados hiperespectrais*

A obtenção dos dados hiperespectrais foi realizada no laboratório de Geoprocessamento pertencente a Universidade Federal do Ceará, no Departamento de Engenharia Agrícola. No qual, cada amostra era acondicionada em um recipiente de polipropileno preto, com 5 cm de diâmetro e 15 mm de altura para a realização das leituras (Figura 8), sendo que foram realizadas três leituras por amostras em posições superficiais diferente, obtendo por amostra a média dessas leituras.

**Figura 8** - Amostras de biomassa radicular processadas e acondicionadas no recipiente polipropileno para as leituras no espectrorradiômetro.

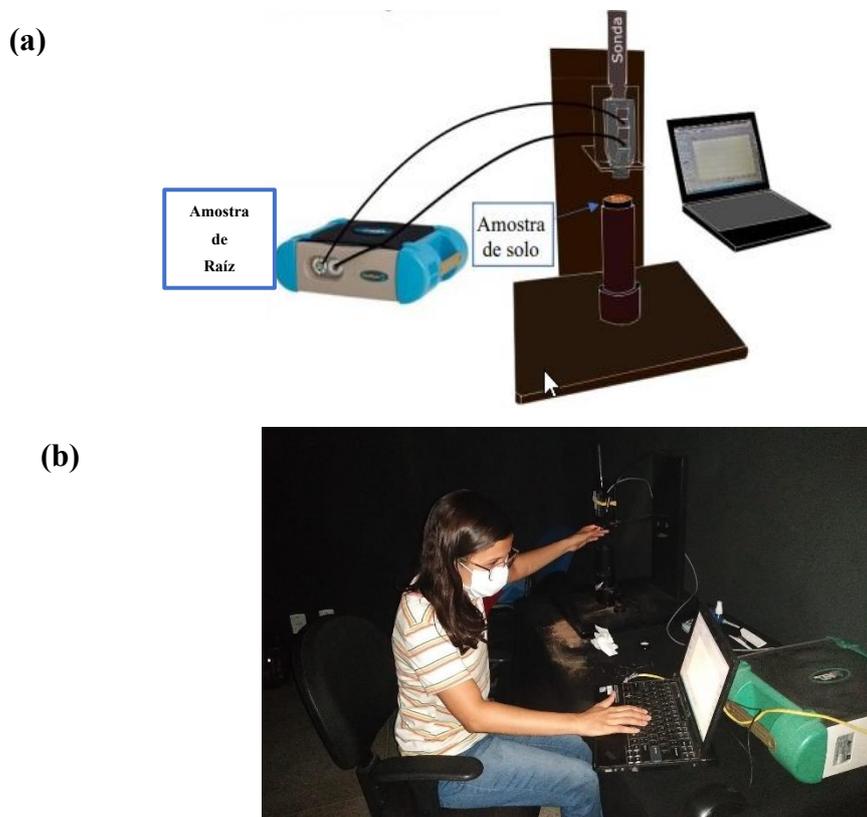


Fonte: Autor

O equipamento utilizado na aquisição desses dados foi espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR 3 (350 – 2500 nm), acoplado à uma sonda de contato (Hi-Brite Contact Probe),

colocados em sala escura para a realização das leituras (Figura 9) (RIBEIRO, 2021; ALMEIDA, 2020). A calibração do sensor foi feita com a placa spectralon, padrão branca de 100% de reflectância, usada para padronização do equipamento para a reflectância. Com aquisição de dados completa, os valores espectrais em Número Digital (ND) das amostras de raízes obtidos, foram convertidos em fator de reflectância, por meio do software ViewSpecPro 6.2

**Figura 9** - Aquisição de dados hiperespectrais: (a) geometria de aquisição dos dados; (b) coleta dos dados.



Fonte: a) Almeida, E.L. (2020); b) Autor

### *(iii) Tratamento dos dados, análise descritiva e de correlação de Pearson*

Com a etapa de aquisição de dados finalizada, a primeira fase de análise dos dados espectrais para construção do modelo de estimativa da biomassa radicular, consistiu em avaliar os dados brutos e submetidos a transformação matemática da Derivada de primeira ordem, por

intermédio do software Unscrambler® (CAMOAS, 2021) para detecção do conjunto de dados mais viável para a construção do modelo.

A derivada elevada a primeira potência consiste em realçar oscilações entre comprimentos de onda consecutivos, além de remover ruídos que possam ser interpretados como sinal (RUDORFF, NOVO, GALVÃO, 2006; ALMEIDA, 2020; RIBEIRO, 2021). A primeira derivada de uma curva espectral pode ser obtida pela equação (4):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda} \quad (4)$$

Onde,  $\Delta\lambda$  representa a separação entre bandas adjacentes;  $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$ , para  $\lambda_j > \lambda_i$ , com o intervalo entre as bandas constante;  $\rho(\lambda_n)$  é o valor do espectro na faixa de comprimento de onda  $\lambda_n$ .

Essa avaliação compreendeu qualitativamente a análise do comportamento espectral e descritivo das curvas pela separação dos dados por período sazonal e por teor de biomassa, além disso foi aplicado a análise de correlação dos dados a fim de se entender o sentido e intensidade da relação linear entre as variáveis de biomassa e dados espectrais. A análise de correlação foi realizada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson, descrito na equação (5):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (5)$$

Onde,  $r$  representa o coeficiente de correlação de Pearson;  $x_i$  e  $y_i$  são os valores medidos de ambas as variáveis (independentes e dependentes, respectivamente) para o  $i$ -ésimo indivíduo; e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  representam as médias aritméticas das respectivas variáveis  $X$  e  $Y$ .

O coeficiente de Pearson pode ser positivo ou negativo, no intervalo de  $-1 \leq r \leq 1$ , sendo a intensidade linear maior quanto mais próximo a  $[1]$  ou  $[-1]$  for o coeficiente (TOEBE et al., 2014). Assim esses valores foram avaliados e interpretados a partir de uma comparação

com os valores de classificação dos coeficientes propostos por HOPKINS (2000) e adaptada por MUKAKA (2012), conforme a Tabela 2.

**Tabela 2** - Interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson (r).

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0,0 a 0,3	Sem correlação
0,3 a 0,5	Fraca
0,5 a 0,7	Moderada
0,7 a 0,9	Forte
0,9 a 1,0	Muito forte

Fonte: Adaptado de Mukaka, M. M. (2012)

Já com relação a análise descritiva, utilizou-se a estatística clássica por intermédio do software IBM SPSS Statistics®, tendo sido calculadas a média, valores mínimo e máximo e desvio padrão. Foi efetuado ainda o teste de hipótese de normalidade, utilizando-se o Kolmogorov-Smirnova, teste K-S, a 5%.

*(iv) Seleção das variáveis preditivas e Construção do modelo de predição da biomassa*

Para a construção do modelo ainda foi realizado a seleção de variáveis para identificação dos comprimentos de onda mais significativos na predição da biomassa radicular, já que os dados espectrais obtidos entre 350 e 2500 nm é um conjunto de variáveis independente consideravelmente extenso. O método utilizado na seleção dessas variáveis foi Stepwise. Essa metodologia consiste no incremento (forward) das variáveis mais significativas ao modelo e na remoção (backward) daquelas que menos influenciam no comportamento das variáveis dependentes, a partir do teste F, até identificar um modelo de variáveis que apresenta melhor correlação com as variáveis químicas e menor soma do quadrado de resíduos (RIBEIRO, 2021).

A construção do modelo de predição da biomassa radicular foi realizada com o auxílio do software Unscrambler® (CAMO AS, 2021) em versão de teste, a partir da Regressão

dos Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) utilizando os dados brutos e transformados para derivada de primeira ordem com e sem seleção de variáveis significativas.

A Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) é um método estatístico primário que combina recursos de análise de componentes principais e regressão múltipla (CAMPELO, 2018). A técnica reduz a dimensionalidade dos dados a um conjunto menor de componentes não correlacionados e efetua a regressão de mínimos quadrados para essas componentes, ao invés dos dados originais (WOLD; SJOSTROM; ERIKSSON, 2001). O método de PLSR é bastante utilizado quando se deseja prever variáveis dependentes (Y) a partir de um conjunto com muitas variáveis independentes (X) (RIBEIRO, 2021).

A calibração do modelo foi realizada com todo conjunto de dados, contendo as 48 amostras. Contendo as 24 amostras do atual período de pesquisa, 12 amostras de 2019 e 12 amostras que foram coletadas posteriormente a pesquisa, em 2022. Com relação a validação, para o modelo foi aderida a validação cruzada realizada pelo próprio software no processo de construção do modelo, que foi testado por intermédio das seguintes métricas estatísticas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (equação 6), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ) (equação 7), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (equação 8) e a Razão da Performance do Desvio (RPD) (Equação 9).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_c - \hat{Y}_c)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_o - \hat{Y}_o)^2} \quad (6)$$

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{(N - 1)(1 - R^2)}{N - (k + 1)} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{N}} \quad (8)$$

$$RPD = \frac{\sigma_{Y_0}}{RMSE} \quad (9)$$

Onde,  $\hat{Y}_i$  representa os valores calculados pelos modelos na  $i$ -ésima observação;  $Y_i$  são os valores medidos ou observados em laboratório na  $i$ -ésima observação;  $\bar{Y}$  representa a média dos valores observados;  $N$  é o número de observações;  $k$  é o total de variáveis independentes; e  $\sigma$  é o desvio padrão para os valores medidos ou observados.

A interpretação do RPD para o modelo tem sido realizada a partir de três categorias avaliativas (Tabela 3), e utilizada por XU *et al.* (2016) e BELLON-MAUREL *et al.* (2010) na avaliação de modelos de estimativa de biomassa.

**Tabela 3** - Interpretação dos resultados de RPD para modelos de previsão.

<b>Categoria</b>	<b>Interpretação</b>
<b>(RPD &gt; 2,0)</b>	Modelo excelente
<b>(1,4 ≤ RPD ≤ 2,0)</b>	Modelo que necessita de ajustes
<b>(RPD &lt; 1,4)</b>	Modelo inapropriado

Fonte: BELLON-MAUREL *et al.* (2010)

### 5.2.2 Estimativa da biomassa por equações alométricas

A construção das equações que estimem a biomassa radicular por relações alométricas foi realizada com o auxílio do software R studio, a partir da Regressão Linear Múltipla (RLM), pelo método dos mínimos quadrados parciais utilizando-se do conjunto de dados morfológicos (Diâmetro Médio e Volume de Raízes) obtidos de cada amostra.

A RLM avalia a relação de uma variável de interesse  $Y$  (variável dependente ou variável resposta) em relação a  $k$  variáveis  $X_j$  (variável independente ou covariável), a partir de uma relação linear, descrita na Equação 10.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (10)$$

Onde,  $n$  é o número de indivíduos,  $y_i$  é a observação da variável dependente para o  $i$ -ésimo indivíduo,  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$  é um vetor de observações das variáveis independentes

para o  $i$ -ésimo indivíduo,  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$  é um vetor de coeficientes de regressão (parâmetros) e  $\epsilon_i$  é um componente de erro aleatório.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Dinâmica da Biomassa Radicular e do Carbono em uma FTS-Caatinga.

#### 6.1.1. Avaliação da Dinâmica da Biomassa Radicular na FTSS – Caatinga entre períodos sazonais.

Na Tabela 4, está exposta a análise descritiva dos dados de Biomassa Total (BIOT), Biomassa de raízes  $\leq 2$  mm de diâmetro (BIO 1), Biomassa de raízes  $> 2$  mm de diâmetro (BIO 2) obtidos no período de estudo. Os dados de todas as amostras e por período estão expressos no Apêndice A.

**Tabela 4** - Estatística geral dos dados Biomassa radicular para o período de (Nov/20 – Nov/21)

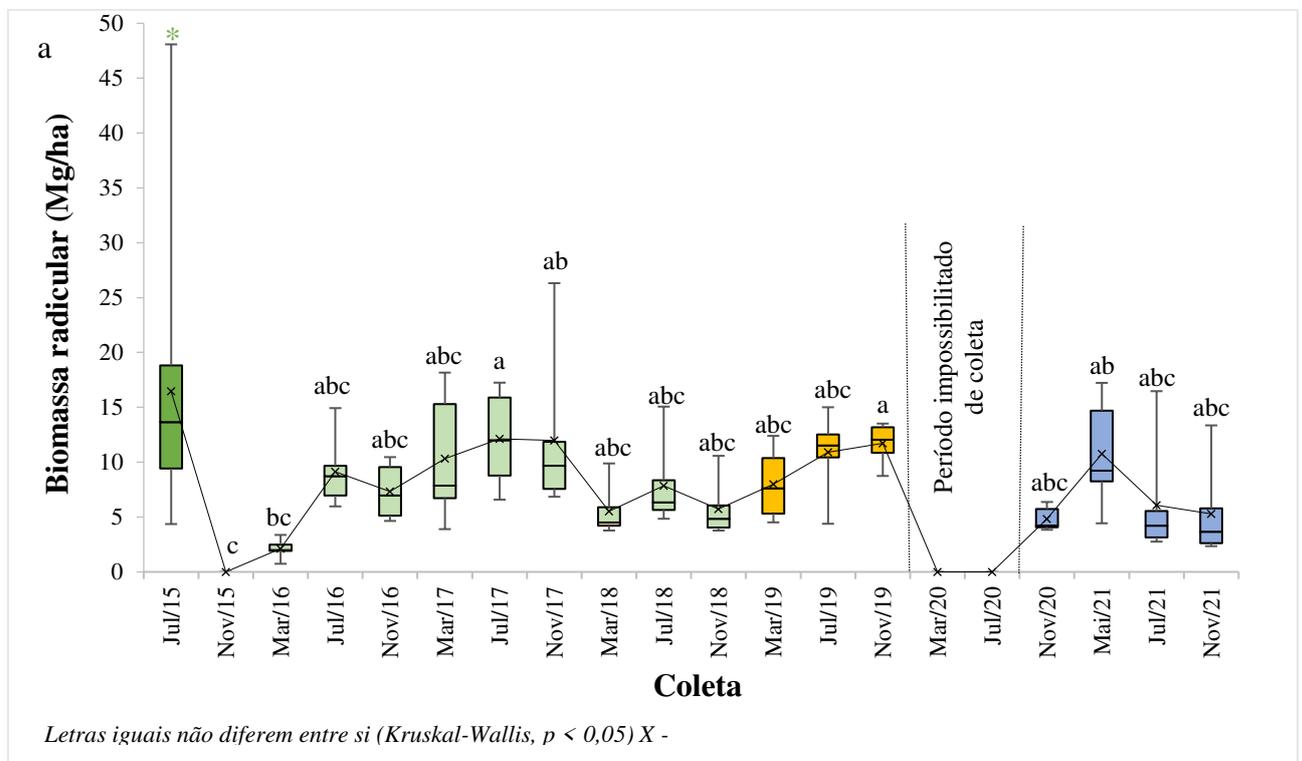
<b>Estatística Descritiva</b>	<b>BIOT (Mg/ha)</b>	<b>BIO1 (Mg/ha)</b>	<b>BIO2 (Mg/ha)</b>
Média	6,74	2,07	4,67
Erro Padrão da média	4,63	1,25	4,15
Mediana	4,91	1,85	3,17
Desvio padrão	4,63	1,25	4,15
Variância da amostra	21,42	1,55	17,25
Coefficiente de Variação - CV	0,69	0,60	0,89
Curtose	0,69	1,42	1,56
Mínimo	2,35	0,49	1,22
Máximo	17,23	5,68	14,81
Amplitude	14,88	5,19	13,59
Coef. de Assimetria de Pearson	1,19	0,52	1,09
Shapiro Wilk (p-value)	<0,01	0,2	<0,01

\*Biomassa  $\leq 2$ mm (BIO 1), Biomassa  $> 2$  mm (BIO 2), Biomassa Total (BIOT).

Fonte: Autor

A valor de Biomassa Radicular Total na Caatinga para o período de 1 ano avaliado (Nov/20 – Nov/21) variou entre de 17,23 Mg/ha e 2,35 Mg/ha, tendo valor médio de 6,74 Mg/ha de biomassa para esse período. Sendo os valores máximos de biomassa para amostras encontradas no período de coleta considerado chuvoso (Mai/2021), e os valores de menor biomassa nos períodos de coletas considerados seco (Nov/20 e Nov/21) (Figura 10).

**Figura 10** - Box plot da Avaliação temporal da dinâmica relacionada a biomassa radicular Total; a testemunha (jul/15); Períodos iniciais da pesquisa referentes a 2015-2018 (cor verde), coletas referentes a 2019 (cor laranja) e o período de 2020-2021 (cor azul).



Fonte: Autor

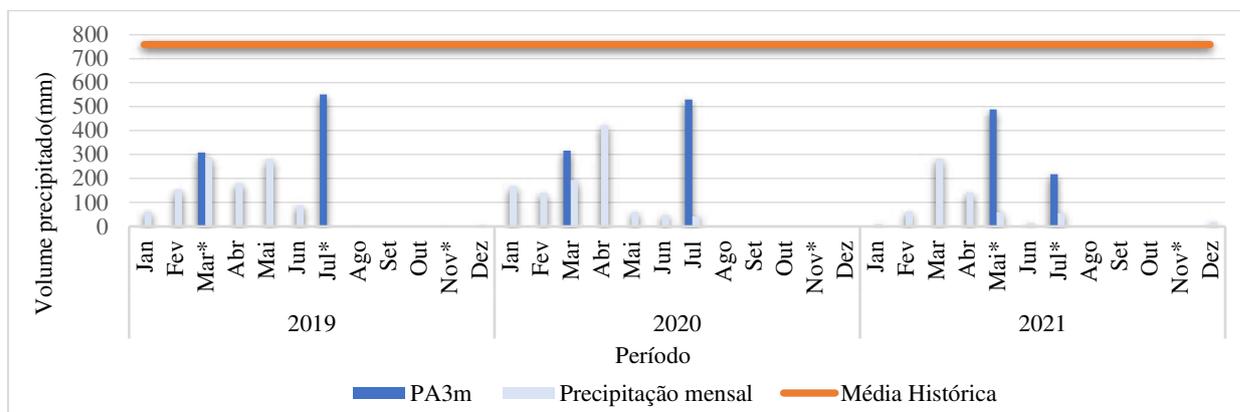
Essa dinâmica de acréscimo e redução de biomassa entre período chuvoso e seco tem sido verificado desde o início do estudo (Jul/2015), sendo também encontrada por outros trabalhos em FTSS que identificaram uma redução da biomassa na estação seca, principalmente das raízes finas (PEREIRA JÚNIOR et al., 2016; JANOS; SCOTT; BOWMAN, 2008). No qual, essa redução está associada como uma estratégia das raízes finas nesses ecossistemas para reduzir o gasto energético das plantas no período seco (PEREIRA JÚNIOR et al., 2016).

Até então conforme citado por SILVA (2019), para os períodos anteriormente verificados (Figura 10 pela coloração verde), essa dinâmica de acréscimo e redução de biomassa entre os períodos de coleta sazonal na FTSS, vinha seguindo uma conformação de V invertido, havendo uma fase sempre de incremento na biomassa (mar-jul), seguida de uma redução (jul-nov), porém essa conformação não se seguiu para dois períodos pontuais, apresentando como exceção a essa conformação jul-nov de 2019, que apresentou acréscimo de biomassa ao invés de decréscimo, e maio-jul de 2021 com decréscimo ao invés de acréscimo. Não sendo possível avaliar 2020, com relação essa conformação de dinâmica da biomassa dado as duas coletas perdidas no período considerado de pandemia da COVID-19 (Mar/20 e Jul/20).

Uma vez que a disponibilidade hídrica é apontada como um dos fatores governantes na dinâmica de desenvolvimento radicular nas FTSS (GREEN et al., 2005; JANOS; SCOTT; BOWMAN, 2008; PANDEY; SINGH, 1992), sendo essas florestas consideradas muito sensíveis às alterações no regime pluviométrico (ALLEN et al., 2017). Partindo desse pressuposto, essa peculiaridade na conformação de acréscimo e redução da biomassa no período de 2019 e 2021 estar associada as condições pluviométricas ocorrentes antes e durante o período citado.

E são essas condições pluviométricas justamente a quantidade de precipitação acumulada de pelos menos 3 meses anteriores ao período verificado, conforme pode ser observado na Figura 11, pois segundo SILVA (2019), na FTSS existe a necessidade de uma quantidade mínima de chuva (três meses) para as raízes responderem significativamente ao total precipitado.

**Figura 11** - Precipitação mensal e acumulada de 3 meses (PA3m) ao período de coleta para os anos de 2019, 2020 e 2021 medidas na FEVC, Pentecoste/CE.



Fonte: Autor

Portanto, os 550 mm acumulados até julho em 2019, verificados na ocorrência de eventos pluviométricos em abril (181,2 mm), maio (281,8 mm) e junho (87,8 mm), possibilitaram que ao invés de haver redução de biomassa no período jul-nov, houve-se um acréscimo de biomassa, já que a umidade que se conservou no solo, permitiu que a vegetação continuasse a investir na produção de raízes.

Para o período de 2021, observa-se que houve um pico de produção de biomassa ocasionado pela pluviometria acumulada de 487 mm em maio ocorrentes principalmente nos meses de março (281,8 mm) e abril (143 mm). Por outro lado, a redução pela metade de precipitação acumulada até junho, conseguiu ser percebida rapidamente pelo sistema florestal que reduziu em 43,59 % a proporção produtiva de biomassa de 10,76 Mg/há em maio para 6,07 Mg/ha em julho. Assim observou-se que o período de chuva acumulada até o período chuvoso de coleta (maio-21) superou a precipitação acumulada antecedente a coleta de julho, o que não acontecia em outros anos, onde a precipitação acumulada de julho sempre superava a da coleta do período chuvoso proporcionando sempre um aumento de biomassa (mar-jul), e não de redução, como nesse caso.

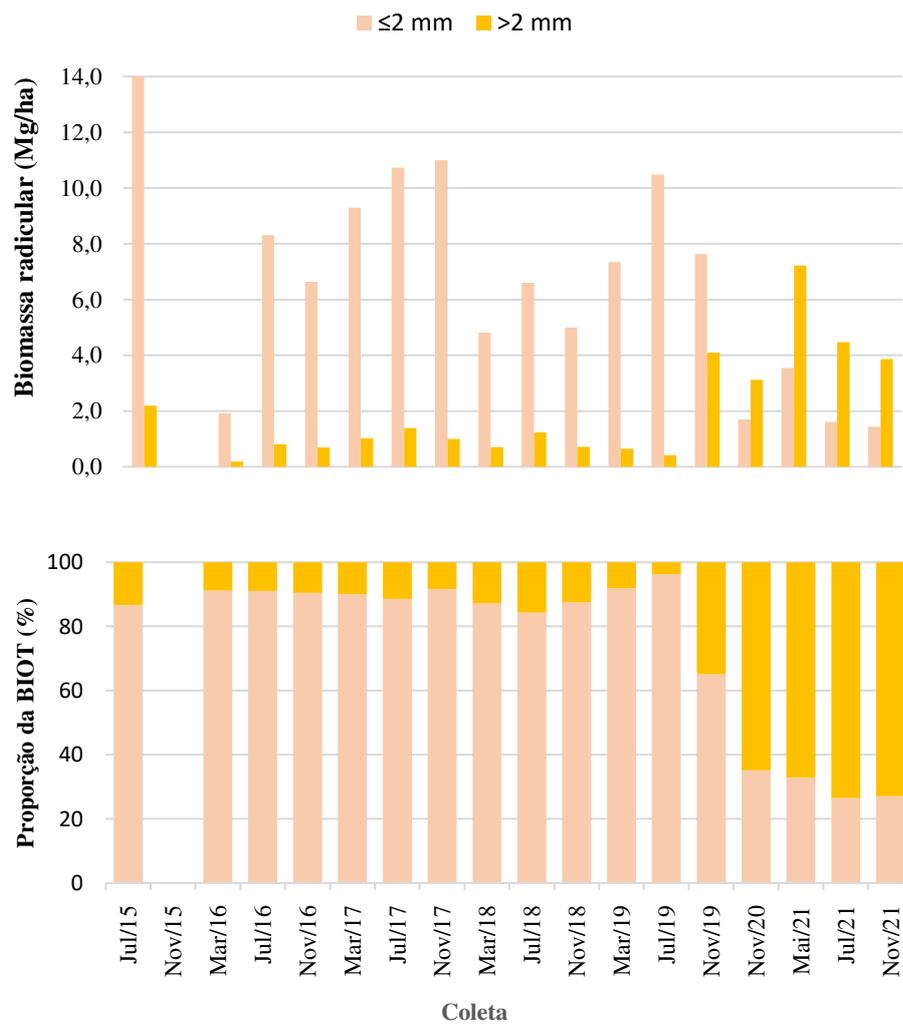
Reafirma-se assim, que as FTSS e seus sistema de produção radicular são extremamente sensíveis a alterações nas condições pluviométricas, e por isso tornam-se ambientes vulneráveis a qualquer mudança climática global que afete essa distribuição de chuvas em suas localidades.

Com relação a biomassa por diâmetro no período em questão (Nov/20-Nov/21) esses valores variaram entre 0,49 e 5,68 Mg/ha de biomassa radicular menor de 2 mm, e 1,22 e 14,81

Mg/ha para a biomassa maior de 2 mm de diâmetro, apresentando em média 2,07 e 4,67 Mg/ha respectivamente (Tabela 4). Mostrando, portanto, que em relação a produção total, o período avaliado, apresentou maior proporção de raízes grossas (de diâmetro superior a 2 mm), do que de raízes finas (diâmetro inferior a 2 mm).

Ao analisar todos os períodos de coleta até então do estudo, e levando em conta que o estudo de biomassa radicular deve ser realizado ao longo prazo, Figura 12, foi possível entender e justificar esse comportamento proporcional na BIOT de raízes maiores e menores de 2 mm, detectado no período avaliado em questão.

**Figura 12** - Comportamento temporal da Biomassa Total (BIOT) em relação a proporção de raízes maiores de 2 mm e menores de 2 mm.



Fonte: Autor

Observou-se que desde a implantação do experimento Jul-2015 até jul-2019, a proporção de BIO1 permaneceu prevalecendo em maior proporção na BIOT, com medidas superiores a 80%, porém esse comportamento começa a ser revertido a partir de nov-2019, onde a proporção de aproximadamente 4% em jul-2019 passa a 40% em nov-2019, e um ano após, a proporção de raízes maiores de 2 mm torna-se superior à de raízes menores de 2 mm, permanecendo assim, nos períodos seguintes. SILVA (2019), previu esse comportamento, quando destacou em seu estudo que em 2018 (em 3 anos de observação), houve a maior proporção de BIO 2, e evidenciando que o esperado era que a vegetação passasse a investir na recomposição do sistema de transporte de água e nutrientes (raízes grossas), já que até então como resposta ao estresse, causado pela instalação dos núcleos, a vegetação investiu rapidamente e de maneira abundante na produção de raízes finas, para que houvesse a compensação da injúria sofrida a essa vegetação. Logo, teria essa mudança de desenvolvimento nas raízes que permitem a sustentação da planta e distribuição da água e nutrientes absorvidos por raízes finas (GONÇALVES; MELLO, 2000).

Para concluir a análise descritiva dos dados de biomassa, os dados de BIOT e BIO2 foram considerados significativamente assimétricos segundo a análise de coeficiente de assimetria de Pearson (TOLEDO; OVALL, 1985), apresentando um valor superior a 1. Porém os dados de BIO1 dada a proximidade da mediana com a média apresentou uma distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos a zero. Os valores de coeficiente de variação encontrados para os valores das três classificações de biomassa foram considerados alto segundo a classificação proposta por Gomes (1976), com valores de  $CV > 30\%$ .

Esse resultado expressa uma heterogeneidade dos dados, recorrentes aos fatores de alta variabilidade espacial nas características do solo e vegetação (principalmente no que se diz respeito em composição de espécies e em estágio de desenvolvimento dessas plantas), ocasionado, portanto, diferentes dinâmicas radiculares. Essa heterogeneidade nos dados foi também demonstrada no estudo de SILVA (2019) e FEITOSA (2017). Apenas os dados de biomassa  $\leq 2\text{mm}$  apresentou distribuição normal. Além disso, a biomassa total coletada dos anos de 2019 a 2021 não apresentaram diferença estatística com a coleta testemunha de jul-2015.

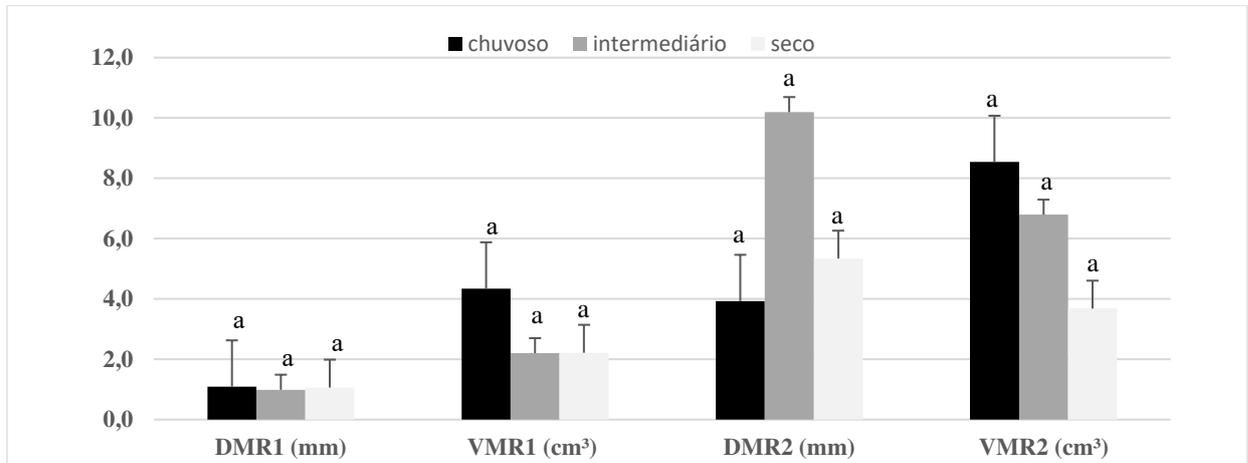
No geral verifica-se que a dinâmica de biomassa radicular é caracterizada por um padrão de incremento ou redução de biomassa radicular em relação ao período sazonal (seco-intermediário-chuvoso), havendo um acréscimo de biomassa do chuvoso para o intermediário e uma redução do intermediário para o chuvoso. Todavia, vale ressaltar que esses padrões de dinâmica radicular nesses ecossistemas estão muito sensíveis as condições pluviométricas ocorrentes, conforme verificado em 2019 e também 2021, e, portanto, alterações nessas condições entre os períodos seco-intermediário-chuvoso podem afetar esse padrão comportamental da dinâmica, mostrando assim como esses ecossistemas podem ser afetados em produção de biomassa radicular com as mudanças climáticas e suas consequências nessa região.

Por outro lado o estudo da dinâmica da biomassa radicular em uma FTSS não está concluído, faltando ainda 5 coletas entre período seco, intermediário e chuvoso, para a conclusão do estudo, ou seja, deve-se dar continuidades nas investigações sobre esse padrão comportamental da dinâmica radicular para uma real definição de como ela se defini em uma FTSS.

#### *6.1.2 Caracterização das amostras de biomassa maiores e menores de 2 mm pelo diâmetro médio, volume de raízes e comprimento de raízes (parâmetros radiculares).*

Os parâmetros radiculares diâmetro médio de raízes (DMR), e volume de raízes (VMR) foram avaliados sazonalmente para os períodos de coleta e seu comportamento em relação a biomassa  $\leq 2$  mm e  $> 2$  mm e estão expressos na Figura 13.

**Figura 13** - Análise quantitativa dos parâmetros Diâmetro médio e Volume de Raiz por período de coleta e por classificação de diâmetro radicular.



\* *DMR1* (Diâmetro de Raízes  $\leq 2$  mm); *VMR1* (Volume de Raízes  $\leq 2$  mm); *DMR2* (Diâmetro de Raízes  $> 2$  mm); *VMR2* (Volume de Raízes  $> 2$  mm). Letras iguais não diferem entre si (ANOVA)

Fonte: Autor

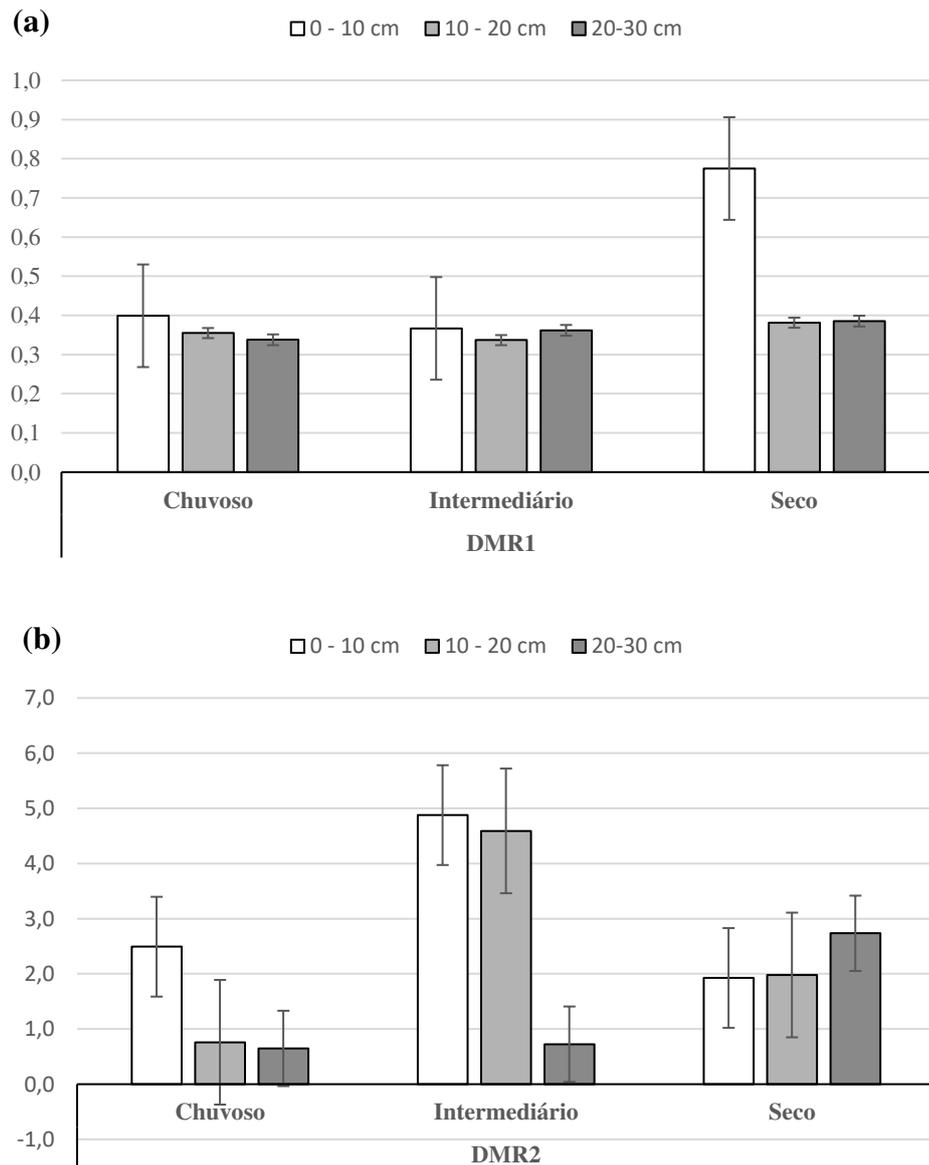
Observou-se que temporalmente para os períodos sazonais na FTSS, os parâmetros diâmetro médio e volume de raízes tanto na classificação de biomassa de raízes finas ( $\leq 2$  mm) como de raízes grossa ( $> 2$  mm) não apresentaram variação significativa para análise de variância (ANOVA)  $p < 0,05$ . Obtendo em média de diâmetro um valor de 1,09 mm no período chuvoso, 0,98 mm no intermediário e 1,06 mm no seco em relação as raízes finas, e as raízes grossas essas médias foi de 3,93 mm no chuvoso, 10,19 mm no intermediário e 5,34 no seco.

O parâmetro VMR1 essa média foi de 4,34 cm<sup>3</sup>, 2,2 cm<sup>3</sup> e 2,22 cm<sup>3</sup>, e o VMR2 foi 8,54 cm<sup>3</sup>, 6,79 cm<sup>3</sup> e 3,68 cm<sup>3</sup> respectivamente para os períodos chuvoso, intermediário e seco. No entanto, apesar da não haver diferença estatística entre períodos, é possível notar, uma tendencia comportamental diferenciada do parâmetro DMR2, sendo observado que há um destaque proporcional do diâmetro médio no período intermediário em relação ao outros períodos.

Ao tratar a análise do diâmetro médio em função da profundidade frente ao período sazonal (Figura 14), notou-se que o parâmetro DMR1 apresentou uma estabilização em relação a profundidade em todos os períodos. Já o DMR2 apresentou tendencia comportamental mais diferenciada em relação a profundidade e os períodos, onde é notado no período chuvoso e intermediário uma maior proporção diametral das raízes grossas concentrada nas duas primeiras

profundidades, invertendo esse comportamento no período seco, no qual, na profundidade 20-30 cm foi onde concentraram-se as raízes grossas com os maiores diâmetros.

**Figura 14** - Avaliação temporal do parâmetro diâmetro por profundidade para os períodos e entre a classificação.

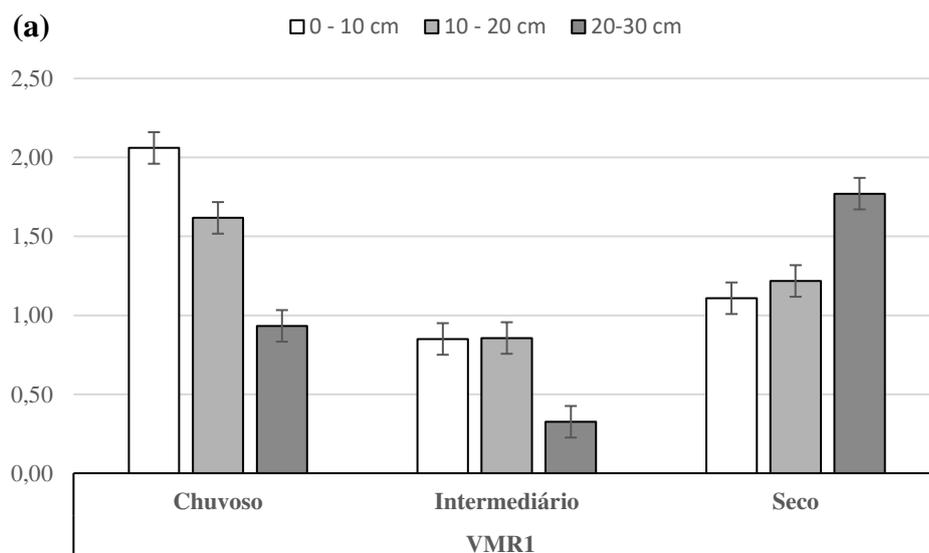


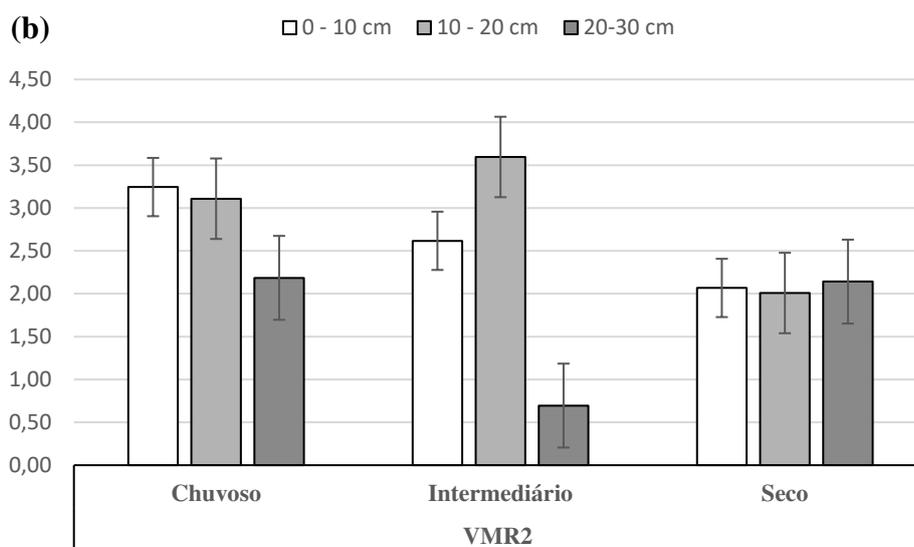
\* DMR1 (Diâmetro de Raízes  $\leq 2$  mm); DMR2 (Diâmetro de Raízes  $> 2$  mm); Fonte: Autora

Tal tendência temporal de comportamento da proporção diametral dessas raízes em relação a profundidade está relacionada o fator limitante água no solo, pois a medida que vai havendo a passagem do período chuvoso para o seco, e assim a redução de umidade nas camadas menos profundas, o sistema radicular começa a ser incentivado a aumentar a espessura diametral, uma vez que o estresse hídrico pode estar relacionado ao aumento da espessura da raiz ou da densidade do tecido radicular (NOORDWIJK; VAN DE GEIJN; 1996). Assim havendo o aumento dessa espessura há a permissão dessas raízes para ter maior capacidade de penetração no solo, o que melhora a dispersão nos solos com umidades baixas durante o período seco (ALMEIDA, 2016).

Em relação aos volumes (Figura 15), o VMR1 apresentou para o período chuvoso e intermediário sempre a tendência de que as raízes se concentram nas duas primeiras profundidades, diferenciando-se no seco, pois esse em questão houve mais volume de raízes na profundidade de 20-30 cm. O VMR2 para o período chuvoso, as raízes grossas concentraram-se nas duas primeiras profundidades, no intermediário a profundidade 10-20 cm destacou-se em volume de raízes grossas e o seco a diferenciação entre profundidades foi muito pequena.

**Figura 15** - Avaliação temporal do parâmetro volume por profundidade para os períodos e entre a classificação.





\*VMR1 (Volume de Raízes  $\leq 2$  mm; VMR2 (Volume de Raízes  $> 2$  mm).

Fonte: Autora

O parâmetro comprimento total de raízes (CMTR), ao ser obtido apresentou valores não reais para a realidade esperada dos dados de raízes em uma FTSS, conforme pode ser verificado na Tabela 5, com valores médios de 37634077 cm para raízes finas e 28267596,83 cm para raízes grossas no período chuvoso, 24183757 cm para as raízes finas e 19071331,67 para as grossas no período intermediário, e por fim, 28861739 cm para raízes finas e 14123168,17 cm para grossas no período seco.

**Tabela 5** - Apresentação dos resultados de comprimento total

Período	CMR1 (cm)	CMR1 (km)	CMR2 (cm)	CMR2 (km)
<b>Chuvoso</b>	37634077	376,341	28267596,83	282,68
<b>Intermediário</b>	24183757	241,838	19071331,67	190,71
<b>Seco</b>	28861739	288,617	21348553,92	213,49

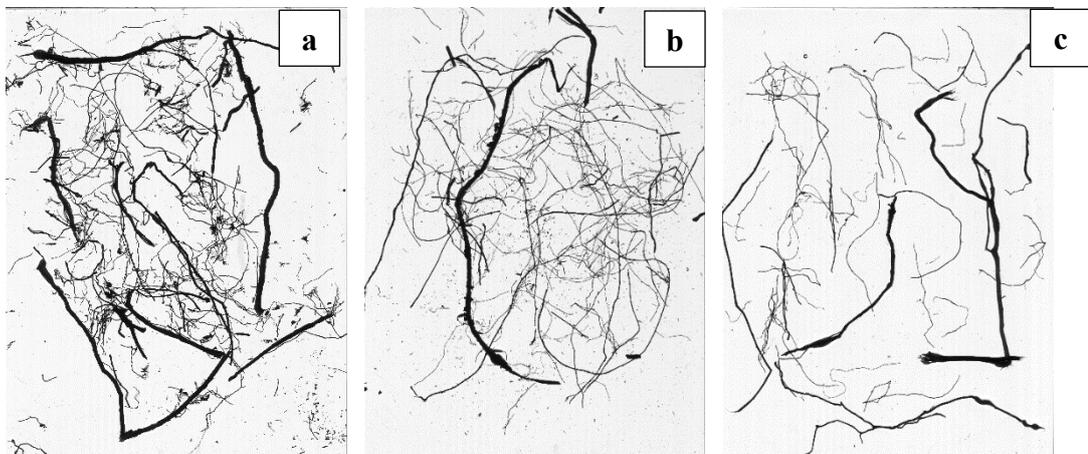
\*CMR1 (Comprimento de  $\leq 2$  mm); CMR2 (Comprimento de  $> 2$  mm). Fonte: Autor

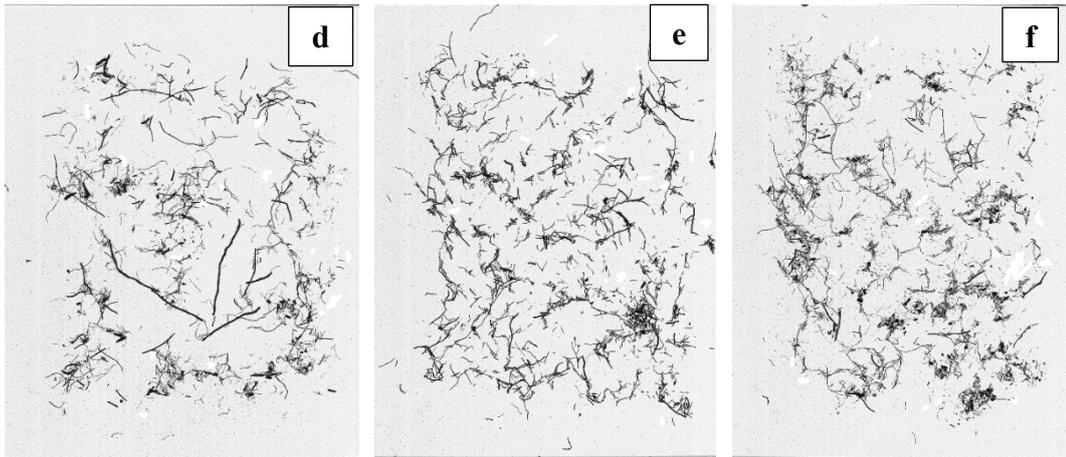
Esse erro na apresentação dos valores de comprimento total foi atrelado a uma possível falha de processamento do algoritmo no software ao analisar na imagem scaneada a biomassa radicular, quando ao classificar os pixels que são e que não raiz, havendo uma superestimação dos dados ao obter o comprimento total dessas raízes.

O motivo mais provável ao erro da estimativa está associado a quantidade de biomassa amostral ao ser analisada, como também algum tipo de resíduos presente nas amostras, conforme pode ser analisado pelas imagens obtidas para aquisição dos parâmetros, expresso na Figura 16 (Todas as imagens obtidas por amostra, diâmetro e profundidade estão expressos do Apêndice B). No qual, mesmo em algumas amostras havendo uma separação das leituras em várias etapas, uma sobreposição de material inevitavelmente ocorreu entre materiais, gerando assim, essa suposta confusão para classificar. Sendo, portanto, verificado uma necessidade ainda maior de avaliação mais individualizada dessas raízes por amostra para haver precisão dos dados de comprimento total.

Além disso, é preciso maiores investigações com respeito aos métodos de classificação, precisão e acurácia utilizada no software para definir os parâmetros em relação as imagens, pois, uma individualização muito grande das raízes para a análise dependendo da quantidade de material pode ser considerado inviável.

**Figura 16** - Avaliação das imagens obtidas do scanner na aquisição do parâmetro para biomassa >2 mm (a-c) e (d-f) menor de 2 mm.





Fonte: Autor

### *6.1.3 Dinâmica do Carbono Orgânico Total no Solo (COTs) e a sua relação com a Biomassa Radicular na FTS-Caatinga*

Os teores de COTs no período avaliado (nov/20 a nov-21) na FTSS do estudo variaram em média de 27,8 g/kg à 77 g/kg no solo, apresentando uma média de 51,96 g/kg de C no solo, em relação a Matéria Orgânica (MO) expressou uma variação de 1,95% a 33% no solo. O Carbono nas raízes (COTr) apresentou média de 366,04 g/kg variando em valores de 281,78 g/kg e 393,18 g/kg (Tabela 6).

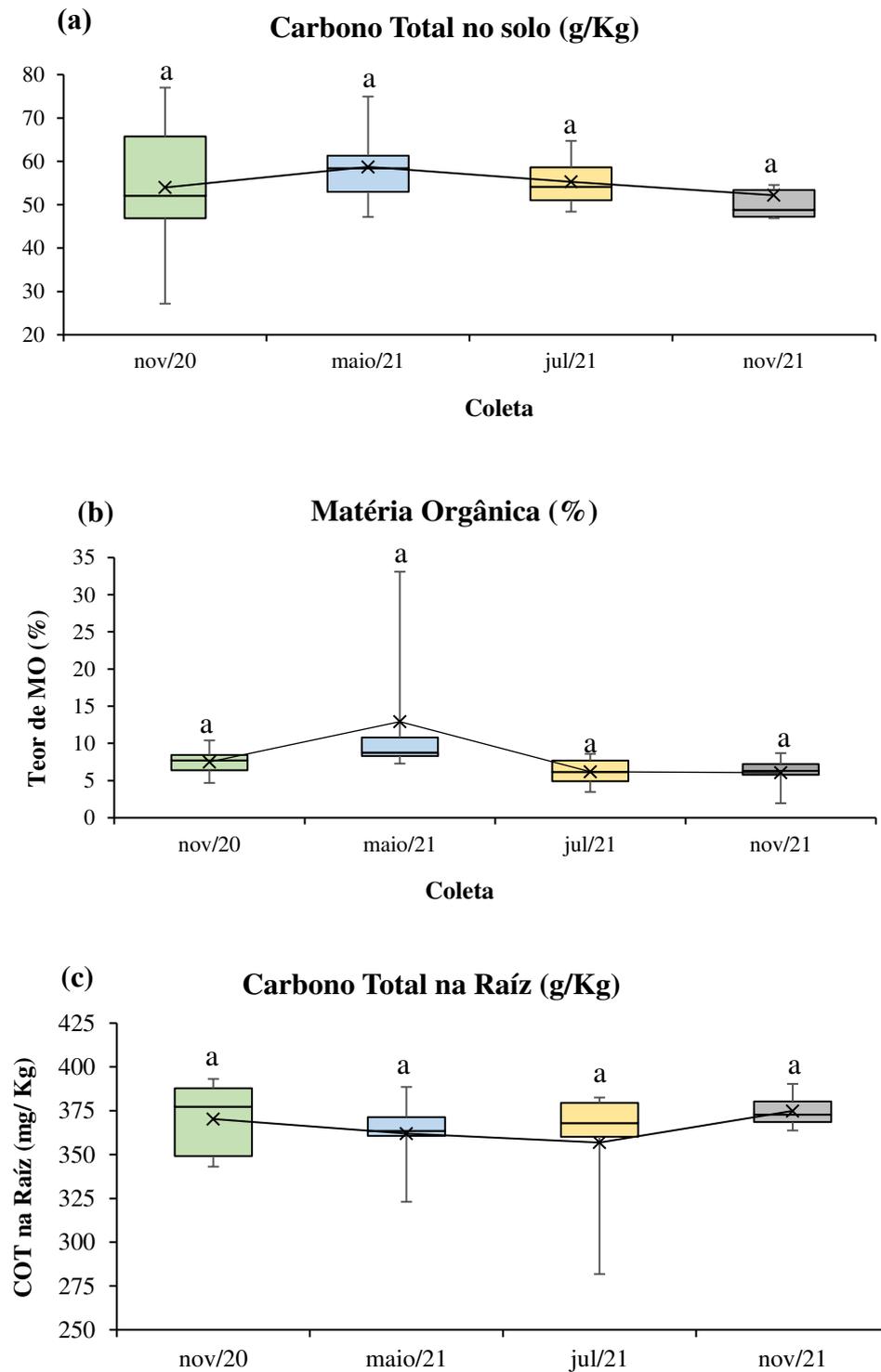
**Tabela 6** - Dados de Carbono na Raíz e no solo e Matéria Orgânica para o período avaliado (Nov/20 -Nov-21).

<b>Estatística Descritiva</b>	<b>COTs (g/Kg)</b>	<b>COTr (g/Kg)</b>	<b>MO (%)</b>
Média	51,96	366,04	8,17
Erro Padrão da média	18,22	24,58	1,17
Mediana	53,78	369,76	7,41
Desvio padrão	10,74	24,58	5,72
Variância da amostra	331,91	604,04	32,68
Coeficiente de Variação - CV	0,21	0,07	0,70
Curtose	4,47	5,26	17,08
Mínimo	27,18	281,78	1,95
Máximo	77	393,18	33,09
Amplitude	49,82	111,4	31,13
Coef. de Assimetria de Pearson	0,35	-0,45	0,40
Shapiro Wilk (p-value)	<0,001	<0,001	<0,001

Fonte: Autor

Os valores médios por períodos para as variáveis apresentada não apresentaram diferença estatística entre si pelo teste de variância (ANOVA) (Figura17). O período seco de nov/20 foi o que mais apresentou variação nos dados para os teores de COTs (Figura 17a), para a MO foi o período chuvoso (maio/21) (Figura 17b) e no COTr foi no intermediário (Figura 17c). Ou seja, para o período em questão, olhando da perspectiva sazonal, a variação dos dados de carbono foi muito mais espacial do que temporal.

**Figura 17** - Avaliação Temporal da dinâmica do (a) Carbono Total no solo; (b) Matéria Orgânica; e (c) Carbono Total na Raízes na FTSS - Caatinga.



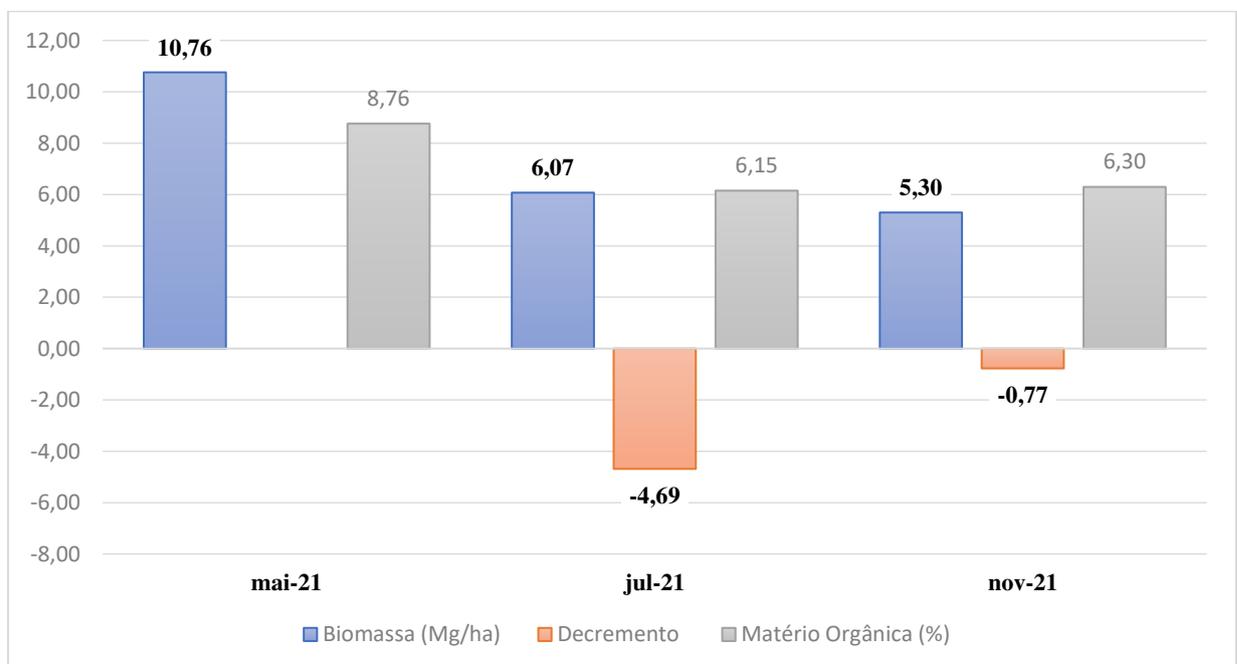
Fonte: Autor

Avaliando período a período, observa-se que o COTs e a MO apresentaram tendência de redução do período chuv-inter e estabilização inter-seco.

Sabe-se que em FTSS a renovação radicular das raízes finas, ou Turnover, é uma via importante de aporte de carbono ao solo nesses ecossistemas (BRUNNER et al., 2013; AQUINO, 2017; ANDRADE et al. 2021; SARAI et al. 2022), pois seu processo de decomposição é mais rápido, tornando-se em necromassa mais que as raízes grossas (CHEN et al., 2019; FRESCHET et al., 2020).

A partir disso, pode ser observado que a redução de biomassa de um período para outro, e conseqüentemente de um suposto aporte de material vegetal depositado no solo para decomposição (4,69 Mg/ha, no qual, dessa proporção 41% equivalia raízes finas), não significou, aporte de matéria orgânica no solo entre períodos, como esperava-se que a perda de biomassa, principalmente de raízes finas afetasse o carbono do solo nas FTSS entre períodos (Figura 18).

**Figura 18** - Balanço da produtividade radicular entre períodos sazonais em relação a dinâmica de carbono na FTSS.



Fonte: Autor

Esse comportamento pode ser possivelmente explicado, em dois pressupostos:

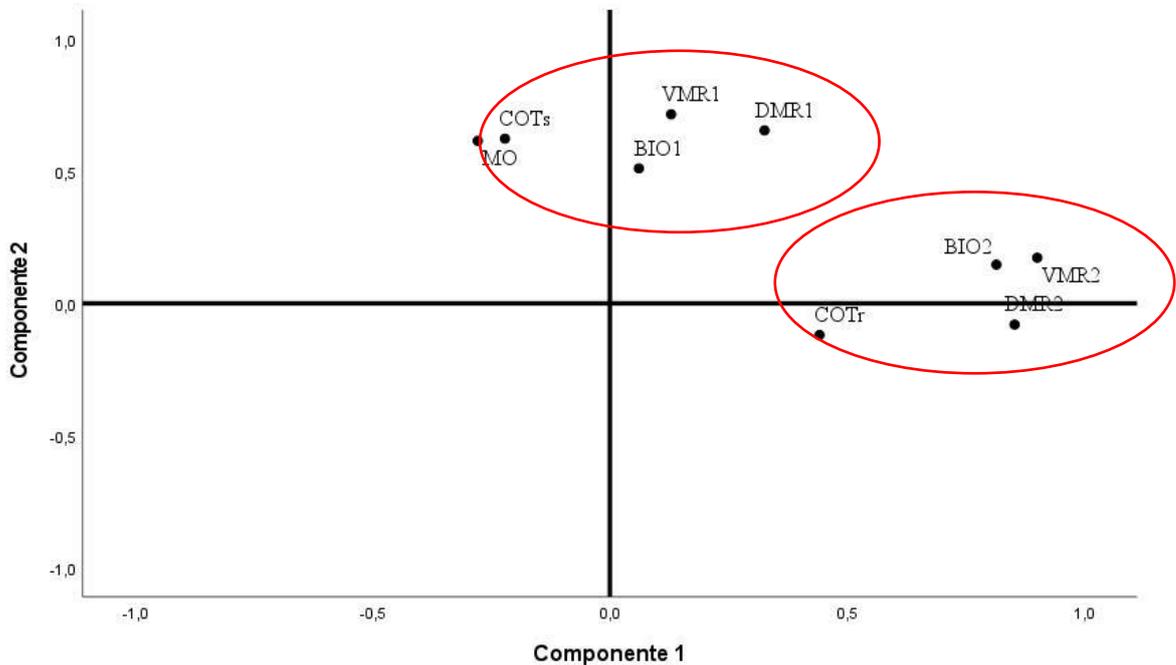
(i) O sistema florestal em questão como já mencionado estar priorizando um investimento em um sistema radicular de raízes grossas, pois em alguns ecossistemas florestal durante o processo de renovação radicular, suas raízes finas mesmo que em menor proporção pode ser convertidas em raízes grossas (MENG et al., 2018; XIA et al., 2010; ZOBEL, 2016). Ou seja, parte dessa redução que deveria ser aportado no solo e virar necromassa entrou em processo de conversão para um sistema de raízes secundárias.

(ii) E ainda o tempo de decomposição dessas raízes para aporte de carbono no solo não tenha sido suficiente para já que a maior proporção da biomassa aportada no solo tem origem de raízes grossas e não finas, ou ainda a quantidade de biomassa reduzida ao ser decomposta não resultou em significativa diferença no carbono no solo nesse intervalo de tempo.

A análise de correlação de Spearman ( $p < 0,05$ ) determinou que entre todas as variáveis da biomassa radicular separadas por diâmetros e também por seus parâmetros radiculares (Tabela 7), a biomassa ( $r = 0,45$ ) e volume de raízes ( $r = 0,54$ ) de  $\varnothing \leq 2$  mm foram as duas variáveis que apresentaram relação significativa e alta com a MO. Por outro lado, a correlação com teores de carbono no solo não apresentara relação nenhuma com a biomassa radiculares e seus parâmetros, e ao tratar de carbono das raízes a BIO 1 não responde pelo carbono presente nas raízes.

No que tange a análise multivariada das Componentes Principais (ACP), a análise permitiu identificação de dois componentes com autovalor maior que 1,0, o que explica 52% dos dados avaliados (Figura 19).

**Figura 19** - Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis BIO 1, BIO 2, VMR1, VMR2, DMR1, DMR2, COTs, COTr e MO.



Biomassa  $\leq$  2mm (BIO 1), Biomassa  $>$  2 mm (BIO 2), Biomassa Total (BIOT). DMR1 (Diâmetro de Raízes  $\leq$  2 mm); VMR1 (Volume de Raízes  $\leq$  2 mm; DMR2 (Diâmetro de Raízes  $>$  2 mm); VMR2 (Volume de Raízes  $>$  2 mm).

Fonte: Autor

A componente 1 (ACP1), com autovalor de 30,021% mostrou forte associação entre a BIO2 (0,81), DMR2 (0,85), VMR2 (0,85) e COTr (0,44), por outro lado, a ACP2 de autovalor de 22,14% mostrou-se associações entre as variáveis BIO1(0,51), VMR1 (0,71), DMR1(0,65), MO (0,61) e COTs (0,62). Corroborando que o carbono existente nas raízes em FTSS é explicado principalmente pela biomassa radicular de diâmetro maior de 2 mm (raízes grossas), já a matéria orgânica e o carbono orgânico no solo são proveniente principalmente da biomassa das raízes finas (menores que 2 mm), conforme citado anteriormente por outros autores e demonstrado pelos dados de correlação

Com isso infere-se que a partir dos dados até então avaliados, trazendo a relação biomassa radicular frente a dinâmica do carbono no solo, observou-se que mesmo o carbono do solo na FTSS sendo respondido preferencialmente pelo aporte de raízes finas no solo, a redução dessa biomassa total, existente entre períodos sazonais não afetou significativamente o aporte de carbono no solo. No entanto, o período de um 1 ano avaliado no estudo pode ser considerado

não adequado para determinar a real dinâmica temporal desse carbono nesses ecossistemas. Assim, necessita-se, de um período de investigação mais prolongado para conclusões definitivas de como o C comporta-se em termos de períodos sazonais na FTSS.

**Tabela 7** - Coeficiente de correlação de Spearman entre os parâmetros entre Biomassa  $\varnothing \leq 2\text{mm}$  (BIO 1), Biomassa  $\varnothing > 2\text{ mm}$  (BIO 2), Biomassa Total (BIOT), Diâmetro Médio Raízes  $\leq 2\text{ mm}$  (DMR1), Volume Raízes  $\leq 2\text{ mm}$  (VMR1), Diâmetro Médio Raízes  $> 2\text{ mm}$  (DMR2), Volume  $> 2\text{ mm}$  (VMR2), Carbono Total no Solo (COT), Carbono Total na Raíz (COTr) e Matéria Orgânica (MO).

	<b>BIO1</b>	<b>BIO2</b>	<b>BIOT</b>	<b>DMR1</b>	<b>VMR1</b>	<b>DMR2</b>	<b>VMR2</b>	<b>COTs</b>	<b>COTr</b>	<b>MO</b>
<b>BIO1</b>	1	<b>0,61*</b>	0,76*	0,00	0,53*	-0,04	0,37	0,09	<b>-0,39*</b>	<b>0,45*</b>
<b>BIO2</b>		1	0,93*	0,26	0,31	0,23	0,82*	-0,06	0,02	0,14
<b>BIOT</b>			1	0,16	0,39*	0,21	0,72*	0,01	-0,10	0,22
<b>DMR1</b>				1	0,56*	0,20	0,46*	0,04	<b>0,49*</b>	0,35
<b>VMR1</b>					1	-0,06	0,34	-0,05	0,01	<b>0,54*</b>
<b>DMR2</b>						1	0,50*	0,12	0,17	-0,30
<b>VMR2</b>							1	-0,02	0,26	0,02
<b>COTs</b>								1	-0,27	<b>0,54*</b>
<b>COTr</b>									1	-0,11
<b>MO</b>										1

\*Significativo em 5% de probabilidade de erro, coeficiente de correlação de Spearman

Fonte: Autor



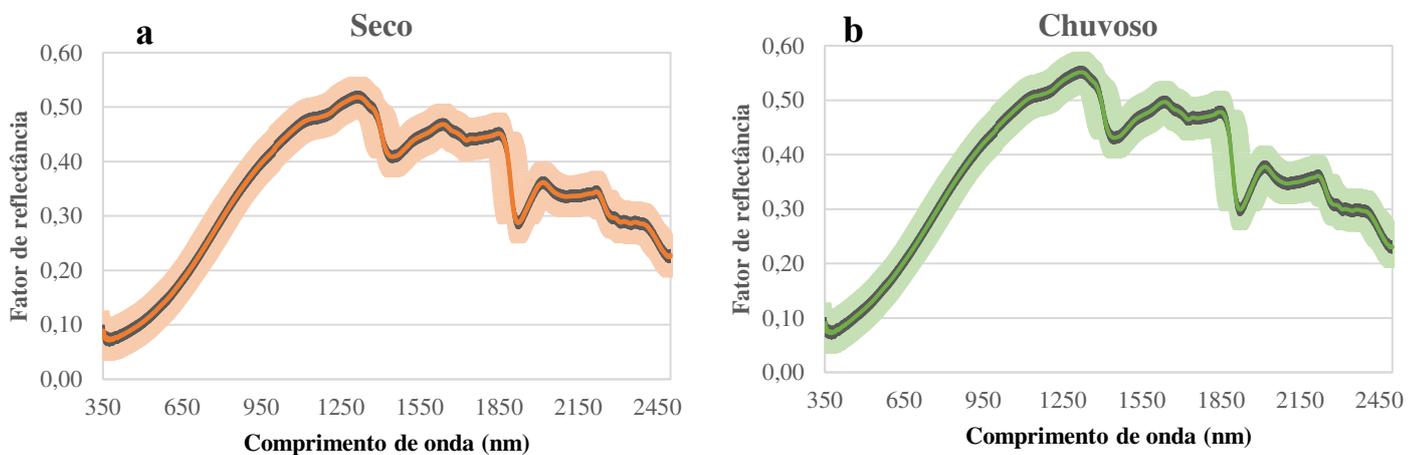
## 6.2 Estimativa da biomassa radicular por métodos indiretos: utilizando-se da espectroscopia de reflectância e de relações alométricas.

### 6.2.1 Modelo preditivo da biomassa com os dados hiperespectral

#### 6.2.1.1 Análise dos dados Hiperespectral de biomassa radicular

Em termos de comportamento espectral, as amostras de biomassa ao serem separadas por período sazonal e por teor de biomassa apresentaram assinaturas espectrais semelhantes, diferenciando-se minimamente apenas na intensidade do fator de reflectância de seus valores máximos e mínimos (Figura 20). Para o período seco (Figura 20a), os valores do fator de reflectância máximos variaram entre 0,78 e 0,14, já com relação aos valores de mínimo entre 0,36 e 0,026. Tratando-se do período chuvoso (Figura 20b), esses valores variaram entre 0,77 e 0,11 para os de máximo e entre 0,36 e 0,025 para os de mínimo.

**Figura 20** - Comportamento espectral descritivo para os dados de biomassa coletados no período seco (a) e chuvoso (b). As Média (linhas) e desvio padrão (bordas) da resposta espectral das amostras.



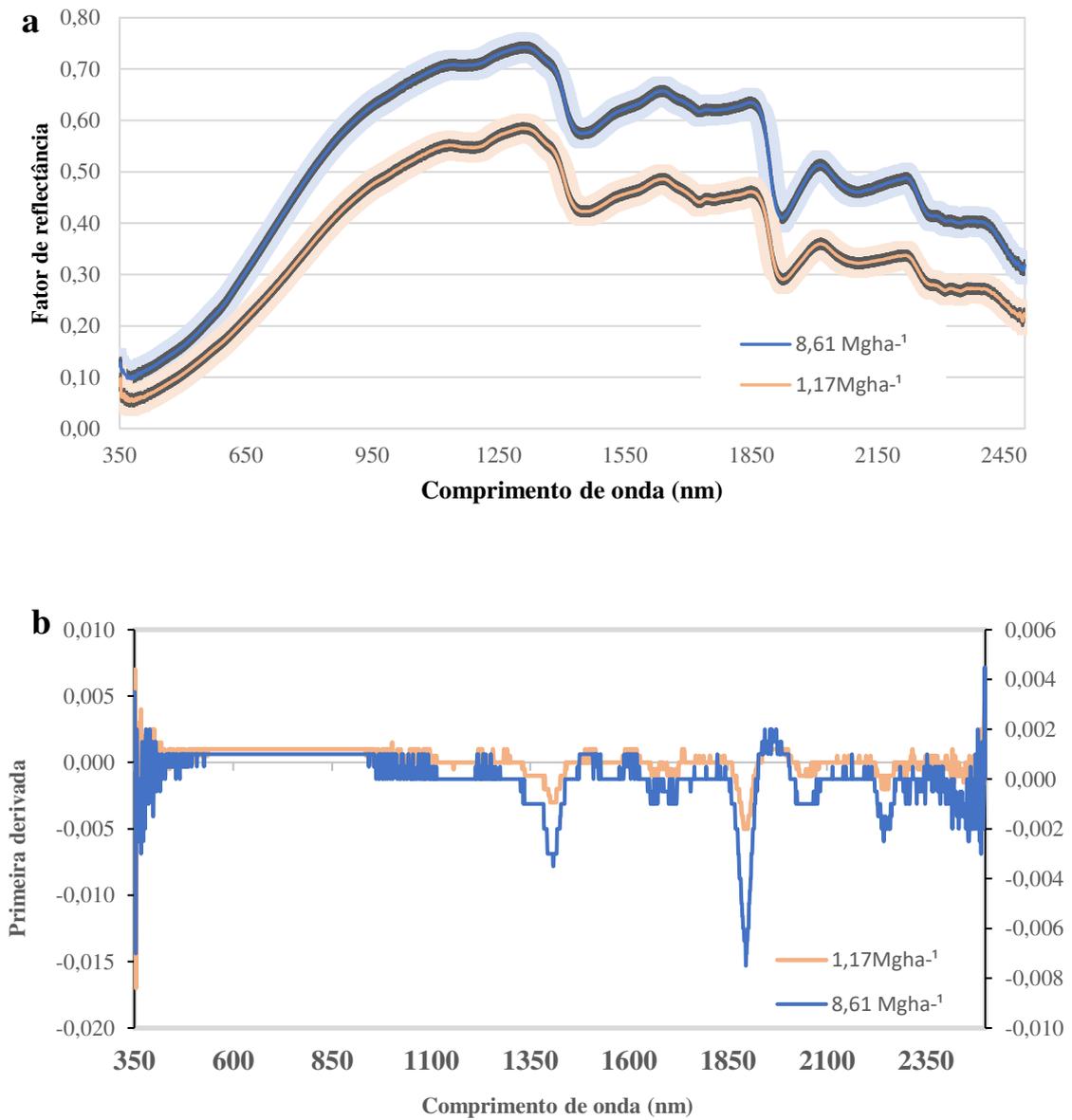
Fonte: Autora

No entanto ao trazer essa análise para a teor médio de biomassa (Figura 21a), pode ser observado que houve distinção entre essas intensidades, mostrando assim, que o espectro médio é afetado pela diferença de massa de raiz, tendendo a aumentar a reflectancia com o aumento da biomassa de raiz. Esse mesmo comportamento também foi observado por Xu *et al* (2016), ao avaliarem diferentes teores de biomassa em seus estudos. Esse aumento de intensidade de reflectância na região do Infravermelho Próximo (NIR), pode estar associado à morfologia tecidual das raízes, pois com mais raízes, há um aumento do número de vazios de ar nas raízes, fornecendo assim, mais interfaces de células de ar-raiz que aumentam a reflectancia (STONER e BAUMGARDNER, 1981; JONESE VAUGHN, 2010).

De forma geral, a assinatura espectral das amostras de raízes apresentou na região do Visível (VIS) e no início do (NIR) uma inclinação íngreme, com picos de reflectância e absorbância na região NIR evidenciados nos comprimentos 1250 nm, 1550 nm, 1950 nm de reflectância e 1400 nm, 1900 nm (evidenciado o pico de absorção mais forte) e 2100 nm para a absorbância. Sendo, os picos melhor identificados a partir da transformação dos dados para a primeira derivada (Figura 21b).

A transformação da reflectância em primeira derivada evidencia os pontos onde há mudanças bruscas de resposta espectral, em que os picos negativos e positivos podem ser relacionados às inclinações nas bandas de absorção e reflectância, respectivamente, no espectro original (BARBOSA, 2005). Com relação aos picos de absorbância, XU et al, (2016) encontraram picos de absorção mais evidentes nos comprimentos de 1450 nm, 1900 nm, 2080 nm, 2200 nm, 2300 nm, comprimentos iguais ou muito próximos aos encontrados no presente estudo, evidenciando que essas regiões estão associadas com o quantitativo da biomassa radicular.

**Figura 21** - (a) Análise do comportamento espectral segundo o teor de biomassa. As Média (linhas) e desvio padrão (bordas) da resposta espectral das amostras; (b) Análise do comportamento espectral a partir dos tratamentos dos dados pela transformação da primeira.

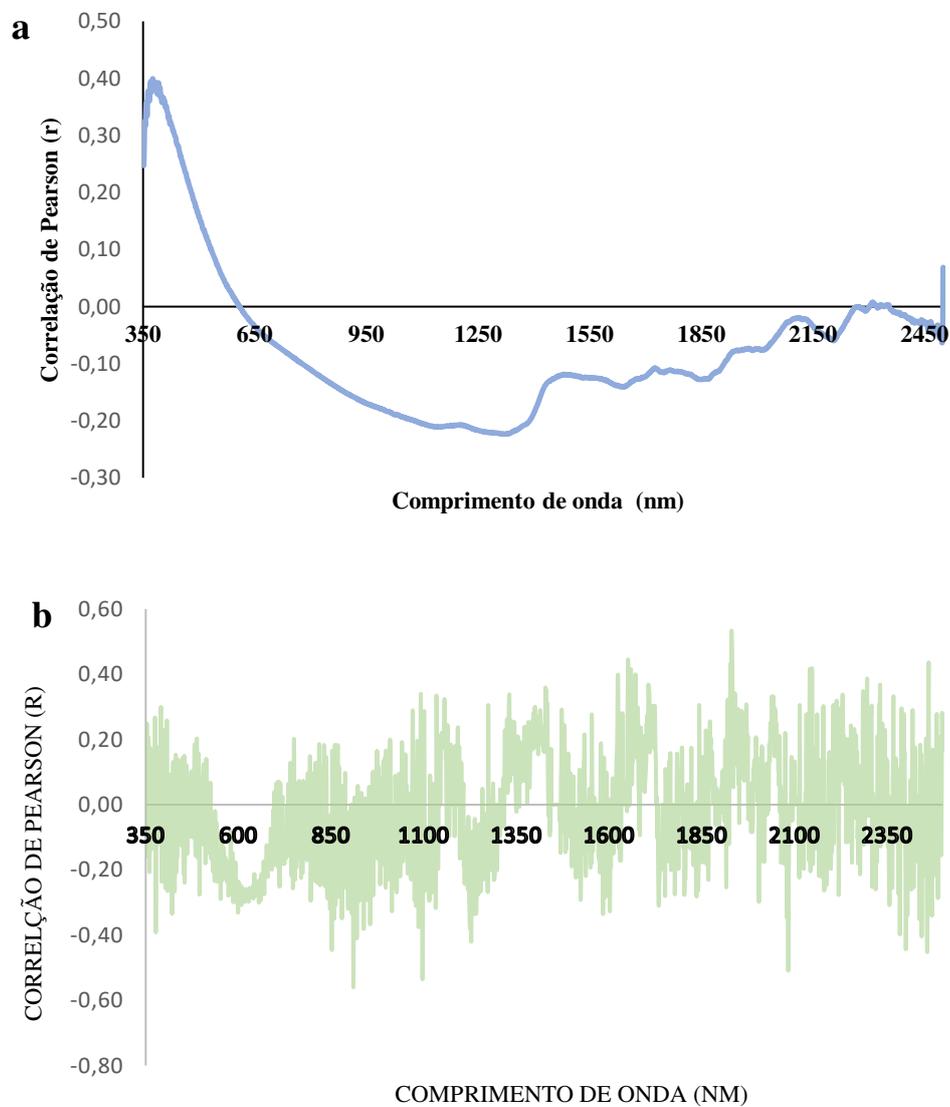


Fonte: Autora

### 6.2.1.2 Coeficientes de Correlação de Pearson

Os dados espectrais de reflectância e os transformados para 1 derivada, foram submetidos à análise de correlação de Pearson, estando o resultado da análise expresso na Figura 22. Dos dois conjuntos de dados a transformação da reflectância em primeira derivada foi o tratamento espectral que evidenciou as melhores correlações entre os teores de biomassa radicular e os comprimentos de onda por todo o espectro.

**Figura 22** - Correlação de Pearson (r) entre as concentrações de Biomassa e a reflectância (a) como com a primeira derivada (b).



Fonte: Autora

Ao longo de todo o espectro para esse conjunto de dados, verificou-se que as correlações entre os comprimentos de onda e o teor de biomassa puderam se caracterizar como moderadas e fraca, mesmo sendo encontrados os melhores resultados em relação ao conjunto de dados não transformados. Na região do VIS, as melhores correlações ficaram por conta do comprimento de onda 377 nm ( $r = -0,39$ ) e 391 nm ( $r = 0,30$ ), sendo classificadas como fracas e de sentido negativo e positivo, respectivamente. Para a região do NIR, os melhores resultados foram nas bandas 910 nm ( $r = -0,55$ ), 1096 nm ( $r = -0,53$ ), 1931 nm ( $r = 0,50$ ) e 2083 nm ( $r = 0,50$ ) classificadas como moderada. Já em relação aos dados não transformados observou-se em praticamente todo espectro médio há ausência de correlação, apresentando apenas uma pequena faixa do VIS (350 nm – 450 nm) de correlações de sentido fraco e positivo ( $r = 0,26$  a  $r = 0,40$ ).

#### *6.2.1.3 Estimativa da Biomassa radicular por Regressão dos Mínimos Quadrados Parciais (PLSR)*

A partir da observação dos resultados de correlação, o conjunto de dados utilizado na construção do modelo de predição foram transformados para primeira derivada. Pela qual, ao se aplicar o processo de seleção de banda pelo método Stepwise-Forward selecionou-se as melhores bandas que representam a variação da biomassa radicular. O método selecionou bandas espectrais da região do NIR, tendo sido seis bandas significativas, sendo elas 910 nm, 2147 nm, 1932 nm, 853 nm, 929 nm, 1164 nm.

Uma vez selecionadas as bandas espectrais que melhor representaram a variância no conteúdo de BIOT, construiu-se o modelo da PLSR utilizando o tratamento espectral da primeira derivada e os comprimentos de onda que melhor responderam, conforme descrito na Tabela 8.

**Tabela 8** - Equação para predição de Biomassa radicular total a partir do modelo construído pela PLSR, com os respectivos R<sup>2</sup> ajustado

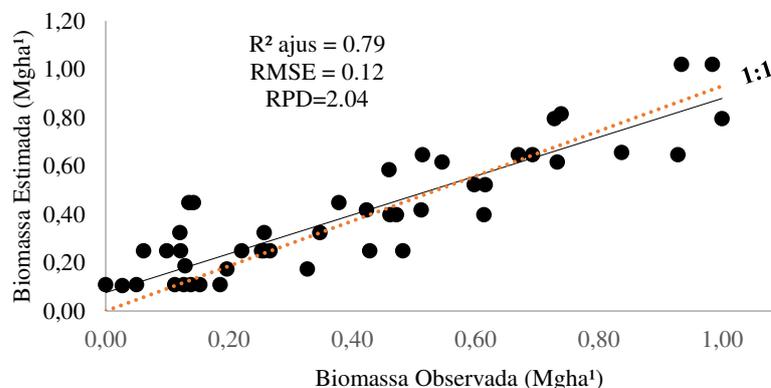
Tratamento dos dados espectrais	Modelo	R <sup>2</sup> ajust
1ª derivada	$Y = 0,093 - 397 \cdot (910 \text{ nm}) + 1542,8 \cdot (2147 \text{ nm}) + 280,55 \cdot (1932 \text{ nm}) + 423,028 \cdot (853 \text{ nm}) - 149,27 \cdot (929 \text{ nm}) + 337,32 \cdot (1164 \text{ nm})$	0,79

.\*Y: Biomassa prevista pelo modelo com valor normalizado de 0 a 1. Fonte: Autora

Na Figura 23, está descrito o ajuste dos dados de biomassa estimada em relação os dados observados, tendo os valores de R<sup>2</sup> ajusto, RMSE e RPD sido obtidos do processo de calibração do modelo em conjunto com a validação cruzada, no qual, quando realizada em um conjunto de dados criado a partir de um número limitado de campos, leva a resultados excessivamente otimistas nas previsões para novas amostras desconhecidas (BROWN et al., 2005; BELLON-MAUREL e MCBRATNEY, 2011).

Assim para o conjunto de dados o modelo apresentou o R<sup>2</sup> ajust de 0,79 e um RMSE de 0,12 sendo considerado excelente segundo a classificação de CHANG et al. (2001), com RPD > 2,0. XU et al (2016), encontraram valores próximos, com 0,85 R<sup>2</sup> ajusto, no processo calibração+validação cruzada ao estimar densidade de raízes com o PLSR.

**Figura 23** - Gráficos de dispersão de biomassa de raízes estimadas e observadas. A linha 1:1 (pontilhada) e a linha de regressão (sólida).



Fonte: Autor

Porém, é imperioso ressaltar que a apresentação de apenas os resultados da calibração aliado a validação cruzada realizada durante o processo de construção do modelo é insuficiente para apresentação de confiabilidade do modelo, porque mesmo valores aleatórios podem ser calibrados usando Vis-NIR; a ferramenta mais poderosa para demonstrar uma calibração bem-sucedida é uma validação subsequente com um conjunto dados de teste independente, ou também chamada validação pura. A partir disso, dado o número de amostras insuficiente para o processo calibração e validação pura, tendo as amostras em questão apenas para a construção do modelo, o mesmo para ser considerado confiável e mais robusto necessita ser validado por um conjunto de dados inéditos.

### 6.2.2 Equação alométrica para predição da biomassa abaixo do solo

As equações alométricas para a estimativa da biomassa radicular total, biomassa das raízes finas e de raízes grossas foram obtidas aplicando-se o modelo dos mínimos quadrados parciais da RLM (Tabela 9).

A análise resultou em modelos estatisticamente significativos apresentados para BIO T ( $p < 0,001$ ;  $R^2_{ajus} = 0,71$ ) e para a BIO 2 ( $p < 0,001$ ;  $R^2_{ajus} = 0,80$ ), mostrando que os parâmetros morfológicos diâmetro médio e volume de raízes são capazes de prever a BIOT e a BIO 2, porém não capazes de prever a BIO1, pois, não gerou um modelo estaticamente significativo ( $p < 0,01$ ;  $R^2_{ajus} = 0,28$ ).

**Tabela 9** - Modelos alométricos de estimativa da biomassa total (BIO T) e da biomassa menor de 2 mm (BIO 1) e da biomassa maior de 2 mm (BIO 2).

Variável	Modelo	R <sup>2</sup> ajust
BIO T (Mg/ha)	$Y = -0,19 + (-0,05DMR2) + (0,94VMR2^*) + (0,42DMR1^*) + (-0,06VMR1^*)$	0,71
BIO 1 (Mg/ha)	$Y = 1,99 + (-1,91*DMR1^*) + (0,55*VMR1^*)$	0,28
BIO 2 (Mg/ha)	$Y = 0,04 + (-0,14*DMR2) + (1,73*VMR2^*)$	0,80

\*Significativo  $p < 0,05$ . Sendo, Biomassa  $\varnothing \leq 2$  mm (BIO 1), Biomassa  $\varnothing > 2$  mm (BIO 2), Biomassa Total (BIOT), Diâmetro Médio Raízes  $\leq 2$  mm (DMR1), Volume Raízes  $\leq 2$  mm (VMR1), Diâmetro Médio Raízes  $> 2$  mm (DMR2), Volume  $> 2$  mm (VMR2). Fonte: Autor.

Vale ressaltar também, como no modelo por espectroscopia de refletância, a necessidade de validação dos modelos a partir de dados inéditos, para uma certificação do uso dessas equações alométricas para estimar tanto a BIO T como a BIO 2 em condições de FTSS.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do Carbono no solo em uma FTSS ser preferencialmente respondido pela biomassa radicular de raízes finas ( $\leq 2$  mm), verificou-se que essa redução da biomassa radicular, proveniente principalmente do processo de renovação radicular, não significa, necessariamente que haverá aporte carbono significativo no solo entre os períodos sazonais, refutando-se assim a hipótese apresentada.

Por outro lado, não é possível fechar conclusões definitivas sobre como essa dinâmica do carbono na FTSS comporta-se em relação essa biomassa total e compartimentalizada pelo diâmetro, frente a sazonalidade climática. Assim, uma vez que o período de estudo utilizado na análise não permitiu identificar variação no COT, e conseqüentemente, uma relação entre a biomassa e o COT, sugere-se a realização de próximos estudos em escalas temporais maiores.

Com relação a estimativa da biomassa radicular em condições de FTSS, a utilização da espectroscopia de reflectancia como metodologia para a construção de um modelo de predição da biomassa radicular com a PLRS mostrou-se aplicável e totalmente possível, através de um modelo considerado de ajuste excelente entre dados obtidos e estimados pela validação cruzada. Além disso, foi possível verificar que os parâmetros morfológicos diâmetros médio e volume de raízes são parâmetros capazes de serem relacionados alometricamente com a biomassa radicular para prever a biomassa total e a biomassa maior de 2 mm, mas não a biomassa menor de 2 mm.

Com isso, imperioso ressaltar ainda, a necessidade de uma futura validação pura para os dois modelos obtidos para um aumento da confiabilidade dos mesmo em estimar de forma indireta a biomassa radicular em uma FTSS, e assim, e conseqüentemente, serem em estudos futuros como base para calcular o estoque de C abaixo do solo nas FTSS.

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, n. 43, p. 1-39, 1974.
- ADDO-DANSO, S. D.; PRESCOTT, C. E.; SMITH, A. R. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 332-351, 2016.
- ANDRADE-LIMA, D. 1981. The caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica** 4: 149-163.
- ANDRADE-LIMA, D. 1989. **Plantas das caatingas**. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, RJ. 243p
- ANDRADE *et al.* How thinning in a seasonally dry tropical forest contributes towards root biomass, carbon stock and aggregate size in a Vertisol. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 15, 2021
- ANDREA D.A. CASTANHO *et al.* A close look at above ground biomass of a large and heterogeneous Seasonally Dry Tropical Forest - *Caatinga* in North East of Brazil. **An Acad Bras Cienc** (2020) 92(1): e20190282 DOI 10.1590/0001-3765202020190282.
- AQUINO, D. N. **Ciclagem de carbono e caracterização espectral em áreas de caatinga raleada e conservada**. 2015. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- ALLEN, K. *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, 2017
- ALVES, J. J.A; ARAÚJO, M. A.; SANTOS, N, SEBASTIANA DEGRADAÇÃO DA CAATINGA: UMA INVESTIGAÇÃO ECOGEOGRÁFICA. **Revista Caatinga**, vol. 22, núm. 3, julio-septiembre, 2009, pp. 126-135 Universidade Federal Rural do Semi-Árido Mossoró, Brasil
- ARAÚJO, E. L.; FERRAZ, E. M. N. Análise da vegetação: amostragem, índices de diversidade e utilidades na etnobotânica. In: ALBUQUERQUE, U. P.; LUCENA R. F. P.; CUNHA, L. V. F. C. (Ed.). **Métodos e técnicas na pesquisa etnobotânica**. Recife: Comunigraf, 2008. p. 161-198.
- BALESDENT J. AND BALABANE M. (1992) Maize root-derived soil organic carbon estimated by natural <sup>13</sup>C abundance. **Soil Biology and Biochemistry** 24, 97-101.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 255 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos-SP.

BARDGETT, R. D.; MOMMER, L.; DE VRIES, F. T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 12, p. 692-699, 2014

BELLON-MAUREL, V., MCBRATNEY, A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils — critical review and research perspectives. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1398–1410

BIRDSEY, R. A. Carbon accounting rules and guidelines for the United States Forest Sector. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, p.1518-1524, 2006

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Roma: Food and Agriculture Organization (FAO), 1997. (Forest Resources Assessment Forestry Paper, 134).

BROWN, D.J., BRICKLEMEYER, R.S., MILLER, P.R., 2005. Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C prediction in Montana. **Geoderma** 129, 251–267

BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; MAYS, M.D.; REINSCH, T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v.132, p.273-290, 2006.

BRUNNER, I., BAKKER, M.R., BJORK, R.G., HIRANO, Y., LUKAC, M., ARANDA, X., *et al.*, 2013. Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. **Plant Soil** 362 (1), 357–372.

CALIXTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estudo comparativo da estrutura fitossociológica de dois fragmentos de Caatinga em níveis diferentes de conservação. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 345-355, 2014.

CAMO Analytics AS, Unscrambler. Oslo, Norway. v. trial, 2021. Disponível em <https://www.camo.com/unscrambler/>. Acesso em 26 set. 2023

CAMPELO, D. H. **Uso do sensoriamento remoto para diagnóstico nutricional na cultura do milho irrigado**. 2018. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-CE.

CAMPBELL, B. (ed.) 1996. *The Miombo in Transition: Woodlands and Welfare in Africa*. **Centre for International Forestry Research**, Bogor, Indonesia. 266 pp

CHANG, C.W., LAIRD, D.A., MAUSBACH, M.J., HURBURG, C.R.J., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy – principal component regression analysis of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 65, 480–490

CHEN, G., HOBBIE, S.E., REICH, P.B., YANG, Y., ROBINSON, D., 2019. Allometry of fine roots in forest ecosystems. **Ecol. Lett.** 22, 322–331.

COSTA, T. L. *et al.* Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid Northeast Brazil. **Plant and soil**, v. 378, n. 1-2, p. 113-123, 2014.

CUNNINGHAM, A. B. *et al.* **Sustainable trade and management of forest products and services in the COMESA region: an issue paper.** Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008

DIEGO A. CAMPOS *et al.* Biomass Dynamics in a Fragment of Brazilian Tropical Forest (Caatinga) over Consecutive Dry Years. **Appl. Sci.** **2020**, 10, 7813; doi:10.3390/app10217813.

DOMISCH T, FINÉR L, DAWUD SM, VESTERDAL L, RAULUNDRASMUSSEN K (2015) Does species richness affect fine root biomass and production in young forest plantations? **Oecologia** 177:581–594

ERKTAN, A.; MCCORMACK, M. L.; ROUMET, C. Frontiers in root ecology: recent advances and future challenges. **Plant and Soil**, v. 424, n. 1-2, p. 1-9, 2018

FEITOSA, R. C. **Estoque de carbono em floresta tropical sazonalmente seca no nordeste do brasil: uma comparação entre dois usos do solo.** 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura.** São Paulo, v. 70, n. 4, p. 51-56, out. 2018

FORT, F., FRESCHET, G.T., 2020. Plant ecological indicator values as predictors of fine-root trait variations. **J. Ecol.** 108 (4), 1565–1577.

GHAFOOR *et al.*, 2017A. Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. **Biol. Fertil. Soils**, 53 (2017), pp. 257-267

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal.** Piracicaba: IPEF, 2000. p. 221-267

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.**, 18:1111-1116, 1987.

GREEN, J. J. *et al.* Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. **Plant and Soil**, v. 276, n. 1-2, p. 23-32, 2005.

HIGA, R. C. V. *et al.* **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal.** Colombo: Embrapa Florestas, nov. 2014. (Documentos/Embrapa Florestas, 266).

HIGUCHI, N.; CARVALHO JR., J.A. 1994. Fitomassa e Conteúdo de Carbono de Espécies Arbóreas da Amazônia. : **Anais do Seminário "Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil:** 127-153.

HONGYU, K., Sandanielo, V. L. M., Junior, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, 2015. ISSN: 2358-5390. DOI: 10.18607/ES20165053.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Biomass do Brasil**: primeira aproximação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <[https://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)>. Acesso em: 28 nov. 2022.

JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E.-D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, n. 14, p. 7362-7366, 1997.

JANOS, D. P.; SCOTT, J.; BOWMAN, D. M. J. S. Temporal and spatial variation of fine roots in a northern Australian Eucalyptus tetrodonta savanna. **Journal of Tropical Ecology**, v. 24, n. 2, p. 177-188, 2008

JANZEN, D. H. Tropical dry forest: the most endangered major tropical ecosystem. In: WILSON, E. O. (Ed.). **Biodiversity**. Washington, US: National Academy Press, 1988. p. 130-137.

JENSEN, J.R. Urban / suburban land use analysis. In: AMERICAN SOCIETY PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Remote Sensing**. 2. ed. Falls Church 1983. Vol. 2, cap. 30, p. 1571-1666

JONES, H.G., VAUGHN, R.A., 2010. **Remote Sensing of Vegetation Principles, Techniques, and Applications**. Oxford University Press, Oxford, UK.

KEPLIN, B. & HÜTTL, R. F. Decomposition of root litter in Pinus sylvestris L. and Pinus nigra stands on carboniferous substrates in the Lusatian lignite mining district. **Ecol Eng.** 17, 285–296, 2001

KUSUMO, B.H., HEDLEY, M.J., HEDLEY, C.B., ARNOLD, G.C., TUOHY, M.P., 2010. Predicting pasture root density from soil spectral reflectance: field measurement. **Eur. J. Soil Sci.** 61 (1), 1–13.

KUSUMO, B.H., HEDLEY, M.J., HEDLEY, C.B., TUOHY, M.P., 2011. Measuring carbon dynamics in field soils using soil spectral reflectance: prediction of maize root density, soil organic carbon and nitrogen content. **Plant Soil** 338, 233–245.

LANGLEY, J.A., HUNGATE, B., 2003. Mycorrhizal controls on belowground litter quality. **Ecology** 84, 2302e2312

LUKAC, M. Fine Root Turnover. In: MANCUSO, S. (Ed.). **Measuring roots**: an updated approach. New York: Springer Science & Business Media, 2011. p. 363-373.

M. BALABANE, J. BALESSENT. Input of fertilizer-derived labelled N to soil organic matter during a growing season of maize in the field. **Soil Biology and Biochemistry**, 24 (1992), pp. 89-96

MILES, L. *et al.* A global overview of the conservation status of tropical dry forests. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 3, p. 491-505, 2006.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, v.32, n.1, p.101-111, 2008

MENG, S., JIA, Q., ZHOU, G., ZHOU, H., LIU, Q., YU, J., 2018. Fine root biomass and its relationship with aboveground traits of *Larix gmelinii* trees in Northeastern China. **Forests** 9, 1–11. <https://doi.org/10.3390/f9010035>

M.-F. DIGNAC *et al.* Carbon-13 natural abundance as a tool to study the dynamics of lignin monomers in soil: an appraisal at the Closeaux experimental field (France). **Geoderma** 128 (2005) 3–17

MOKANY, K., RAISON, R.J., PROKUSHKIN, A.S., 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. **Global Change Biol.** 12, 84–96

MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 17, n. 1, p. 67-88, 1986.

NATSUKO TANIKAWA & TATSURO NAKAJI & HIKARI YAHARA & NAOKI MAKITA., Exploring patterns of fine root morphological, chemical, and anatomical traits of 12 tree species from visible–near-infrared spectral reflectance. **Plant Soil** (2019) 445:469–481. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04309-1>.

NAKAJI T, NOGUCHI K, OGUMA H (2008) Classification of rhizo-sphere components using visible-near-infrared spectral images. **Plant Soil** 310:245–261. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9478-z>

OMACHI, I. H. *et al.* Produção de biomassa florestal para exportação: o caso da Amcel. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 1, p. 29-36, 2004.

PESSOA, M. F. Estudo da cobertura vegetal em ambientes da caatinga com diferentes formas de manejo no assentamento Moacir Lucena, Apodi, RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 40-48, 2008.

PEREIRA JÚNIOR, L. R.; ANDRADE, A. P.; ARAÚJO, K. D. Composição florística e fitossociológica de um fragmento de caatinga em Monteiro, PB. **Holos**, Natal, v. 28, n. 2, p. 72-84, 2012.

PEREIRA JÚNIOR, L. R. *et al.* Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 32-40, 2016.

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.

- PICON-COCHARD, C., PILON, R., REVAILLOT, S., JESTIN, M., DAWSON, L., 2009. Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict the percentage of dead versus living grass roots. **Plant Soil** 317, 309–320.
- POIRIER *et al.* The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. **Soil Biology and Biochemistry** 120 (2018) 246–259247
- PRADO, D. E. As Caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; DA SILVA, J. M. C. (Eds.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003. p. 3-73.
- SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba, 2002. 264 p.
- SÄRKINEN, T. *et al.* Forgotten forests-issues and prospects in biome mapping using Seasonally Dry Tropical Forests as a case study. **BMC ecology**, [S.l.], v.11, n.01, p.1-15, 2011.
- SEEMA, THAKUR, ARADHANA, 2019. NIR analysis as an integrated tool for the assessment of soil quality. **J. Pharmacogn. Phytochem.** 8 (1), 1985–1987
- SILVA, ANTÔNIO GIVANILSON RODRIGUES DA. **Dinâmica na produção de biomassa radicular em anos secos, em Floresta Tropical Seca, Caatinga**. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2019.
- SOUZA, J. A. N.; RODAL, M.J.N. 2010. Levantamento florístico em trecho de vegetação ripária de Caatinga no rio Pajeú, floresta/Pernambuco-Brasil. **Revista Caatinga**, 23, 4, 54-62
- SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, AddisonWesley, 1980. 575p.
- STEFFEN, C. A.; OLIVEIRA, J. L.; GAMA, F. F. **Programa Espectron. Manual de Referência**. São José dos Campos: INPE. CARAD, 1996, 11p
- STONER, E.R., BAUMGARDNER, M.F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45 (6), 1161–1165
- RATUCHNE, L. C. *et al.* Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.131515.
- RAZ-YASEEF, N., KOTEEN, L. & BALDOCCHI, D. D. Coarse root distribution of a semi-arid oak savanna estimated with ground penetrating radar. **J Geophys Res (Biogeosci)** 118,135–147, 2013
- REWALD B, MEINEN C (2013) Plant roots and spectroscopic methods – analyzing species, biomass, and vitality. **Front Plant Sci** 4:1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00393>.

RODAL, M. J. N.; MARTINS, F. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 192-205, 2008.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S. **Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon floodplain waters using EO-1 Hyperion**. Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, USA: IEEE International. 2006.

ROUMET C, PICON-COCHARD C, DAWSON LA, JOFFRE R, MAYES R, BLANCHARD A, BREWER MJ (2006) Quantifying species composition in root mixtures using two methods: near-infrared reflectance spectroscopy and plant wax markers. **New Phytol** 170:631–638. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01698.x>

RUMBAUGH, M.D., CLARK, D.H., PENDERY, B.M., 1988. Determination of root mass ratios in alfalfa-grass mixtures using near infrared reflectance spectroscopy. **J. Range Manag.** 41 (6), 488–490.

TOBIN, B., BLACK, K., MCGURDY, L., & NIEUWENHUIS, M. (2007). Estimates of decay rates of components of coarse woody debris in thinned Sitka spruce forests. **Forestry**, 80, 455–469

TIESSEN, H. *et al.* Carbon sequestration and turnover in semiarid savannas and dry forest. **Climatic change**, [S.l.], v. 40, n. 1, p. 105-117, 1998.

VELLOSO, A. L. *et al.* **Ecorregiões propostas para o bioma caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste; Instituto de Conservação Ambiental, 2002.

VISCARRA ROSSEL, R.A., WALVOORT, D.J.J., MCBRATNEY, A.B., JANIK, L.J., SKJEMSTAD, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131, 59–7

WAEBER, P., RAMESH, B., PARTHASARATHY, N., PULLA, S. and GARCIA, C. 2012. **Seasonally dry tropical forests in South Asia: A research agenda. A research report for the “Key Issues for Global Dry Forests”** workshop organised by CIFOR/ForDev, Zurich 28–30th October 2012.

WOLD, S.; SJOSTROM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, [s.l.], v.58, p.109–13, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1)

XIA, M., GUO, D., PREGITZER, K.S., 2010. Ephemeral root modules in *Fraxinus mandshurica*. **New Phytol.** 188, 1065–1074.

ZOBEL, R.W., 2016. Fine roots - functional definition expanded to crop species? **New Phytol.** 212, 310–312.

**APÊNDICE A - DADOS POR AMOSTRA DE BIOMASSA, PARÂMETROS RADICULARES, CARBONO E MATÉRIA ORGÂNICA**

Período	Amostra	Biomassa Total (Mg/ha)	Biomassa <=2 mm	Biomassa >2 mm	Diâmetro médio raízes <= 2 mm	Volume raízes <= 2 mm (cm <sup>3</sup> )	Diâmetro médio raízes >2 mm	Volume raízes > 2 mm (cm <sup>3</sup> )	COT no solo (gKg <sup>-1</sup> )	COT na raiz (gkg <sup>-1</sup> )	MO (%)
nov/20	103	4,18	1,05	3,13	1,08	1,44	3,22	5,18	68,98	343,08	7,45
	104	6,37	3,04	3,33	1,13	3,00	1,76	3,91	55,87	367,33	8,60
	41	4,04	1,43	2,61	1,01	1,28	2,84	4,79	48,27	387,27	6,03
	35	4,26	1,65	2,61	1,22	3,84	13,20	7,28	77,00	393,18	10,40
	25	6,22	2,36	3,87	0,33	0,11	2,84	4,84	27,18	343,08	4,68
	110	3,84	0,64	3,20	1,32	5,14	1,10	7,10	46,40	388,04	7,98
mai/21	1	4,43	2,04	2,39	0,99	2,48	1,54	3,89	74,93	362,72	33,09
	132	8,82	3,57	5,26	1,21	5,29	13,85	14,24	61,48	373,73	11,37
	3	17,23	3,29	13,94	1,12	4,88	1,38	5,39	51,93	364,30	9,05
	126	9,63	5,68	3,95	1,00	2,24	2,67	10,76	56,06	359,96	7,28
	39	16,38	3,61	12,78	1,20	6,54	1,97	10,05	47,18	388,58	8,47
	114	8,06	3,04	5,02	1,04	4,63	2,17	6,91	60,76	323,03	8,27
jul/21	68	5,68	2,36	3,33	1,01	3,89	4,58	6,43	64,70	281,78	6,95
	102	3,27	0,96	2,31	1,17	1,58	3,07	4,10	53,00	374,42	3,47
	23	16,47	1,66	14,81	1,07	1,28	36,77	20,40	50,36	381,20	5,35
	75	2,75	1,34	1,42	0,70	1,12	1,75	2,27	59,74	361,45	7,94
	11	3,10	0,64	2,46	1,01	0,98	12,06	4,18	48,39	382,57	4,76
	109	5,15	2,68	2,47	0,96	4,36	2,93	3,37	55,26	359,74	8,60
nov/21	140	2,66	0,49	2,17	0,82	1,27	2,48	4,04	49,87	382,62	1,95
	69	13,36	1,01	12,35	1,17	2,32	33,75	16,43	54,55	390,33	5,74
	101	4,66	2,31	2,35	1,16	6,83	13,00	4,88	47,74	363,73	6,72
	76	2,35	1,12	1,22	0,97	2,70	1,68	2,17	46,89	372,16	5,87
	31	6,17	2,79	3,38	1,25	5,72	4,76	7,25	47,05	367,35	7,37
	44	2,60	0,90	1,70	1,29	1,67	2,31	3,32	66,94	373,41	8,69

Fonte: Autor

**APÊNDICE B – IMAGENS OBTIDAS NO SCANNER POR AMOSTRA E  
PROFUNDIDADE DA BIOMASSA MAIOR DE 2 MM.**

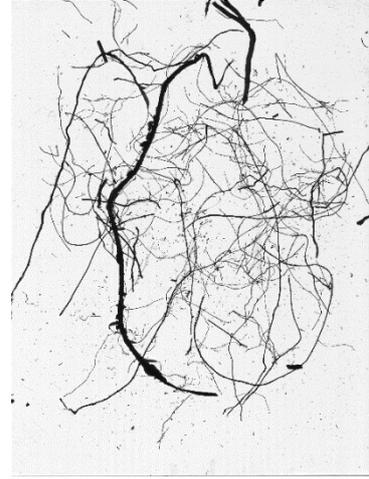
**Amostra 03**



0 - 10 cm

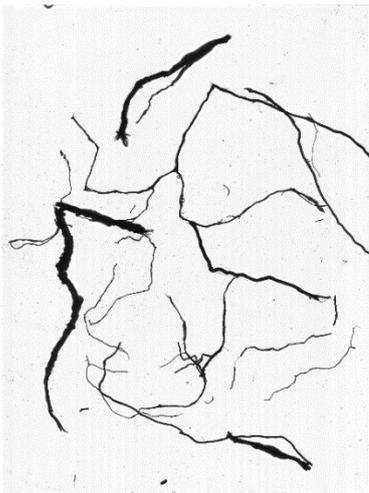


10 - 20cm

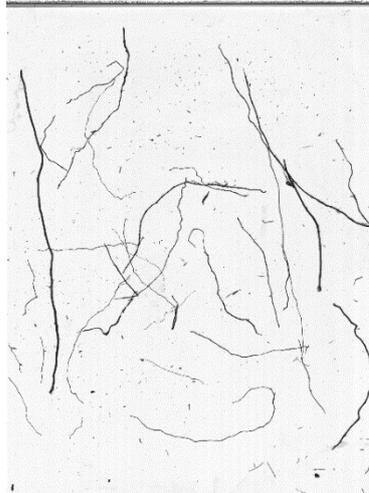


20 - 30 cm

**Amostra 11**



0 - 10 cm

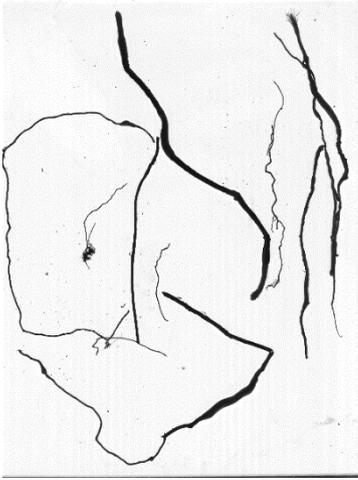


10 - 20cm



20 - 30 cm

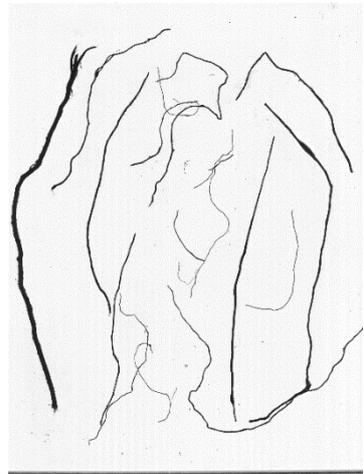
**Amostra 23**



0 - 10 cm

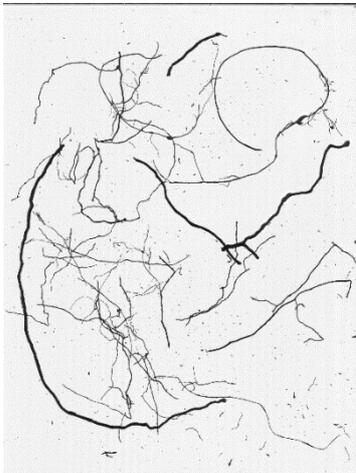


10 - 20cm

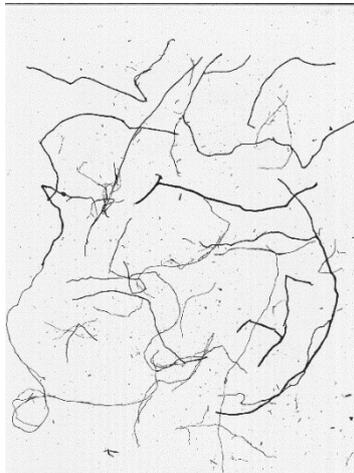


20 - 30 cm

**Amostra 25**



0 - 10 cm

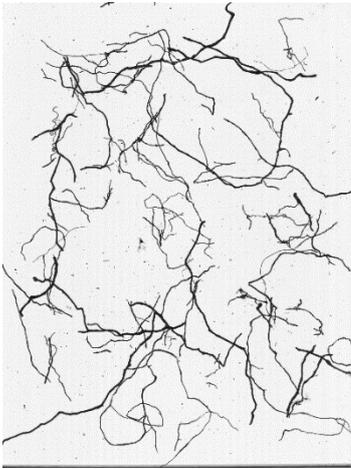


10 - 20cm

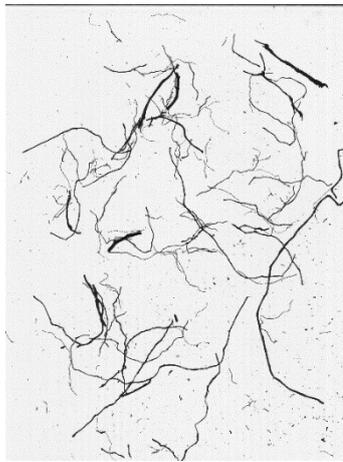


20 - 30 cm

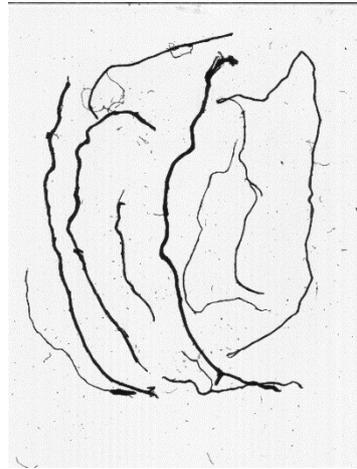
**Amostra 35**



0 - 10 cm



10 - 20cm



20 - 30 cm

**Amostra 39**



0 - 10 cm



10 - 20cm



20 - 30 cm

**Amostra 41**

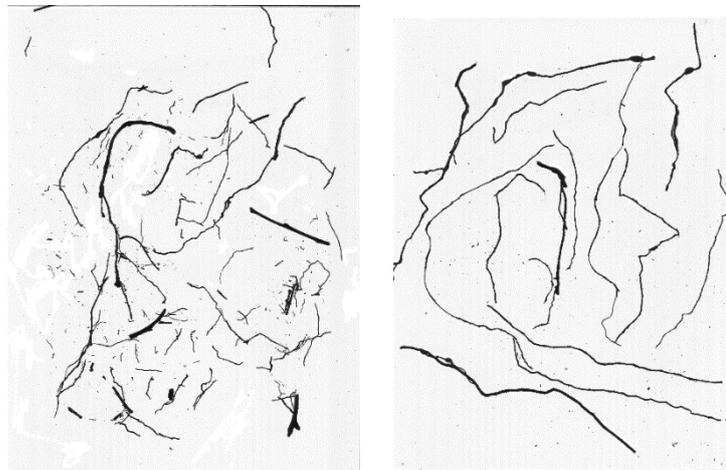


0 - 10 cm

10 - 20cm

20 - 30 cm

**Amostra 44**



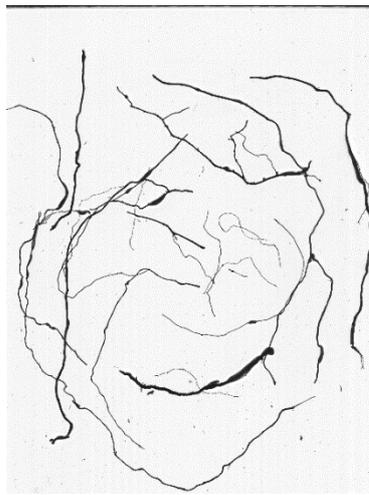
0 - 10 cm

10 - 20cm

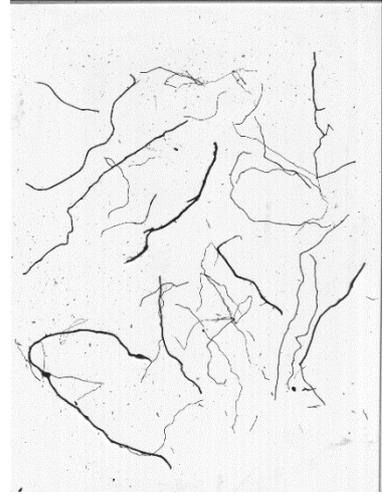
**Amostra 68**



0 - 10 cm



10 - 20cm

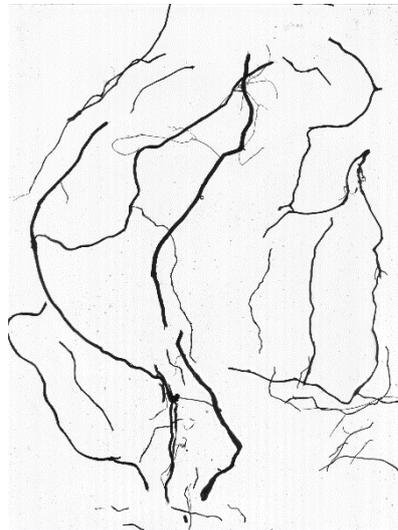


20 - 30 cm

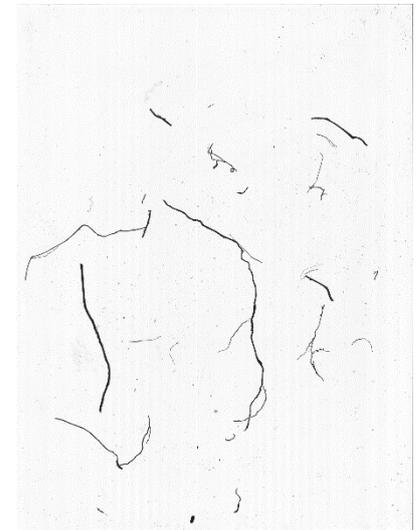
**Amostra 75**



0 - 10 cm

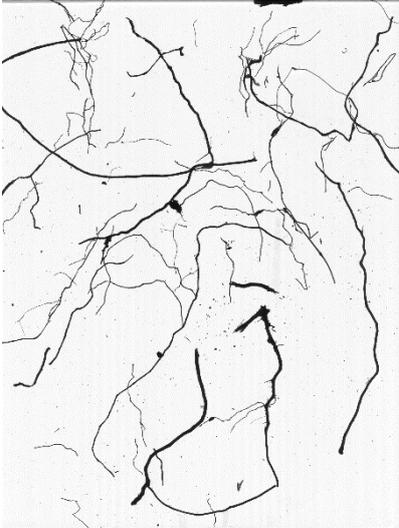


10 - 20cm

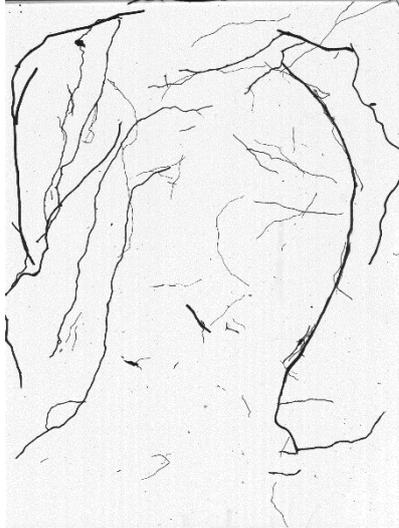


20 - 30 cm

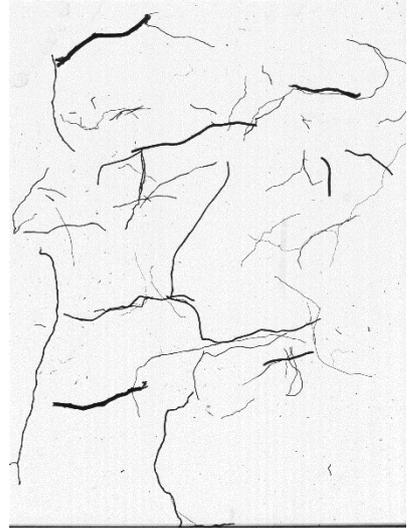
**Amostra 76**



0 - 10 cm



10 - 20cm

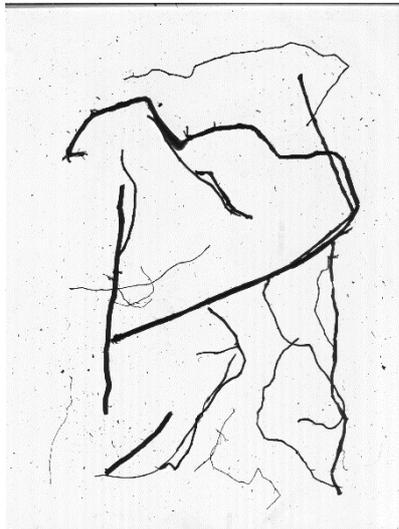


20 - 30 cm

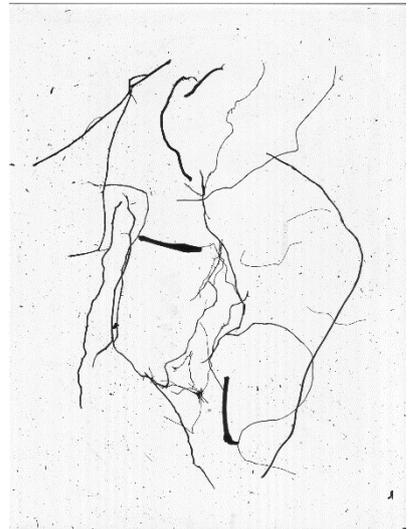
**Amostra 101**



0 - 10 cm

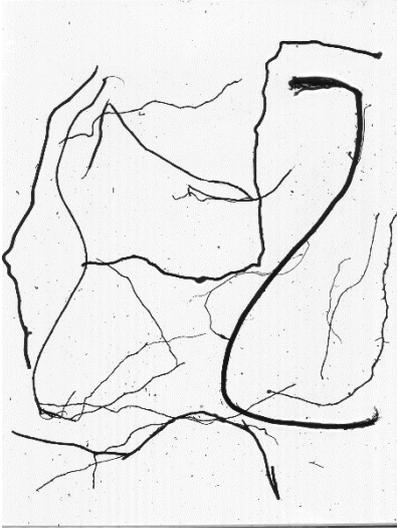


10 - 20cm

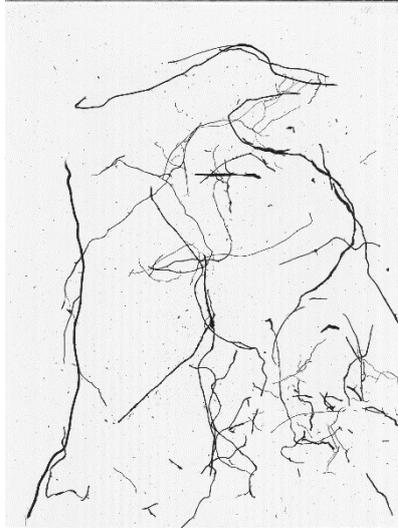


20 - 30 cm

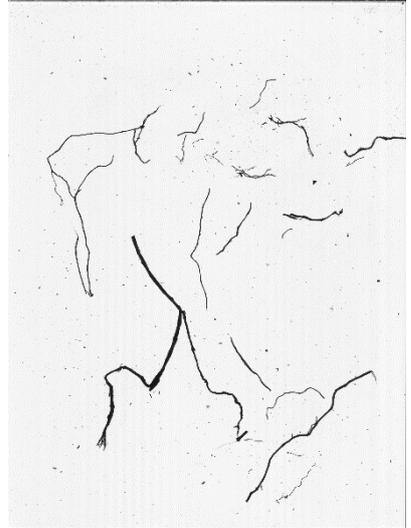
**Amostra 102**



0 - 10 cm



10 - 20cm



20 - 30 cm

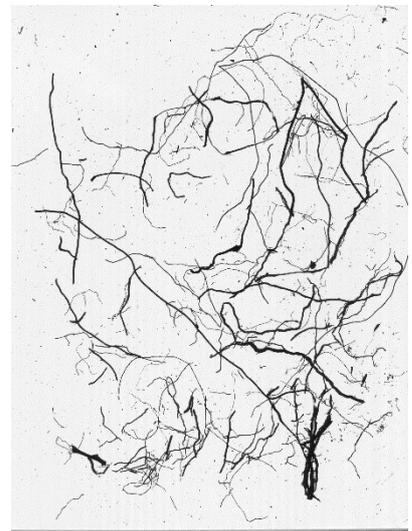
**Amostra 103**



0 - 10 cm



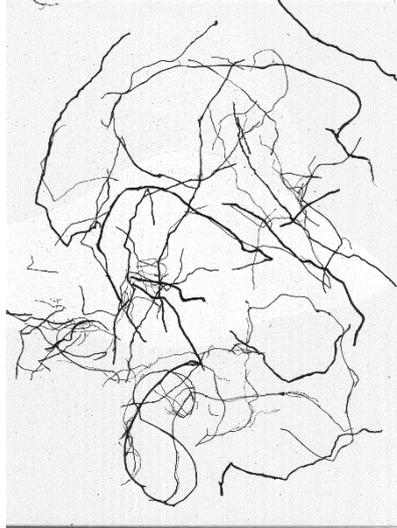
10 - 20cm



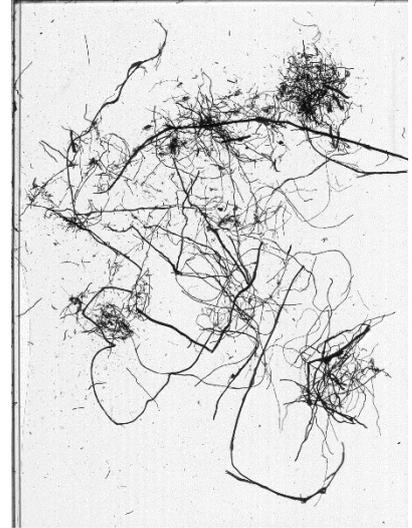
20 - 30 cm

**Amostra 104**

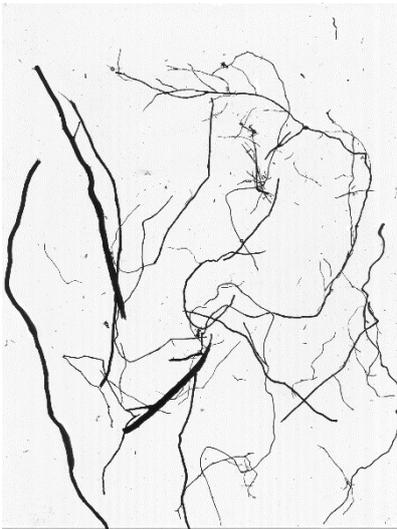
0 - 10 cm



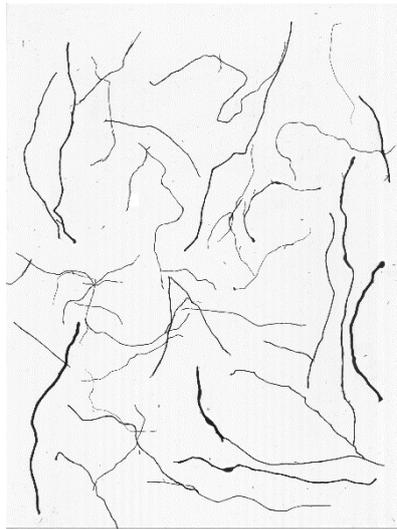
10 - 20cm



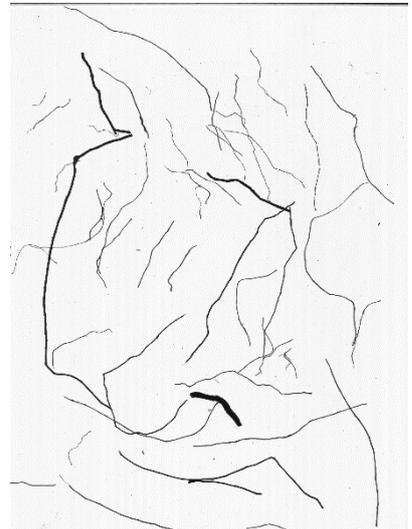
20 - 30 cm

**Amostra 109**

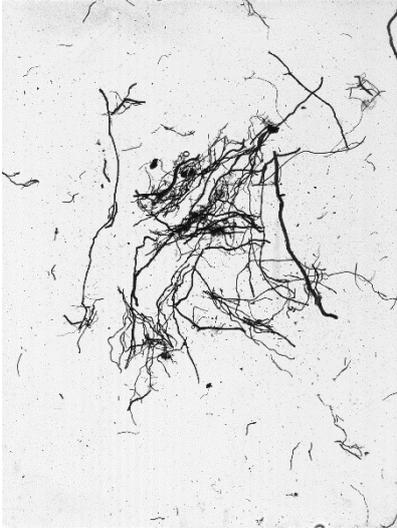
0 - 10 cm



10 - 20cm



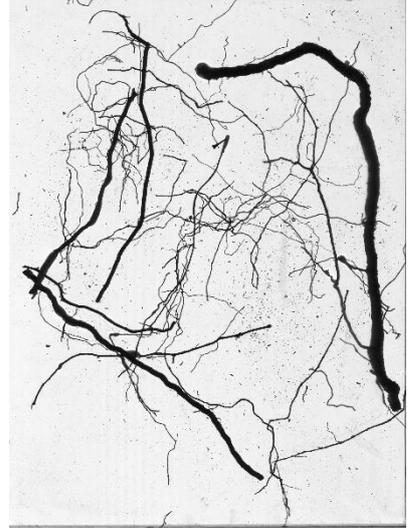
20 - 30 cm

**Amostra 114**

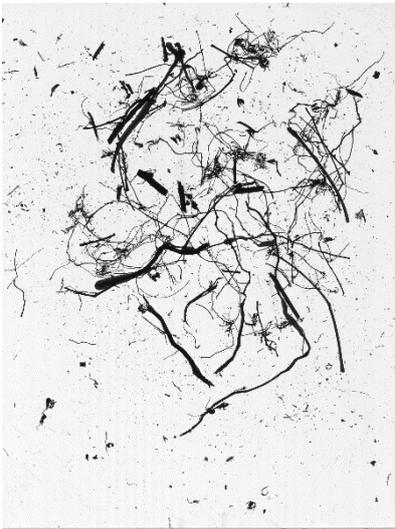
0 - 10 cm



10 - 20cm



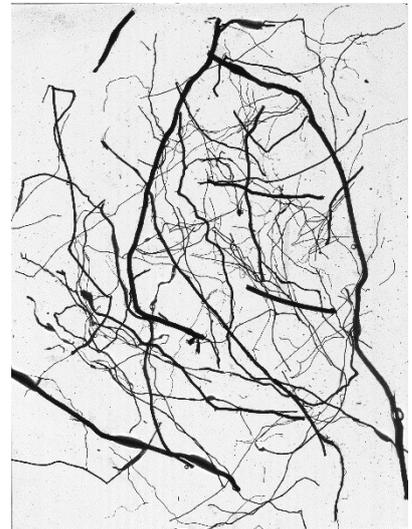
20 - 30 cm

**Amostra 126**

0 - 10 cm

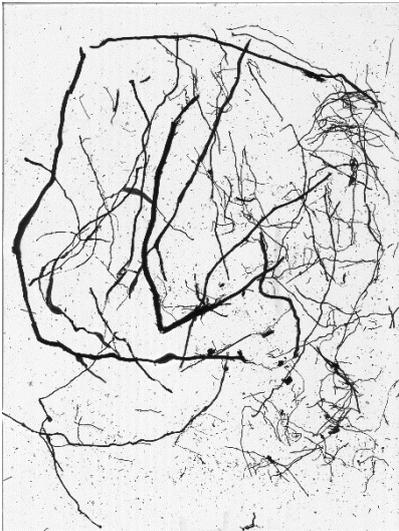


10 - 20cm

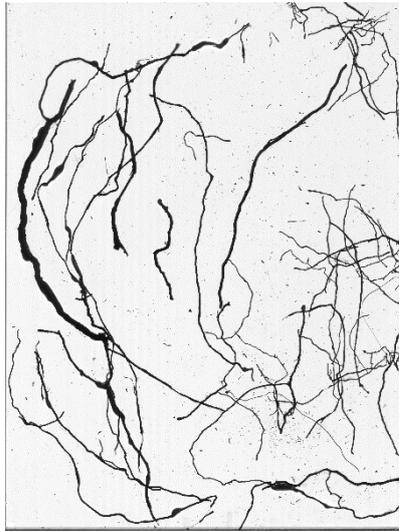


20 - 30 cm

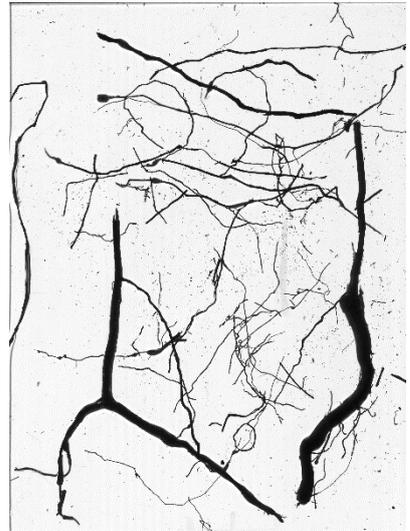
**Amostra 132**



0 - 10 cm



10 - 20cm

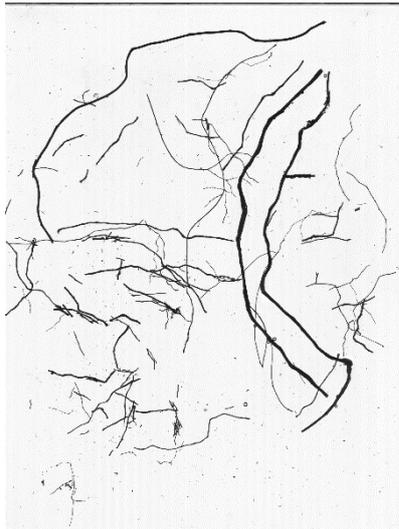


20 - 30 cm

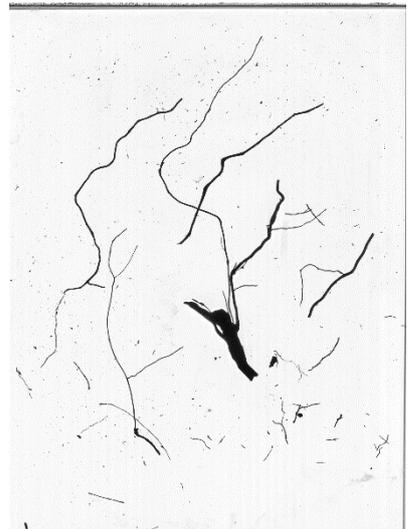
**Amostra 140**



0 - 10 cm



10 - 20cm



20 - 30 cm

**APÊNDICE C – CONJUNTO DE DADOS TOTAIS DOS PARÂMETROS RADICULARES POR AMOSTRA, PROFUNDIDADE E DIÂMETRO.**

Dado totais obtidos dos Parâmetros radiculares									
Diâmetro	Amostra	profundidade (cm)	Comprimento total (cm)	Diâmetro médio (mm)	Volume de raíz (cm <sup>3</sup> )	Diâmetro	Comprimento total (cm)	Diâmetro médio (mm)	Volume de raíz (cm <sup>3</sup> )
> 2 mm	1	0 - 10	3557457	0,4018	0,451	≤2 mm	2190068	0,3659	0,23
		10 -20	8117518	0,6194	2,446		17323345	0,3352	1,529
		20 -30	4741588	0,5161	0,992		10957600	0,2895	0,722
	3	0 - 10	10270279	0,5617	2,545		19934807	0,4126	2,665
		10 -20	13311868	0,3915	1,602		10316358	0,3629	1,067
		20 -30	8870093	0,4226	1,244		12568056	0,3403	1,143
	11	0 - 10	5492600	10,7896	2,701		2969531	0,3614	0,305
		10 -20	6631428	0,8414	0,908		8103070	0,2915	0,541
		20 -30	3961921	0,4282	0,57		1290225	0,36	0,131
	23	0 - 10	8814335	13,6115	4,961		4523471	0,3608	0,462
		10 -20	10362599	22,3993	14,063		7522520	0,3302	0,644
		20 -30	3055548	0,7573	1,376		1467848	0,3836	0,17
	25	0 - 10 cm	2670775	0,4166	0,364		-	-	-
		10 - 20 cm	13381546	1,3619	2,118		1338665	0,3272	0,113
		20-30 cm	11795119	1,0637	2,357		-	-	-
	31	0 - 10 cm	7763298	2,1992	3,632		23647950	0,4464	3,7

	10 - 20 cm	7463495	1,9694	2,866		7053071	0,4004	0,888
	20-30 cm	2775698	0,5877	0,753		8940317	0,4023	1,136
35	0 - 10 cm	10335118	1,0854	2,382		13431813	0,4593	2,225
	10 - 20 cm	8830341	1,0087	1,662		12861949	0,3621	1,325
	20-30 cm	10413653	11,1088	3,236		2378716	0,3948	0,291
39	0 - 10 cm	10716309	0,7522	4,762		31421493	0,4105	4,159
	10 - 20 cm	10108731	0,6518	3,373		14080196	0,3977	1,749
	20-30 cm	7561624	0,5674	1,912		5201984	0,3933	0,632
41	0 - 10 cm	18111537	1,234	2,431		7401723	0,3262	0,619
	10 - 20 cm	3271983	0,4052	0,422		1288196	0,3377	0,115
	20-30 cm	15300331	1,2011	1,935		5736710	0,3493	0,55
44	0 - 10 cm	2600353	0,6717	0,921		5649726	0,4339	0,835
	10 - 20 cm	4555913	1,6409	2,399		7140777	0,857	0,834
68	0 - 10 cm	8008777	1,236	2,35		11711422	0,371	1,266
	10 - 20 cm	25411134	2,5124	3,306		26149856	0,3284	2,215
	20-30 cm	5775673	0,8307	0,775		5287589	0,314	0,41
69	0 - 10 cm	7846674	11,7228	3,66		6524580	0,393	0,791
	10 - 20 cm	7531498	21,2367	10,393		7959848	0,3953	0,977
	20-30 cm	4885822	0,787	2,377		4706338	0,3862	0,551
75	0 - 10 cm	4102239	0,4784	0,737		4456749	0,3458	0,418
	10 - 20 cm	2697850	0,8112	1,398		7114679	0,3547	0,703

	20-30 cm	831037	0,4607	0,139		-	-	-
76	0 - 10 cm	3554420	0,5934	0,983		7004574	0,3781	0,786
	10 - 20 cm	2702303	0,5789	0,711		18768412	0,298	1,309
	20-30 cm	2304262	0,5104	0,472		8945059	0,2943	0,608
101	0 - 10 cm	5404951	1,0747	1,3		24585459	0,4084	3,22
	10 - 20 cm	6144173	10,9154	2,609		10880944	0,3728	1,187
	20-30 cm	4904201	1,006	0,968		21953830	0,3746	2,42
102	0 - 10 cm	8489085	1,9862	3,092		8842917	0,4285	1,275
	10 - 20 cm	3509585	0,4878	0,656		1786647	0,3565	0,178
	20-30 cm	1272240	0,5954	0,354		1110980	0,3825	0,128
103	0 - 10 cm	15944146	1,3061	2,432		2964344	0,3154	0,232
	10 - 20 cm	8758026	1,4529	1,589		2997492	0,3605	0,306
	20-30 cm	6899514	0,4622	1,158		7030090	0,4032	0,898
104	0 - 10 cm	4669900	0,4261	0,666		4427810	0,4088	0,581
	10 - 20 cm	10323737	0,9606	1,866		14631412	0,3981	1,821
	20-30 cm	12635935	0,3725	1,377		7396650	0,3207	0,597
109	0 - 10 cm	6680205	1,1609	1,863		15708524	0,3339	1,375
	10 - 20 cm	2863069	0,4927	0,546		25672357	0,3296	2,19
	20-30 cm	6468665	1,2795	0,959		11384154	0,2972	0,79
110	0 - 10 cm	6975249	1,1204	2,026		3400938	0,4903	0,642
	10 - 20 cm	8838112	1,0542	1,945		10669312	0,4205	1,482

		20-30 cm	2288616	1,0976	3,127		22658099	0,4115	3,013
	114	0 - 10 cm	5920523	0,4914	1,123		14091419	0,3812	1,608
		10 - 20 cm	9388603	0,4904	1,773		20230707	0,3352	1,785
		20-30 cm	15354844	1,1832	4,012		15125397	0,3232	1,241
	126	0 - 10 cm	9299927	0,4386	1,405		2510236	0,3732	0,275
		10 - 20 cm	13074881	1,5711	6,444		13591261	0,3056	0,997
		20-30 cm	8561013	0,6578	2,909		12179012	0,3187	0,971
	132	0 - 10 cm	16375281	12,4773	9,18		21432053	0,451	3,423
		10 - 20 cm	5482097	0,8366	3,013		8064509	0,3929	0,978
		20-30 cm	8892945	0,5408	2,043		8640411	0,362	0,889
	140	0 - 10 cm	9169629	1,2487	2,578		5790539	0,4334	0,854
		10 - 20 cm	3575487	0,5738	0,925		3619008	0,3832	0,417
		20-30 cm	1556832	0,6597	0,532		-	-	-